

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64098 от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова»

(141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)  
Издается с сентября 2014 г.

Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:

05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника [05.07.02 Проектирование конструкций и производство летательных аппаратов, 05.07.10 Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности], (входит в Перечень ВАК)

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление [05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям), 05.13.18 Математическое моделирование численные методы и комплексы программ], (не входит в Перечень ВАК)  
05.16.00 Металлургия и материаловедение [05.16.09 Материаловедение (по отраслям)] (входит в Перечень ВАК)

Подписной индекс в каталоге НТИ-Роспечать 62191

Главный редактор  
**Артюшенко Владимир Михайлович**,  
д.т.н., профессор

Над выпуском работали  
Паршина Ю.С.  
Пирогова Е.В.  
Багдасарян А.А.  
Харитоновна А.А.  
Макаревич Е.В.

Адрес редакции:  
141070, Королев,  
Ул. Октябрьская, 10а  
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),  
E-mail : rio-kimes@mail.ru,  
Site: www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации  
Материалы приводятся в авторской редакции.

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Аббасова Т.С., Привалов В.И., Бондаренко В.Г.  
**СИНТЕЗ БАЗОВОЙ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....3**

Азаренко Л.Г.  
**ФОРМИРОВАНИЕ РАСШИРЕННОЙ КРИТЕРИАЛЬНОЙ БАЗЫ В УПРАВЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ВАЖНЕЙШИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.....17**

Артюшенко В.М., Воловач В.И.  
**ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА СЛЕДЯЩИМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ В АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ НА ФОНЕ АДДИТИВНЫХ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ. КРУТИЗНА ДИСКРИМИНАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ЧАСТЬ I.....26**

Вокин Г.Г., Гуменюк А.М.  
**КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ, АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ.....38**

Захаров А.А., Захаров В.А.  
**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ НЕРАЗЛИЧИМОСТИ И НАЛИЧИИ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....48**

Мороз А.П., Полехина Г.Е., Полехин А.И.  
**ГЕНЕРАТОР ФОРМАТОВ ГРУППОВОГО ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРОГРАММНО УПРАВЛЯЕМЫМ СПОСОБОМ СБОРА ДАННЫХ.....58**

Щурин К.В., Береснев С.А., Капустин В.А.  
**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ.....69**

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. **Барканов Е.Н.**, Dr.sc.ing.
2. **Васильев Н.А.**, д.т.н., профессор
3. **Леоненко Д.В.**, д.ф.-м.н., профессор
4. **Тимофеев А.Н.**, д.т.н., профессор

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. **Аббасов Э.М.**, к.т.н.
2. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
3. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
4. **Бершадский В.А.**, д.т.н., профессор кафедры
5. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
6. **Кучеров Б.А.**, к.т.н.
7. **Логачев И.А.**, к.т.н.
8. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
9. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
10. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
11. **Мороз А.П.**, д.т.н., профессор
12. **Мосалов О.П.**, к.ф.-м.н.
13. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
14. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
15. **Скрябин М.Л.**, к.т.н.
16. **Соляной В.Н.**, к.т.н.
17. **Стрэналюк Ю.В.**, д.т.н., профессор
18. **Халиулин В.И.**, д.т.н., профессор
19. **Чесноков А.В.**, д.т.н.
20. **Щурин К.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 17.06.2021  
Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л.12,6  
Тираж 500 экз.  
Заказ № 91-02

Отпечатано в типографии  
ООО «Научный консультант»  
г. Москва  
Хорошевское шоссе, 35, корп.2

## *ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ*

Брусков А.А.  
**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОТКАЗОВ ВО  
ВЗАИМОЗАВИСИМЫХ МНОГОУРОВНЕВЫХ СЕТЯХ...76**

Воловач В.И.  
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ТОЧНОСТИ СОВМЕСТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДВУХ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА.....91**

Истратова Е.Е., Антонянц Е.Н., Амельченко А.О.  
**МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА  
СЕТЕВОГО ТРАФИКА В КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ  
ПРЕДПРИЯТИЯ.....104**

Маслобоев А.В., Путилов В.А.  
**ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЦЕЛЕВЫЕ МОДЕЛИ  
УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ  
(ЧАСТЬ 1. СИНТЕЗ ЦЕПОЧЕК ЦЕЛЕЙ  
И ДЕЙСТВИЙ).....114**

Семенов А.Б., Гончаров Д.А., Лёвкин А.В.  
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭШЕЛОННОЙ СХЕМЫ  
ФОРМИРОВАНИЯ КОММУТАЦИОННОГО ПОЛЯ  
УЗЛА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ  
ОФИСНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ.....127**

Суркова Л.Е., Давыдов Д.В.  
**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНТЕГРАЦИИ  
ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ВМ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ С ОФИСНЫМ ПРИЛОЖЕНИЕМ...139**

## *МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ*

Абразумов В.В., Спиринов Б.Л.  
**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ДРЕВЕСНЫХ КОМПОЗИТОВ.....148**

Баринкова А.А., Пирирайнен В.Ю., Баринков В.М.  
**НОВЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ  
С НЕЙТРАЛИЗОВАННЫМ КРАСНЫМ ШЛАМОМ.....156**

Ерошенко В.Д., Овчинников А.Н., Васильев А.Н.  
**РАЗРАБОТКА СПОСОБА СИЛИЦИРОВАНИЯ  
ВЫСОКОПЛОТНОГО ГРАФИТА МАРКИ МПГ.....170**

Спиринов Б.Л., Фролов С.В., Абразумов В.В.  
**МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ФОРМИРОВАНИЕМ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
НАСЫПНЫХ СТРУКТУР.....180**

Шахназаров К.Ю., Михайлов А.В., Цуканов Д.В.  
**ОБОСНОВАНИЕ ПРИЗНАКОВ ПРЕВРАЩЕНИЯ  
В ЖЕЛЕЗЕ И УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ  
ПРИ ~ 450 °С.....190**

УДК 629.7

## **Синтез базовой спутниковой радионавигационной системы**

**Т.С. Аббасова**, кандидат технических наук, доцент,

**В.И. Привалов**, кандидат технических наук, доцент,

**В.Г. Бондаренко**, кандидат технических наук, доцент,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*На основе анализа особенностей навигационно-временных определений и методологических основ проектирования в системах высокоточного позиционирования проведена генерация вариантов спутниковой радионавигационной системы, исходным шагом в которой является синтез её базового варианта. Рассмотрены наиболее эффективные процедуры разрешения неоднозначности фазовых измерений, основанных на избыточности фазовых измерений, а также процедуры, заключающиеся в целочисленной максимизации функции неоднозначности, выбранной из характера периодичности сигналов навигационного космического аппарата. Сформулирован критерий точности позиционирования.*

Навигационно-временные определения, пространственно-временная обработка, декомпозиция базовой системы.

## **Synthesis of a basic satellite radio navigation system**

**T.S. Abbasova**, Ph.D., assistant professor,

**V.I. Privalov**, Ph.D., assistant professor,

**V.G. Bondarenko**, Ph.D., assistant professor,

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*Based on the analysis of the features of navigation-time definitions and methodological foundations of design in high-precision positioning systems, the generation of options for a satellite radio navigation system was carried out, the initial step in which is the synthesis of its basic version. The most effective procedures for resolving the ambiguity of phase measurements based on the redundancy of phase measurements, as well as procedures involving the integer maximization of the ambiguity function, selected from the nature of the periodicity of the signals of the navigation spacecraft, are considered. A criterion for positioning accuracy is formulated.*

Navigation-time definitions, space-time processing, decomposition of the base system.

## Введение

Одним из основных направлений развития наземной инфраструктуры является совершенствование функциональных дополнений к системе мониторинга состояния стартовых и технических систем космодрома с помощью инновационных технологий. Спутниковая навигация для мониторинга состояния объектов на космодромах и их перемещения требует высокоточного навигационно-временного обеспечения. Наибольшую эффективность мониторинга обеспечивает интеграция систем позиционирования, коррекции, навигационных систем на базе современных средств вычислительной техники, проводных и беспроводных телекоммуникаций [1, С.56;2, С.21;3, С.20]. Эффективность в данном случае определяется как точность спутниковой радионавигационной системы. Актуально повышение точности спутниковой радионавигационной системы для улучшения качества мониторинга состояния стартовых и технических систем космодрома.

## Анализ инновационных технологий для повышения точности навигационной задачи

Повышения точности решения навигационной задачи можно добиться различными методами как за счет улучшения радионавигационного оборудования, так и за счет применения различных алгоритмов обработки измерений радионавигационных параметров.

В основе глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) лежит простая идея, она заключается в дальномерном решении навигационной задачи. Схематично классическая навигационная задача приведена на рисунке 1. Пусть  $N_i (x_{n_i}, y_{n_i}, z_{n_i})$  – станции, а  $D_i$  – геометрические дальности от маяков до объекта  $r(x, y, z)$ . Используя дальности, можно составить систему уравнений для дальностей до объекта  $r$ , и, решив эту систему, определить компоненты вектора состояния интересующего объекта. Для того чтобы получившаяся система уравнений имела решение необходимо, чтобы количество измерений дальности было не меньше, чем компонент в векторе состояния. Таким образом, для получения трех координат необходимо иметь минимум три измерения дальности [10, С.25].

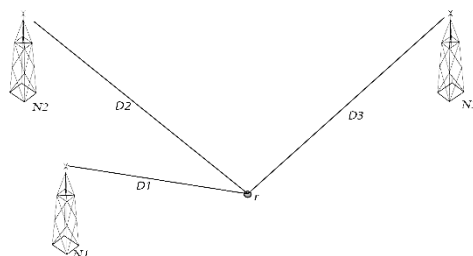


Рисунок 1 – Определение положения дальномерным методом

На практике чаще всего положение объекта определяется при помощи метода наименьших квадратов (МНК) или при помощи фильтра Калмана. Для выполнения оценивания, используя данные методы, помимо измерений дальности необходимо знать модельное значение измеренной дальности. Для приведен-

ного примера она имеет следующий вид

$$d_i = \sqrt{(x_{n_i} - x)^2 + (y_{n_i} - y)^2 + (z_{n_i} - z)^2}. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что в (1) дальность не искажена никакими внешними факторами, и модель точно отражает измеренный параметр. В этом случае решение навигационной задачи будет однозначным.

В космической навигации задача определения параметров движения объекта, являющегося потребителем, определяются аналогичным образом, однако в отличие от приведенного примера на рисунке 1, в качестве измерительных объектов выступают навигационные космические аппараты (НКА), показанные на рисунке 2, а модель измерений не может совпадать с реальными измерениями. Это связано с тем, что измеряется не дальность в явном виде, а время прохождения радиосигнала от НКА к объекту-потребителю. На сигнал влияют аппаратурные задержки, искажения сигнала, обусловленные прохождением его через тропосферу и ионосферу, системные шумы, а также НКА и потребитель имеют сдвинутые относительно друг друга шкалы времени, что также вносит некоторую ошибку в значение измеренной дальности [6, С.281]. С учетом перечисленных факторов модель кодовых измерений принимает следующий вид

$$P_i = \rho_i + c(dt - dT_i) + I_i + T_i + \varepsilon_i; \quad (2)$$

где  $\rho_i = c \cdot \Delta t_i$  – значение геометрической дальности до  $i$ -го НКА;  $c$  – скорость света;  $dt$  – поправка к часам потребителя;  $dT_i$  – поправка к часам НКА;  $I_i$  – ионосферная задержка сигнала;  $T_i$  – тропосферная задержка сигнала;  $\varepsilon_i$  – системная случайная ошибка кодовых измерений.

Также в настоящее время используются измерения фазы несущей, ее модель измерения имеет вид

$$\Phi_i = \rho_i + c(dt - dT_i) + I_i + T_i + \lambda B_i + \varepsilon_2; \quad (3)$$

где  $B_i = \varphi_r - \varphi_{s_i} + N_i$  – смещение фазы несущей;  $\varphi_r$  – начальная фаза приемника;  $\varphi_{s_i}$  – начальная фаза НКА;  $N_i$  – целочисленная неоднозначность;  $\lambda$  – длина волны;  $\varepsilon_2$  – системная случайная ошибка фазовых измерений.

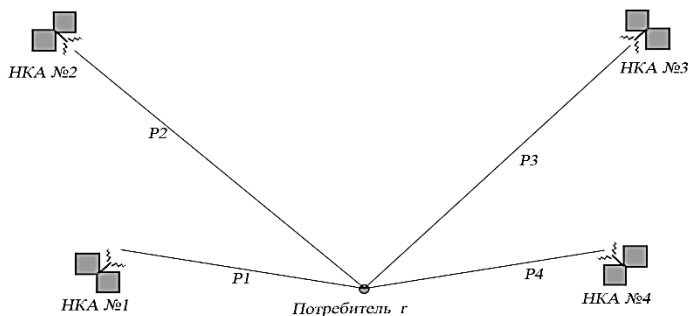


Рисунок 2 – Определение положения с помощью навигационных космических аппаратов

Особенностью определения положения с помощью навигационных космических аппаратов является тот факт, что, помимо координат, необходимо уточнять поправку к шкале времени потребителя, а также смещения фаз несущей.

Для исключения ионосферных задержек используется комбинация фазовых и кодовых измерений на разных частотах.

$$\Phi_{LC} = \frac{\gamma \cdot L_1 - L_2}{\gamma - 1}; \quad (4)$$

$$P_{LC} = \frac{\gamma \cdot P_1 - P_2}{\gamma - 1}; \quad (5)$$

где  $\Phi_{LC}$  – комбинация для фазовых измерений;  $P_{LC}$  – комбинация для кодовых измерений;  $L_1, P_1$  – фазовое и кодовое измерение на первой частоте;  $L_2, P_2$  – фазовое и кодовое измерение на второй частоте;  $\gamma = \frac{f_1}{f_2}$ ;  $f_1, f_2$  – первая и вторая частоты радионавигационного сигнала.

В данном режиме определения координат потребителя оцениваемый вектор состояния имеет следующий вид

$$x = (r^T, v^T, B^T, \Delta t); \quad (6)$$

где  $r^T = (x, y, z)$  – вектор координат потребителя;  $v^T = (V_x, V_y, V_z)$  – проекции скоростей потребителя на оси системы координат, в которой решается навигационная задача;  $B^T = (B_0 \dots B_n)$  – вектор смещений фаз несущей,  $n$  – количество измерений;  $\Delta t$  – поправка к шкале времени потребителя.

В отличие от метода точного точечного позиционирования, в котором используются измерения дальности только между НКА и потребителем, в методе «Кинематика в реальном времени» также используются измерения до опорной базовой станции, пространственные координаты которой точно известны. Идея данного метода состоит в том, чтобы использовать двойные разности измерений от НКА до базовой и до потребителя, как показано на рисунке 3.

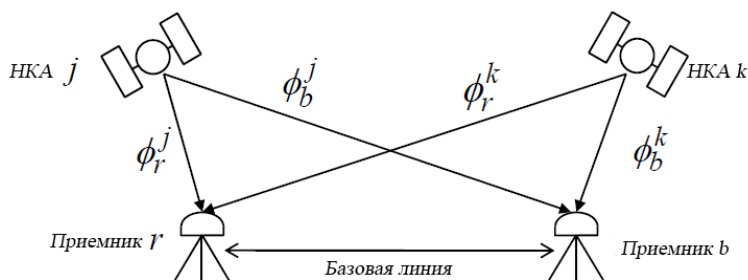


Рисунок 3 – Двух-разностные измерения

В соответствии с этим двух-разностная модель фазовых измерений имеет вид:

$$\Phi_{rb}^{jk} = \lambda \left( (\Phi_r^j - \Phi_b^j) - (\Phi_r^k - \Phi_b^k) \right); \quad (7)$$

где  $\Phi_r^j, \Phi_r^k$  – измерения фазы несущей от  $j$ -го и  $k$ -го НКА до потребителя;  $\Phi_b^j, \Phi_b^k$  – измерения фазы несущей от  $j$ -го и  $k$ -го НКА до базовой станции;  $\lambda$  – длина волны.

Если в выражение для модели двух-разностных измерений подставить выражения для  $\Phi_r^j, \Phi_r^k, \Phi_b^j, \Phi_b^k$ , то его можно записать в следующем виде:

$$\Phi_{rb}^{jk} = \rho_{rb}^{jk} - I_{rb}^{jk} + T_{rb}^{jk} + \lambda N_{rb}^{jk} + \varepsilon_\Phi; \quad (8)$$

где  $\rho_{rb}^{jk}$  – геометрическая дальность;  $I_{rb}^{jk}$  – ионосферная поправка;  $T_{rb}^{jk}$  – тропосферная поправка;  $N_{rb}^{jk}$  – целочисленная неоднозначность фазовых смещений;  $\varepsilon_\Phi$  – системная ошибка фазовых измерений.

Модель кодового измерения в этом случае имеет вид:

$$P_{rb}^{jk} = \rho_{rb}^{jk} - I_{rb}^{jk} + T_{rb}^{jk} + \varepsilon_P; \quad (9)$$

В случае если длина базовой линии не превышает 10 километров двух-разностная модель фазовых и кодовых измерений принимают следующий вид:

$$\Phi_{rb}^{jk} = \rho_{rb}^{jk} + \lambda N_{rb}^{jk} + \varepsilon_\Phi; \quad (10)$$

$$P_{rb}^{jk} = \rho_{rb}^{jk} + \varepsilon_P. \quad (11)$$

Можно заметить, что в данном случае в выражении отсутствуют ионосферная и тропосферная поправки, это связано с тем, что для находящихся рядом друг с другом объектов эти поправки имеют примерно равную величину.

$$I_r^j \approx I_b^j; \quad (12)$$

$$T_r^j \approx T_b^j. \quad (13)$$

В свою очередь это означает, что при использовании двойных разностей измерений для объектов удаленных друг от друга на расстояние не превышающие 10 километров, эти поправки стремятся к нулю. В этом случае существенно повышается точность определения координат потребителя.

Также при использовании двойных разностей из выражения для модели измерений уходят поправки к шкалам времени потребителя и НКА. С учетом этого вектор состояния также не содержит в себе уточняемую поправку к шкале времени потребителя и имеет следующую структуру

$$x = (r^T, v^T, N^T); \quad (14)$$

где  $r^T = (x, y, z)$  – вектор координат потребителя;  $v^T = (V_x, V_y, V_z)$  – проекции скоростей потребителя на оси системы координат, в которой решается навигационная задача;  $N^T = (N_0 \dots N_n)$  – вектор целочисленных неоднозначностей фазы несущей;  $n$  – количество измерений.

Использование описанных методов позволяют достичь следующий точности решения навигационной задачи по сравнению с стандартным режимом позиционирования, в котором используются только кодовые измерения.

Результаты представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Сравнение характеристик методик обработки измерений радионавигационных параметров**

	Стандартный режим позиционирования	Точное позиционирование
Тип измерений	Кодовые	Кодовые + фазовые
Ошибки приемника	30 см	3 мм
Многопутность	30 см. – 30 м	1 – 3 см
Чувствительность	Высокая (< 20дБГц)	Низкая (>35дБГц)
Точность	3 м (H), 5 м (V), (single) 1 м (H), 2 м (V), (DGPS)	5 мм (H), 1 см(V) (ТТП) 1 см (H), 2 см(V) (КРВ)

Применение различных методов и инновационных технологий обработки измерений позволяет существенно повысить точность определения координат потребителя, однако при развитии структуры функциональных дополнений к системе мониторинга, работающей на основе спутниковой навигации, необходимо дополнительное усовершенствование спутниковой радионавигационной системы.

#### **Анализ структуры функциональных дополнений к системе мониторинга**

Комплекс функциональных дополнений включает [4, С.12]: спутниковую радионавигационную систему (СРНС), систему дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ); локальные и региональные дифференциальные подсистемы; систему высокоточного позиционирования; локальные навигационные системы.

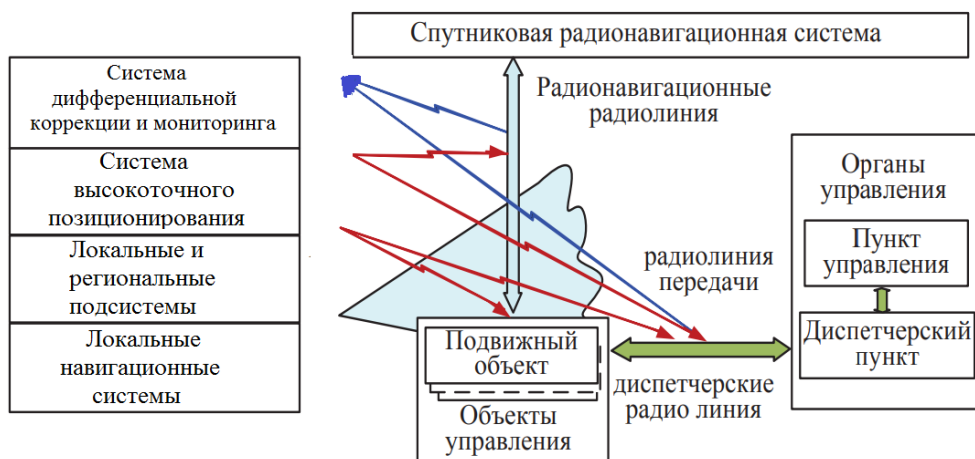
Типовая структура взаимосвязи перечисленных функциональных дополнений приведена на рисунке 4.

СДКМ является широкозонной системой, решающей задачи формирования корректирующей (уточнённой эфемеридно-временной) информации, сведений о состоянии навигационно-временных полей ГЛОНАСС, GPS (от англ. Global Positioning System – система глобального позиционирования) и всех перспективных систем, а также оперативной доставки потребителям информации о целостности навигационно-временных полей спутниковых радионавигационных систем (СРНС).

СДКМ в России подобна широкозонным системам:

- WAAS, США (от англ. wide area augmentation system) – система распространения поправок к данным, передаваемым навигационной системой GPS;
- EGNOS, ЕС (от англ. European Geostationary Navigation Overlay Services) – европейская геостационарная служба навигационного покрытия;
- MSAS, Япония (от англ. Multi-functional Satellite Augmentation System) – многофункциональная система дифференциальной коррекции спутникового базирования, принадлежащая Японии).





**Рисунок 4 – Схема взаимодействия спутниковой радионавигационной системы с функциональными дополнениями к системе мониторинга стартовых и технических систем космодрома**

Доставка сообщений СДКМ осуществляется по космическим и наземным каналам передачи данных. Основу орбитальной группировки СДКМ составляют космический аппарат (КА) ретрансляции «Луч».

#### **Анализ особенностей навигационно-временных определений**

В системах высокоточного позиционирования повышение точности навигационно-временных определений достигается при использовании фазовых измерений в навигационной аппаратуре (НАП).

Потенциальное (минимально возможное) значение дисперсии погрешности измерения псевдодалности на несущей составляющей радионавигационного сигнала определяется следующим соотношением [8, С.17]:

$$\sigma_D^2 = c_o^2 / 4\pi^2 f_n^2 q_{c/и} \cdot \quad (15)$$

Для  $f_n = 1,6025625$  ГГц и  $q_{c/и} = 10$  из выражения (1) получим  $\sigma_D = 9,42$  мм. Такая высокая точность определяет значительный интерес к фазовым методам измерения, которые наиболее активно используются в геодезии.

Специфика навигационно-временных определений на основе фазовых измерений состоит в разрешении проблемы их неоднозначности.

Методы разрешения неоднозначности фазовых измерений классифицируют как статические, кинематические и «в движении». Статические методы применяют при неподвижных приёмниках, два других – при изменении относительных координат приёмников.

Наиболее эффективные процедуры разрешения неоднозначности основаны на избыточности фазовых измерений. Другой подход к разрешению неоднозначности сводится к целочисленной максимизации функции неоднозначности, выбранной из характера периодичности сигналов навигационного космического аппарата (НКА) по фазе [9, С.52]. При этом применяются как переборные, так и безпереборные процедуры разрешения неоднозначности.

Использование фазовых измерений в ДР навигационно-временных определений позволяет вычислять координаты потребителя с погрешностью до единиц миллиметров [5, С.83]. Для разрешения неоднозначности необходимо от нескольких десятков до нескольких сотен отсчётов наблюдений, что приводит к увеличению времени определений от единиц до десяти и более минут.

Другое направление повышения качества навигационно-временных определений связано с интегрированием НАП с инерциальными навигационными системами [5, С.121].

Интегрирование НАП с инерциальными навигационными системами обеспечивает: повышение надёжности интегрированной системы; снижение стоимости при использовании низко стоимостных инерциальных датчиков; более высокую степень резервирования; повышение точности определения координат, составляющих вектора скорости, угловой ориентации и угловой скорости; непрерывность высокоточных навигационно-временных определений; высокую скорость выдачи данных.

Повышение устойчивости НАП к действию помех, приходящих с направлений, отличных от направлений прихода сигналов от НКА, связано с развитием методов пространственно-временной обработки сигналов в НАП [5, С.124]. Это требует использования антенной решетки, способной подавлять помехи на 30...50 дБ и совершенствования алгоритмов пространственно-временной сигналов в НАП.

#### **Логическая схема проектирования спутниковой радионавигационной системы**

Методологические основы проектирования СРНС представляют собой систему подходов, принципов, методов, правил и норм исследования и проектирования СРНС. В фундаменте этой системы лежит системный подход, ориентирующий на рассмотрение внешних и внутренних сторон (аспектов) СРНС и системный анализ.

Системный анализ как научный метод познания в виде последовательности действий по установлению структурных связей между переменными или элементами исследуемой системы определяет основу логической схемы проектирования выбранной системы и предполагает:

- постановку задачи исследований (проектирования);
- выбор моделей изучаемой системы;
- генерацию вариантов системы;
- выбор и исследование с помощью моделей рациональных (оптимальных) вариантов системы).

При постановке задачи исследования системы осуществляется выбор границ изучаемой системы, выбор показателей и критериев её эффективности, а также ограничений, определяющих возможности создания системы.

Выбор моделей изучаемой системы состоит в определении задачи моделирования, содержания и формы представления информации об исследуемой системе в модели.

Генерация вариантов системы может заключаться в синтезе её базового

варианта, его декомпозиции и последующей интеграции элементов декомпозированных вариантов.

Выбор и исследование с помощью моделей рациональных (оптимальных) вариантов системы предполагает определение ограниченного числа вариантов системы (или единственного варианта), предназначенных для её реализации.

В создании новых технических систем, в том числе и СРНС, участвуют в тесном взаимодействии заказывающие и разрабатывающие (исследовательские) организации. В последующем обозначим их как Заказчик и Разработчик.

Осознание необходимости в создании (проектировании) перспективных СРНС возникает как у Заказчика, так и у Разработчика. При этом необходимость в развитии СРНС (как и других сложных технических систем) обуславливается двумя подходами к их созданию: нормативному и исследовательскому.

Сущность нормативного подхода определяется тем, что возникающие новые задачи требуют создания новых систем (новые задачи → новые системы). Этот образ мышления более свойственен Заказчику.

Сущность исследовательского подхода заключается в том, создаваемые новые системы открывают возможности для решения новых задач (новые системы → новые задачи). Этот образ мышления более Разработчику.

В нормативном плане переходу к проектированию перспективной СРНС предшествует такая стадия жизненного цикла системы как обоснование необходимости её создания. На этой стадии Заказчик проводит научно-исследовательские работы (НИР), в которых им формируются задачи новой системы и необходимый уровень её внешних и внутренних характеристик. Разработчиком на основе определённого уровня внешних и внутренних характеристик системы проводятся НИР по обоснованию возможности их достижения в рамках заданного горизонта планирования.

Согласованные результаты НИР Заказчика и Разработчика отражаются в проектах соответствующих федеральных целевых программ, а также программ другого вида.

Начало работ по проектированию перспективной СРНС определяется соответствующими программными положениями на основе разработанного Заказчиком задания.

В нормативном плане проектирование СРНС является совокупностью этапов следующей после обоснования стадии жизненного цикла системы – стадии разработки.

К этим этапам относятся:

- эскизное проектирование;
- разработка рабочей документации;
- разработка опытного образца.

Завершает стадию разработки системы этап её испытаний, при успешном завершении которых система передаётся на производство (для серии систем) или в эксплуатацию (для единственного образца).

При формировании задания на разработку системы и в ходе её проектирования учитываются особенности последующих после разработки стадий жизненного цикла: производство (исключается при единственном образце), эксплуа-

тация и утилизация.

### Синтез и оценка эффективности базовой спутниковой радионавигационной системы

Одним из элементов логической схемы проектирования СРНС является генерация вариантов системы, исходным шагом в которой является синтез её базового варианта. Под базовым вариантом СРНС будем понимать её вариант, соответствующий экстремуму главного показателя эффективности СРНС. Основными среди показателей эффективности СРНС являются точность, доступность, непрерывность и целостность [10, С.3]. Среди перечисленных показателей главным по многим соображениям следует считать показатель точности [7, С.55].

Критерий точности представим в виде требования минимизации следа взвешенной корреляционной матрицы погрешностей оценок параметров движения и временных параметров  $K_{gp}$  на выходе совокупности НАП:

$$I_{kg} = Sp\Theta_{gp} K_{gp} = \sum_{j=1}^{m_g} \Theta_{gpj} K_{gpj} \rightarrow \text{мин}, \quad (16)$$

где  $\Theta_{gp}$  – диагональная матрица «весов» оценок параметров движения и временных параметров с диагональным элементом  $\Theta_{gpj}$ , представляющим диагональную матрицу отдельных «весов» оценок;  $K_{gpj}$  – диагональная клетка корреляционной матрицы  $K_{gp}$  (корреляционная матрица погрешностей оценок параметров движения и временных параметров на выходе НАП  $j$ -го потребителя);  $m_g$  – число определяемых параметров НАП совокупности потребителей.

Основу базового варианта СРНС составляет её целевая подсистема, представляющая совокупность средств формирования радионавигационных сигналов космического базирования и средств их обработки в виде НАП различного вида базирования.

Проводить оптимизацию целевой подсистемы базового варианта СРНС, состоящей из двух подсистем по одному критерию не корректно. Корректный подход к решению этой задачи состоит в задании структурно-параметрических характеристик одной из подсистем и при данных условиях проведения структурно-параметрической оптимизации другой подсистемы по критерию (16).

Будем полагать, что заданным звеном в целевой подсистеме базового варианта СРНС является совокупность средств формирования радионавигационных сигналов, структурно-параметрические характеристики которых соответствуют требованиям, предъявляемым к радионавигационному полю перспективной СРНС.

Структурно-параметрическая оптимизация совокупности средств обработки радионавигационных сигналов состоит в выборе их функционально-технической структуры и параметрической оптимизации по критерию (16).

При снятых ограничениях на реализацию перспективных средств обработки радионавигационных сигналов для получения оценок параметров движения и временных параметров потребителей и в соответствии с достигнутым

уровнем развития науки в области СРНС в качестве структуры рассматриваемой подсистемы следует рассматривать структуру в виде пространственно-временного фильтра радионавигационных сигналов.

Математическое описание такого фильтра представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений относительно оценок определяемых параметров движения и времени, подобную исходной системе, описывающей динамику изменения определяемых параметров. Управляющим элементом в первой части системы дифференциальных уравнений оценок определяемых параметров является взвешенная невязка принимаемых и опорных сигналов в виде электромагнитных полей.

Определение пространственно-временных коэффициентов «веса» невязок сигналов осуществляется в ходе решения системы нелинейных дифференциальных уравнений оценок элементов матрицы  $K_{gr}$ .

При линеаризации системы дифференциальных уравнений оценок определяемых параметров относительно некоторых опорных значений параметров, дискретизации по пространству и времени, переходе от конечно-разностных уравнений к алгебраическим уравнениям можно получить линейный оператор  $D_1$  (матрицу весовых коэффициентов) преобразования множества отсчетов невязок сигналов в оценки приращений оцениваемых параметров.

Таким образом, подсистему обработки радионавигационных сигналов в составе целевой подсистемы базовой СРНС возможно представить однозвенной системой пространственно-временной обработки невязок сигналов, характеризуемой линейным оператором  $D_1$ .

Описанная система однозвенной пространственно-временной обработки невязок сигналов имеет наивысшую сложность реализации, не позволяющую её воплощение на текущем этапе развития техники.

В качестве показателя сложности такой системы определим общее количество весовых коэффициентов, отличных друг от друга:

$$C_1 = N_x N_y N_t m_g, \quad (17)$$

где  $N_x$ ,  $N_y$  и  $N_t$  – соответственно, количество отсчетов по соответствующим координатам и времени.

Для  $m_g = 8$  (один потребитель), параметрах СРНС второго поколения и раскрые антенны  $2 \times 2$  м получим  $C_1 = 6 \cdot 10^{13}$ .

Для уменьшения сложности базовой системы необходимо переходить к её декомпозиции. Например, при двух звеньях получаем звено пространственной и временной обработки.

Возможные варианты декомпозиции базовой системы приведены на рисунке 5.

На рисунке 5 обозначены: ПВС – пространственно-временная система, ПС – пространственная система, ВС – временная система, ВЧС – высокочастотная система, НЧС – низкочастотная система, СС – сигнальная система, ИС – информационная система, ПерС – система первичной обработки, ВтС – система

вторичной обработки.

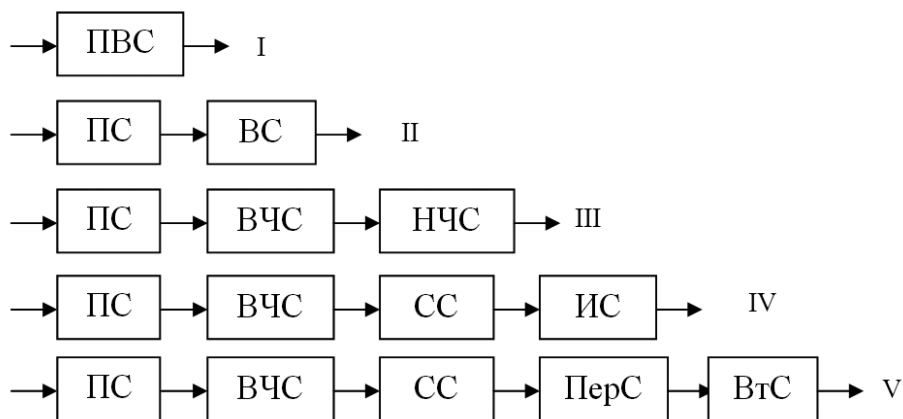


Рисунок 5 – Варианты декомпозиции базовой системы

Например, сложность двухзвенной системы (раздельные пространственная и временная обработки) равна

$$C_2 = C_{21} + C_{22} = N_x N_y + N_t m_g, \quad (18)$$

где  $C_{21}$  и  $C_{22}$  – соответственно, сложность первого звена (пространственная обработка) и второго звена (временная обработка).

Для приведённых выше значений параметров базовой системы получим  $C_2 = 6 \cdot 10^9$ , что на четыре порядка меньше показателя сложности однозвенной системы.

Каждая дальнейшая декомпозиция приводит к последующему уменьшению показателя сложности.

Для приближения характеристик декомпозированных систем к однозвенной необходимо при фиксированных параметрах первых звеньев системы в последнем звене подобрать параметры таким образом, чтобы сблизить многозвенные системы и однозвенную по показателю точности.

Показатели качества построения первых звеньев системы могут отличаться от главного показателя, например, в пятизвенной системе:

- звено 5.1 (АФУ) и звено 5.2 (ВЧ – цепи приемника) – обеспечение максимума отношения сигнал / шум;

- звено 5.3 (следающие звенья для выделения параметров сигнала) – обеспечение максимума апостериорной вероятности (точность определения параметров сигнала);

- звено 5.4 (устройство первичной обработки) – обеспечение точности определения текущих навигационных параметров.

- звено 5.5 (устройство вторичной обработки) выбираются по критерию близости операторов однозвенной и многозвенной обработки, в частности, с использованием псевдообращений общих операторов первых звеньев.

Последующее наращивание системы относительно выбранных по крите-

рию (1) параметров звеньев происходит с использованием других показателей при учете условий реализуемости в установленные сроки создания.

#### Выводы

Определен критерий точности спутниковой радионавигационной системы в виде требования минимизации следа взвешенной корреляционной матрицы погрешностей оценок параметров движения и временных параметров на выходе совокупности навигационной аппаратуры. Предложены организационно-технические мероприятия с использованием инновационных технологий в аэрокосмической деятельности для уменьшения сложности базовой спутниковой радионавигационной системы с помощью её декомпозиции.

#### Литература

1. Аббасова Т.С., Комраков А.А. Восстановление и проверка корректности телеметрических данных // Информационно-технологический Вестник. 2015. № 2(04). С. 55-64.
2. Аббасова Т.С., Погосян А.Т. Анализ структуры наземного комплекса управления космическими летательными аппаратами // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2016): сб. статей VI международной заочной научно-технической конференции. Ч.1 / Поволжский гос. ун-т сервиса. Тольятти: ПВГУС, 24-25.03.2016. С. 19-22 (345 с.)
3. Артюшенко В.М., Васильев Н.А., Аббасова Т.С. Комплекс полунатурного моделирования систем автоматического управления летательных аппаратов и ракетно-космической техники // Сборник статей Международной научно-практической Интернет-конференции «Современные образовательные технологии, используемые в очном, заочном и дополнительном образовании». 2013. С. 17-22 (425 с.).
4. Дворкин В.В., Карутин С.Н. Развитие комплекса функциональных дополнений системы ГЛОНАСС // Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии. Труды III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» / под ред. Ю.М. Урличича, А.А. Романова. М.: Радиотехника, 1-3.06.2011. С. 11-20 (342 с.).
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 286 с.
6. Козлов Н.Р. Методика обработки измерений радионавигационных параметров по технологиям «кинематика в реальном времени» и «точное точечное позиционирование». Инновационные аспекты социально-экономического развития региона: сборник статей по материалам участников IX Ежегодной научной конференции аспирантов «МГОТУ» (15.05.19, наукоград Королев). М.: Научный консультант, 2019. С. 280-287 (556 с.).
7. Кучеров Б.А. Адаптация мощности земных станций узловой сети спутниковой связи при работе в стволе с прямой ретрансляцией // Двойные технологии. 2015. № 1. С. 53-58.
8. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. 286 с.

9. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. М.: Радиотехника, 2008. 342 с.
10. Свинтицкий Я.В., Алексеев О.А. Контроль целостности спутниковых радионавигационных систем: состояние и перспективы // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 1. С. 3-11.
11. Remco Kroes. Precise relative positioning of formation flying spacecraft using GPS. NCG, Netherlands geodetic commission, The Netherlands. 2006. 164 p.



УДК 629.7.01, 004.02

**Формирование расширенной критериальной базы в управлении эффективностью важнейших элементов перспективных космических систем мониторинга гравитационного поля Земли**

**Л.Г. Азаренко**, доктор экономических наук, доцент,  
главный научный сотрудник,

НИИ космических систем имени А.А.Максимова –  
филиал АО «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева» (НИИ КС имени А.А. Максимова –  
филиал АО «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева»), г. Королев, Московская область

*В статье рассматриваются подходы к формированию критериальной базы оценки эффективности при проектировании перспективных космических систем на примере космических систем мониторинга гравитационного поля Земли. Сформулированы основные требования к созданию критериальной базы. Дано определение критерия и обобщенного критерия эффективности применительно к элементам перспективных космических систем. Рассмотрены общие и частные критерии эффективности перспективных космических систем в зависимости от назначения конкретной системы (оборонного применения, гражданские, многоцелевые).*

Проектирование перспективных космических систем, мониторинг гравитационного поля Земли, частные критерии эффективности, обобщенный критерий эффективности, обработка данных.

**Formation of an expanded criteria base for managing the effectiveness of the most important elements of advanced space systems for monitoring the Earth's gravitational field**

**L.G. Azarenko**, economic PhDs, associate Professor,  
Khrunichev State Research and Production Space Center Space Systems Institute,  
Korolev, Moscow region

*The article considers approaches to the formation of a criteria base for evaluating the effectiveness of the design of advanced space systems on the example of space systems for monitoring the Earth's gravitational field. The main requirements for creating a criteria base are formulated. The definition of the criterion and the generalized criterion of efficiency in relation to the elements of advanced space systems is given. General and specific criteria for the effectiveness of advanced space systems are considered, depending on the purpose of a particular system (defense, civil, multi-purpose).*

Design of advanced space systems, monitoring of the Earth's gravitational field, partial efficiency criteria, generalized efficiency criterion, data processing.

### **Введение**

В числе основных задач, возникающих на стадии принятия решения о разработке той или иной перспективной космической системы, следует назвать, прежде всего, формирование расширенной базы критериев для оценки эффективности разрабатываемой космической системы (и отдельных ее элементов). Выбираемые критерии должны четко соответствовать определенным требованиям. Особое внимание следует сфокусировать на обоснованности проводимых оценок с позиций взаимовлияния и взаимозависимости избранных критериев. Степень рассматриваемых взаимозависимостей определяется либо так называемым коэффициентом обоснованности, либо уровнем корреляции между различными критериями (показателями). В случае, когда корреляция приближается к единице, то избранные критерии (показатели) могут рассматриваться в качестве хорошо соотносимых. Приближение корреляции к нулю демонстрирует, что соотношение между критериями не достигло требуемого уровня. Еще один важный метод оценки обоснованности избираемых критериев – это анализ конструктивной обоснованности. Анализ конструктивной обоснованности предполагает установление четких связей между критериями (показателями), характеризующими элементы данной космической системы, и критериями (показателями) изделий-аналогов космической техники, способных решать те же целевые задачи.

### **Результаты исследования**

Одна из самых главных характеристик при избрании критерия – это его надежность. Особое значение названная характеристика приобретает в случае применения эвристических подходов и методов в технико-экономическом обосновании разработки перспективных космических систем, поскольку очевидны проблемы в оценке меры субъективности в суждениях экспертов. Но также важно и еще одно требование при избрании критериев оценки эффективности перспективных космических систем. Это – восприимчивость к изменениям. Для обеспечения надежности и точности используемых данных критерии должны быть ориентированы на актуальную ситуацию в отношении космической системы в целом и ее основных слагаемых. Следует подчеркнуть, что при создании критериальной базы не желательно завышать планируемые показатели. Они должны быть максимально реалистичны и, соответственно, достижимы.

Опираясь на вышеизложенное можно изложить общие требования к формированию критериальной базы оценки эффективности важнейших элементов перспективных космических систем:

– адекватность: критерий должен явным образом отмечать прогрессивные изменения в решении целевых задач или достижении заданных показателей, характеризуя все значимые аспекты этих прогрессивных изменений;

– точность: различного рода ошибки (погрешности) в определении значения критерия (показателя) не должны вызывать неадекватное представление о результатах (продуктах) эксплуатации космической системы (или отдельных ее элементов);

– объективность: нецелесообразно использовать критерии, которые способны демонстрировать улучшение своих значений на фоне ухудшения реальной картины; применяемым критериям следует в минимальной степени формировать

стимулы для искажения результатов функционирования космической системы;

– достоверность: приемы и методы получения, а также обработки входящей информации должны изначально ориентироваться на внешний аудит точности;

– однозначность: все участники процесса (исполнители-специалисты, потребители) должны иметь единое понимание существа избираемого критерия, в связи с чем целесообразно отказаться от слишком сложных критериев, для которых в настоящий момент не существует единого определения;

– экономичность: процесс получения данных о функционировании космической системы должен быть ориентирован на минимизацию затрат, избираемые критерии должны максимально основываться на традиционных процедурах сбора информации;

– сопоставимость: отбор критериев должен ориентироваться на процесс непрерывного накапливания информации, принимая во внимание требование сопоставимости (за определенные периоды времени) с критериями, которые применяются в оценках прогрессивных изменений в практике выполнения аналогичных (по целевым задачам) проектов (эксплуатации космических систем), а также с критериями, традиционными для мировой практики;

– своевременность и регулярность в вычислении критериев: считается, что отчетная информация должна поступать с четкой периодичностью и с минимальным временным лагом между моментом получения данных и началом использования.

Принимая во внимание, что в современной обстановке увеличивается количество организаций и предприятий, которые заинтересованы в использовании продуктов эксплуатации космических систем мониторинга гравитационного поля Земли, расширенная критериальная база оценки эффективности важнейших элементов перспективных космических систем должна отвечать предъявляемым информационным требованиям со стороны организаций-потребителей. То есть создаваемая база критериев должна быть нацелена на проведение перманентного мониторинга эффективности космической системы и соответствия продуктов ее эксплуатации (результатов космической деятельности) запросам организаций-потребителей и оценку конкурентоспособности этих космических продуктов на международном рынке космических товаров и услуг. Критерий эффективности сложной технической системы (каковыми и являются перспективные космические системы гравитационного поля Земли) может рассматриваться как своего рода правило, дающее возможность сравнивать стратегии достижения целевых задач и производить векторный отбор стратегий из подмножества допустимых. Под обобщенным критерием эффективности космической системы следует понимать набор функционалов (различных показателей качества), которые вычислены для определенных условий эксплуатации космической системы. С этих методических позиций космическая система должна обладать требуемыми свойствами только тогда, когда избранные критерии находятся в заданных границах. Рассматриваемый подход предполагает двухэтапную оценку целевой эффективности применения космической системы мониторинга гравитационного поля Земли. На первом этапе формируется перечень критериев эффективности и опре-

деляются области допустимых значений. Второй этап предполагает уже непосредственное определение показателей эффективности эксплуатации космической системы (и отдельных ее составляющих). Рассматривая эффективность как комплексную характеристику целенаправленного процесса эксплуатации космической системы можно выстроить «дерево критериев эффективности», представляющее собой некую иерархическую лестницу, где для каждого уровня (система в целом, отдельные сегменты, отдельные модули) существуют соответствующие критерии эффективности.

Если проводится анализ эксплуатации космической системы в целом, то, как правило, обобщающим критерием эффективности выступает экономическая эффективность, естественно при выставленных ограничениях на показатели детальности, точности, производительности, оперативности и т.п. Тогда показатель эффективности космической системы рассчитывается как разница между общими доходами от реализации результатов эксплуатации космической системы и общими затратами на проектирование, разработку, изготовление, развертывание составляющих космической системы и последующую ее эксплуатацию. Если речь идет, например, о проектировании, разработке и эксплуатации составляющих космической системы (космических аппаратов), то как основной критерий эффективности может приниматься минимизация стоимости проектирования, разработки, производства и вывода на заданную орбиту космического аппарата при соответствии показателям-ограничениям (детальности, производительности, оперативности и др.).

Конкурентоспособность космической системы характеризуется определенным количеством ее функциональных свойств, часть которых являются общими для всех спутниковых группировок. Характеристики этих общих свойств и выступают сопоставимыми критериями эффективности для космических систем (в том числе и для разноцелевых). Примеры названных характеристик – срок активного существования входящих в группировку космических аппаратов, способность к коллокации с другими спутниками и др. Существуют и общие определяемые классом платформ характеристики, которые могут использоваться в проводимой оценке эффективности. Например, габариты и количество бортового оборудования; схема выведения спутников (поочередное, кластерное); стартовая масса космических аппаратов; доступность совместимых средств выведения и др. Оценка и сопоставление названных общих и групповых критериев дает возможность определить уровень эффективности и конкурентоспособности важнейших элементов перспективных космических систем.

По своей сути избираемые показатели должны объективно и в количественной форме иллюстрировать решение космической системой целевых задач. Если речь идет о многоцелевых системах (например, системах мониторинга гравитационного поля Земли), то здесь целесообразным представляется обращение к интегрированным показателям. Таким образом, эффективность перспективной космической системы мониторинга гравитационного поля Земли может оцениваться исходя из полноты выполнения ею целевых задач:

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{N_z} \sum_{j=1}^{N_z} P_i \quad , \quad (1)$$

где

$N_z$  – количество целевых задач, решаемых космической системой мониторинга гравитационного поля Земли в интересах профильных пользователей;

$i$  – решаемая задача;

$P_i$  – вероятность решения задачи.

Вышеприведенная формула (1) используется, если все решаемые системой задачи признаются равными по приоритетности. В противном случае используется другой вариант:

$$\mathcal{E}_c = \sum_{i=1}^{N_z} k_i P_i \quad , \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_z} k_i = 1, \quad (3)$$

где

$k_i$  – приоритетность задачи.

Вероятность решения конкретной задачи оценивается на основании информации о полноте удовлетворения потребностей пользователя как произведение количества требований, предъявляемых потребителем и показателем выполнения каждого требования для каждой конкретной задачи.

При проектировании и разработке составляющих элементов перспективных космических систем по анализируемым критериям часто возникают трудности, связанные с созданием моделей себестоимости элементов системы проектных характеристик. В ряде случаев зафиксировать функциональную связь между основными показателями эффективности и проектными характеристикам элементов космической системы довольно затруднительно. Решение вопроса возможно через применение удачно подобранных частных критериев эффективности. Например, как критерий оценки эффективности составляющего (КА) системы мониторинга гравитационного поля Земли можно использовать критерий пригодности (качества).

Качество любой технической системы, в том числе и космической системы, проявляется в процессе ее целевого использования. Под эффективностью целенаправленного функционирования системы понимается не просто способность решать целевые задачи, производя определенный космический продукт (или услугу), а именно результативность этой способности (т.е. стоимость полученного космического продукта соотносится с осуществляемыми затратами). Следовательно, при создании критериальной базы верхний уровень формируют показатели результативности, а показатели ресурсоемкости и оперативности выступают как производные показателями, определяющие результативность. Обобщая вышеизложенное можно сказать, что результативность функционирования космического аппарата определяется целевыми эффектами и может быть охарактеризована такими показателями как ресурсоемкость и оперативность (временные параметры решения целевых задач). Тогда условия успешного решения космическим аппаратом целевых задач в формализованном виде будут выглядеть так:

$$F = \begin{cases} X_n^c(t) \in \{X_n^c(t)\}^\partial \\ t \leq t^\partial \end{cases} \quad (4)$$

где

$X_n^c(t)$  – вектор показателей функционирования космической системы;

$\{X_n^c(t)\}^\partial$  – подмножество допустимых значений показателей функционирования космической системы.

Основываясь на функциональных требованиях, можно привести несколько частных критериев для спутников: результативность систем унифицированной космической платформы (УКП); вероятность обеспечения текущего (мгновенного) баланса электрической энергии на борту; вероятность обеспечения заданных температур объектов регулирования системы обеспечения температурного режима и др.

Но помимо частных показателей важно выделить обобщенный показатель качества процесса функционирования космического аппарата. При разработке космических систем как интегральные показатели могут рассматриваться: масса  $m_{КА}$ ; стоимость  $C_{КА}$  и срок активного существования  $t_{САС}$  космических аппаратов.

В отношении характеристики оптимальности могут использоваться следующие частные критерии оптимальности:

– по вероятности решения целевой задачи

$$P_{КА} \geq P_{КА}^{min} \begin{cases} m_{КА} \leq m_{КА}^{max} \\ t_{САС} \geq t_{САС}^{max} \\ C_{КА} \leq C_{КА}^{max} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{КА} = \max\{P_{КА}\} \begin{cases} m_{КА} \leq m_{КА}^{max} \\ t_{САС} \geq t_{САС}^{max} \\ C_{КА} \leq C_{КА}^{max} \end{cases} \quad (6)$$

– по массе (минимум массы)

$$m_{КА} = \min\{m_{КА}\} \begin{cases} P_{КА} \geq P_{КА}^{min} \\ t_{САС} \geq t_{САС}^{max} \\ C_{КА} \leq C_{КА}^{max} \end{cases} \quad (7)$$

– по стоимости (минимум стоимости)

$$C_{КА} = \min\{C_{КА}\} \begin{cases} P_{КА} \geq P_{КА}^{min} \\ t_{САС} \geq t_{САС}^{max} \\ m_{КА} \leq m_{КА}^{max} \end{cases} \quad (8)$$

В выражениях 7-10  $m_{КА}^{max}$   $C_{КА}^{max}$   $t_{САС}^{max}$   $P_{КА}^{min}$  – это ограничения, накладываемые на основные показатели качества космического аппарата, связанные с предельно допустимыми значениями.

Использование частных критериев как замены основных целесообразно, например, когда известно, что с возрастанием (или убыванием) частного показателя также монотонно возрастает (или убывает) основной. Обычно с уменьшением массы космического аппарата уменьшается его себестоимость. Поэтому, вме-

сто критерия минимизации стоимости космического аппарата, можно использовать критерий минимизации массы. С уменьшением массы и моментов инерции космического аппарата можно также повысить скорость его поворота при обработке программы полета (улучшить динамические свойства), что может привести к росту производительности космического аппарата. Относительные массы и конструкции бортовых систем могут также выступать в качестве частных критериев эффективности, поскольку с их уменьшением масса космического аппарата в целом и моменты инерции также уменьшаются. Использование частных критериев дает возможность определения локальных экстремумов эффективности проектируемой космической системы с минимальными затратами временных и трудовых ресурсов.

Поскольку одним из показателей эффективности выступает степень удовлетворенности пользователей, в качестве критерия экономической эффективности для перспективных космических систем мониторинга гравитационного поля Земли может использоваться индикатор полноты наблюдения гравитационного поля Земли. Полнота гидрометеорологических данных характеризуется потребным набором бортовой аппаратуры, поэтому данный индикатор может рассчитываться как [3, С.7]:

$$I = \frac{n}{N}И(1 - A), \quad (9)$$

где

$N$  – планируемое количество целевых КА в КС (минимум);

$n$  – количество работающих КА;

$И$  – объем заказа космических услуг со стороны госструктур;

$A$  – объем информации, которую невозможно получить из-за недокомплекта бортовой аппаратуры или дефектов самого КА.

На сегодняшний день приоритетной характеристикой космической системы является ее конкурентоспособность, поэтому эффективность системы может определяться исходя из соответствия ее составляющих уровню международного рынка космических товаров и услуг. Анализируя эту проблему, следует подчеркнуть, что в Федеральной космической программе вообще не предусмотрено единого критерия, по которому космический аппарат (и, следовательно, целевая космическая система) признаются соответствующими мировому уровню.

Вполне ожидаемо, что для потребителя не является существенным вопросом непосредственная технология проектирования используемого космического аппарата, а также размещаемая бортовая аппаратура. Потребителю важен только конечный результат – получение информации, в которой он заинтересован (данные по измерениям гравитационного поля Земли). Так что в качестве критерия конкурентоспособности может использоваться долевое соотношение объема целевой информации, получаемой с КА данной российской космической системы, к объёму информации с зарубежных КА [3, С.8]:

$$I = \frac{V_1}{V_2}I_0, \quad (10)$$

где

$V_1$  – объем целевой информации с отечественных КА;

$V_2$  – объем информации с зарубежных КА.

Приведенное соотношение явно иллюстрирует зависимость вычисляемого критерия от доступности информации по мониторингу гравитационного поля Земли. Сегодня на территории Российской Федерации действуют государственные операторы космических услуг (ФГУП «Космическая связь» АО «Газпром Космические системы»), коммерческие операторы (Группа компаний Альтегроскай, Красноярская компания КБ «Искра», Компания «Русат», Компания «РТКомм. Ру» ПАО «Ростелеком» и др.) и представители зарубежных компаний. Деятельность операторов формирует спрос на космические услуги. Результативность работы оператора выражается следующим показателем [3, С.8]:

$$I_0 = \frac{D_1}{D} \left(1 - \frac{Z_1}{3}\right), \quad (11)$$

где

$\frac{D_1}{D}$  – доля российского рынка, занятая оператором;

$\frac{Z_1}{3}$  – объем невыполненных заявок по мониторингу гравитационного поля Земли.

Как критерий целевой эффективности спутников, входящих в группировку мониторинга гравитационного поля Земли, целесообразно выделить производительность наблюдений. Производительность космических аппаратов выражается в площади, охваченной наблюдениями за срок активного существования космического аппарата. Еще один критерий эффективности – это периодичность наблюдения, измеряемая промежутком времени между съёмками. Частные показатели являются числовыми выражениями функции распределения периодичности (например, дисперсия и др.).

#### **Выводы.**

Таким образом, с целью повышения конкурентоспособности отечественного информационного продукта (результатов космической деятельности), можно сформулировать следующие предложения по формированию и расширению критериальной базы оценки эффективности перспективных космических систем (их важнейших элементов):

- оптимальная (или близкая к оптимальной) критериальная база для технико-экономического обоснования проектирования перспективных космических систем должна создаваться на базе анализа действующих критериев (показателей) эффективности с акцентом на специфику разрабатываемого проекта и наличия (отсутствия) требований к двойному применению создаваемой системы;

- избираемые критерии должны соответствовать таким характеристикам как адекватность, точность, объективность, достоверность, однозначность, экономичность, сопоставимость, своевременность и регулярность определения;

- основу формируемой критериальной базы могут создавать такие показатели как, например, коэффициент выгод-затрат (обычно используется для космических систем оборонной направленности) или индекс доходности для космических систем гражданского назначения. Для многоцелевых систем обычно используются интегрированные показатели. Комплексный критерий эффективности проектов создания перспективных космических систем может позиционироваться как [1, С.6]:



$$\mathcal{E}_k = (W, Z, T, R), \quad (12)$$

где

$W = W_1, W_2$  – эффективность;

$Z$  – общие затраты на создание космической системы;

$T$  – продолжительность формирования космической системы;

$R = R_1, R_2$  – степень риска при проектировании и создании космической системы;

$R_1$  – степень риска увеличения затрат на создание космической системы;

$R_2$  – степень риска снижения полезного эффекта;

$W_1 = \frac{ПЭ}{Z}$  – соотношение величины ожидаемого полезного эффекта к величине затрат (экономическая эффективность для космических проектов по созданию систем гражданского назначения);

$W_2 = k_{TE}$  – техническая эффективность, уровень конкурентоспособности и уровень инновационности космической системы;

ПЭ – полезный эффект.

#### *Литература*

1. Алпатов А., Марченко В., Сазина Н., Хорольский П. Методология проведения технико-экономического обоснования проектов создания новых образцов космической техники // *Техническая механика*. 2015. № 3. С. 3-17.
2. Зуева В.В. Учет фактора сопряженности требований потребителей и возможностей космических комплексов при оценке их эффективности // *Исследование Земли из космоса*. 2012. № 5. С. 85-96.
3. Ильина И.Ю. О введении индикаторов эффективности космической деятельности на примере метеорологических систем. *Электронный журнал // Труды МАИ: электронный научный журнал*. 2012. № 51. С. 13.
4. Косенко В.Е. Комплексные исследования по обоснованию путей создания, принципов построения, определению проектного облика космической системы глобального геодезического мониторинга // *Альманах современной метрологии*. 2015. № 3. С. 9-20.

УДК 621.396.96:621.26

**Точность измерения информационного параметра сигнала следящим измерителем в авиационной и ракетно-космической технике на фоне аддитивных и мультипликативных помех.**

**Крутизна дискриминационной характеристики. Часть I**

**В.М. Артюшенко**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационные технологии и управляющие системы,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

**В.И. Воловач**, доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования,  
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

*Рассмотрено и проанализировано влияние мультипликативных помех, действующих одновременно с аддитивными помехами, на точность измерения одного информационного параметра следящим измерителем. Проанализирована крутизна дискриминационной характеристики следящего измерителя.*

Следящий измеритель, мультипликативные и аддитивные помехи, точность измерения информационного параметра полезного сигнала, дискриминационная характеристика.

**Accuracy of measurement of the signal information parameter tracking meter in the aviation and space rocket industry technology against the background of additive and multiplicative interference.  
The steepness of the discriminatory specifications. Part I**

**V.M. Artyushenko**, doctor of Technical Sciences, Professor,  
head of the Department of information technologies and control systems,  
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

**V.I. Volovach**, doctor of technical Sciences, associate Professor,  
head of the Department «Information and electronic service»,  
State budgetary educational institution of higher education  
Volga region state University of service, Tolyatti

*The influence of multiplicative interference acting simultaneously with additive interference on the accuracy of measurement of a single information parameter by a tracking meter is considered and analyzed. The steepness of the discrimination charac-*

teristic of the tracking meter is analyzed.

Tracking meter, multiplicative and additive interference, accuracy of measurement of the useful signal information parameter, discrimination characteristic.

**Введение.** Автоматические следящие измерители неэнергетических параметров находят широкое применение в различных технических устройствах авиационной и ракетно-космической технике. Обобщенная схема такого измерительного устройства приведена на рисунке 1.

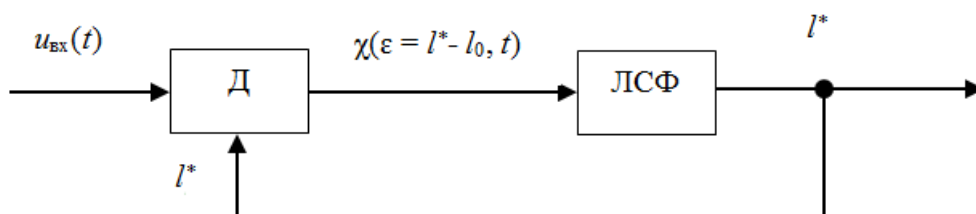


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема следящего измерительного устройства

Смесь  $u_{\text{вх}}(t)$  сигнала  $u_{\text{м}}(l_0, t)$  искаженного мультипликативной (модулирующей помехой (МП), и аддитивного белого шума  $n_0(t)$  поступает на дискриминатор (Д), в котором выделяется сигнал рассогласования  $\chi(\varepsilon, t)$ , пропорциональный разности между измеренным  $l^*$  и истинным  $l_0$  значениями параметра  $\varepsilon = l^* - l_0$ .

Цепь обратной связи замыкается через линейный сглаживающий фильтр (ЛСФ) и исполнительные устройства, в качестве которых могут использоваться, например, управляемые гетеродины, устройства сервопривода антенны и т.д.

В реальных приемных устройствах усилители, представляющие измерителю по блок-схеме рисунка 1, как правило, охвачены схемой автоматической регулировкой усиления (АРУ), которая поддерживает средний уровень мощности или огибающей сигнала  $u_{\text{вх}}(t)$  на входе Д постоянным.

Полагая изменения средней мощности входного сигнала медленными, будем учитывать влияние АРУ путем соответствующей нормировки, обеспечивающей постоянство мощности сигналов на входе дискриминатора в полосе его линейных цепей.

В общем случае измеряемый параметр является случайной функцией времени. При этом даже в отсутствие АП и МП он измеряется с некоторой ошибкой, которая называется динамической. Во многих практических задачах интервал корреляции флуктуаций самого измеряемого параметра много больше интервала корреляции функции помеховой модуляции (ФПМ) и аддитивных шумов. В этих случаях измеряемый параметр можно считать постоянным за время измерения и рассматривать лишь флуктуационные ошибки измерения, обусловленные действием АП и МП.

Таким образом, в рассматриваемом случае величина  $\varepsilon = l^* - l_0$  опреде-

ляет лишь флуктуационную ошибку.

В большинстве случаев, когда приходится считаться с влиянием на результат измерения АП и МП, ширина спектра флуктуаций, выходного сигнала (напряжения)  $D \chi(\varepsilon, t)$  много больше эффективной полосы пропускания замкнутого контура измерителя, что позволяет считать спектральную плотность мощности флуктуаций выходного сигнала  $D$  постоянной в пределах полосы пропускания следящей системы и равной спектральной плотности мощности флуктуаций на нулевой частоте. При этом для случая сравнительно низкого уровня помех, когда характеристику  $D$  по измеряемому параметру, ошибке измерения  $\varepsilon$ , можно считать линейной, выходное напряжение  $D$  приближенно записывается в виде [1]

$$\chi(\varepsilon, t) \approx \varepsilon \left. \frac{d}{d\varepsilon} \overline{\chi(\varepsilon, t)} \right|_{\varepsilon=0} + G_{\chi}^{0,5} n_0(t) = \varepsilon k_d + G_{\chi}^{0,5} n_0(t), \quad (1)$$

где  $k_d = \left. \varepsilon \frac{d}{d\varepsilon} \overline{\chi(\varepsilon, t)} \right|_{\varepsilon=0}$  – крутизна дискриминационной характеристики;  $G_{\chi}$  – спектральная плотность флуктуаций выходного сигнала  $D \chi(\varepsilon, t)$  на нулевой частоте при  $\varepsilon = 0$ ;  $n_0(t)$  – белый шум с единичной спектральной плотностью.

В соответствии с (1) спектральная плотность флуктуаций выходного сигнала  $D$  не зависит от текущего значения ошибки измерения  $\varepsilon$ , она совпадает с первым членом в разложении реальной плотности в ряд Тейлора по ошибке измерения  $\varepsilon$ .

Анализ, проведенный в [1], показывает, что такое представление спектральной плотности справедливо при выполнении следующих условий:

- ошибки измерения малы и не выходят за пределы линейного участка характеристики  $D$ ;

- флуктуации принимаемого сигнала, в частности, обусловленные МП, имеют интервал корреляции значительно меньший, чем постоянная времени следящего измерителя, ширина спектра флуктуаций сигнала значительно больше ширины спектра измеряемого параметра.

Как правило, последнее условие практически всегда выполняется для МП, которые приводят к заметным искажениям сигнала за время, равное времени его когерентной обработки в линейных цепях приемника, поскольку это время значительно меньше постоянной времени следящего измерителя.

Таким образом, принятая система допущений относительно характеристик принимаемого сигнала и помех приводит к анализу следящего измерителя как линейной по измеряемому параметру системы. Такое рассмотрение допустимо лишь при низком уровне АП и МП, когда ошибки измерения не выходят за пределы линейного участка характеристики  $D$ .

Выше было отмечено, что в случае, когда средняя за время, равное постоянной времени линейных цепей  $D$ , мощность входного сигнала изменяется медленно, влияние схем АРУ может быть учтено некоторым нормирующим коэффициентом  $k_{\text{АРУ}}$ , пропорциональным, например, мощности входного сигнала  $u_{\text{вх}}(t)$ .

С учетом нормирующего действия АРУ входной сигнал  $D$  можно запи-

сать в виде  $\frac{u_{\text{вх}}(t)}{k_{\text{АРУ}}^{0,5}[u_{\text{вх}}(t)]}$ . Поскольку введенные выше характеристики Д по измеряемому параметру  $k_{\text{д}}$ ,  $G_{\text{х}}$  зависят от абсолютного уровня входного сигнала Д, необходимо учесть влияние модулирующего действия АРУ на эти характеристики.

В дальнейшем мы будем рассматривать Д с квадратичным детектором огибающей. Сигнал на выходе такого Д пропорционален мощности входного сигнала. В этом случае с учетом действия АРУ крутизна дискриминационной характеристики и спектральная плотность флуктуаций на выходе Д записываются в виде

$$k_{\text{д.АРУ}} = \frac{k_{\text{д}}}{k_{\text{АРУ}}[u_{\text{вх}}(t)]}, G_{\text{х.АРУ}} = \frac{G_{\text{х}}}{k_{\text{АРУ}}^2[u_{\text{вх}}(t)]}. \quad (2)$$

Дисперсия ошибок измерения параметра следящим измерителем равна полной мощности флуктуаций выходного сигнала Д в полосе пропускания замкнутой следящей системы, поделенной на квадрат крутизны дискриминационной характеристики  $k_{\text{д}}^2$ .

Если  $\Delta\Omega_{\text{сс}}$  – эффективная ширина, по квадрату модуля, частотной характеристики замкнутой следящей системы измерителя  $G_3(j\omega)$ , то дисперсия ошибок измерения параметра  $l$  при низком уровне помех с учетом (1) определяется выражением

$$\sigma_l^2 = \frac{G_{\text{х}}}{k_{\text{д}}^2} \Delta\Omega_{\text{сс}}, \quad (3)$$

где

$$\Delta\Omega_{\text{сс}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|G_3(j\omega)|^2}{|G_3(0)|^2} d\Omega. \quad (4)$$

Частотная характеристика замкнутой следящей системы  $G_3(j\omega)$  находится по частотной характеристике разомкнутой следящей системы  $G_{\text{раз}}(j\omega)$  с помощью преобразования

$$G_3(j\omega) = \frac{k_0 k_{\text{д.АРУ}} G_{\text{раз}}(j\omega)}{1 + k_0 k_{\text{д.АРУ}} G_{\text{раз}}(j\omega)}, \quad (3a)$$

где  $k_0$  – коэффициент, пропорциональный коэффициенту усиления разомкнутой следящей системы.

Будем считать, что сглаживающие цепи следящего измерителя построены так, что при заданных динамических ошибках и номинальной величине крутизны Д  $k_{\text{дн.АРУ}}$  обеспечивается минимальное значение полосы пропускания следящего измерителя, равное  $\Delta\Omega_{\text{сс},0}$ .

Заметим, что номинальная крутизна Д  $k_{\text{дн.АРУ}}$  определяется как крутизна Д в отсутствии АП и МП. Аналогичным образом будем определять номинальные значения других параметров, обозначая их индексом «н», например  $k_{\text{н.АРУ}}$ .

Поскольку крутизна дискриминационной характеристики зависит от уровня и параметров АП и МП, в соответствии с (3a), (4) от уровня помех зависит и эффективная полоса пропускания измерителя как замкнутой следящей системы.

При выполнении сформулированного выше условия относительно выбора полосы пропускания сглаживающих цепей измерителя в отсутствии помех на основе результатов, приведенных в [1], можно получить следующее выражения

для эффективной ширины частотной характеристики  $G_3(j\omega)$  при наличии помех для различных сглаживающих фильтров:

- для сглаживающего фильтра в виде одного интегратора или  $RC$ -цепи

$$\Delta\Omega_{cc} = \Delta\Omega_{cc.0} \frac{k_{д.АРУ}}{k_{дн.АРУ}}; \quad (5)$$

- для сглаживающего фильтра в виде двойного интегратора с коррекцией

$$\Delta\Omega_{cc} = \frac{\Delta\Omega_{cc.0}}{2} \left( 1 + \frac{k_{д.АРУ}}{k_{дн.АРУ}} \right); \quad (6)$$

- для сглаживающего фильтра в виде двух  $RC$ -цепей с коррекцией

$$\Delta\Omega_{cc} = \frac{\Delta\Omega_{cc.0}}{3} \frac{1 + \frac{k_{д.АРУ}}{2k_{дн.АРУ}}}{1 + \frac{k_{дн.АРУ}}{k_{д.АРУ}} \sqrt{\frac{2(T_1+T_2)^2}{k_0 k_{д.АРУ} T_1 T_2}}}, \quad (7)$$

где  $T_1, T_2$  – постоянные времени  $RC$ -цепей.

Отметим, что в практических схемах следящих измерителей величина

$$y = \sqrt{\frac{2(T_1+T_2)^2}{k_0 k_{д.АРУ} T_1 T_2}},$$

входящая в (7) много меньше единицы [1].

В случае низкого уровня помех, произведение  $y \frac{k_{дн.АРУ}}{k_{д.АРУ}}$  также будет много меньше единицы. При этом выражение, определяющее  $\Delta\Omega_{cc}$  для сглаживающего фильтра в виде двух  $RC$ -цепей с коррекцией, не зависит от постоянных времени  $RC$ -цепей в явном виде и равно

$$\Delta\Omega_{cc} \approx \frac{2}{3} \Delta\Omega_{cc.0} \left( 1 + \frac{k_{д.АРУ}}{2k_{дн.АРУ}} \right). \quad (7a)$$

Если обозначить дисперсию ошибок измерения при наличии только АП (МП отсутствуют) как  $\sigma_{l.0}^2$ , то с учетом (5)-(7a) дисперсия ошибок измерения параметра  $l$  (3) при наличии АП и МП может быть записана в виде:

- при сглаживающем фильтре в виде интегратора или  $RC$ -цепи

$$\sigma_l^2 = \sigma_{l.0}^2 \frac{G_{\chi}}{G_{\chi.0}} \frac{k_{д.0}^2}{k_{д.0.АРУ}^2} \frac{k_{д.АРУ}}{k_{д.0.АРУ}}; \quad (8)$$

- при сглаживающем фильтре в виде двойного интегратора с коррекцией

$$\sigma_l^2 = \sigma_{l.0}^2 \frac{G_{\chi}}{G_{\chi.0}} \frac{k_{д.0}^2}{k_{д.0.АРУ}^2} \frac{1 + \frac{k_{д.АРУ}}{k_{дн.АРУ}}}{1 + \frac{k_{д.0.АРУ}}{k_{дн.АРУ}}}; \quad (9)$$

- при сглаживающем фильтре в виде двух  $RC$ -цепей с коррекцией

$$\sigma_l^2 = \sigma_{l.0}^2 \frac{G_{\chi}}{G_{\chi.0}} \frac{k_{д.0}^2}{k_{д.0.АРУ}^2} \frac{1 + \frac{k_{д.АРУ}}{2k_{дн.АРУ}}}{1 + \frac{k_{д.0.АРУ}}{2k_{дн.АРУ}}}; \quad (10)$$

где  $G_{\chi.0}, k_{д.0}$  – спектральная плотность выходного сигнала дискриминатора и крутизна дискриминационной характеристики при наличии только АП и без учета нормирующего действия АРУ.

Заметим, что в соответствии с принятыми выше определениями

$$k_{д.АРУ} = k_{д.0}/k_{АРУ}; \quad k_{д.0.АРУ} = k_{д.0}/k_{0.АРУ}; \quad k_{дн.АРУ} = k_{дн.0}/k_{н.АРУ},$$

где  $k_{0.АРУ}$  – коэффициент, характеризующий нормирующее действие АРУ

при наличии только АП.

Из дальнейшего будет видно, что  $k_{д.н} = k_{д.о}$ . Тогда вместо (8)-(10) соответственно получим

- для одной RC-цепи, одного интегратора

$$\sigma_l^2 = \sigma_{l.0}^2 \frac{G_{\chi}}{G_{\chi.0}} \frac{k_{д.о}^2 k_{0.АРУ}}{k_{д.}^2 k_{АРУ}} = \sigma_{l.0}^2 \eta_{l.м.1}; \quad (8a)$$

- для двух интеграторов с коррекцией

$$\sigma_l^2 = \sigma_{l.0}^2 \frac{G_{\chi}}{G_{\chi.0}} \frac{k_{д.о}^2}{k_{д.}^2} \frac{1+(k_{н.АРУ}/k_{АРУ})(k_{д.}/k_{д.о})}{1+k_{н.АРУ}/k_{0.АРУ}} = \sigma_{l.0}^2 \eta_{l.м.2}; \quad (9a)$$

- для двух RC-цепей с коррекцией

$$\sigma_l^2 = \sigma_{l.0}^2 \frac{G_{\chi}}{G_{\chi.0}} \frac{k_{д.о}^2}{k_{д.}^2} \frac{1+(k_{н.АРУ}/k_{АРУ})(k_{д.}/2k_{д.о})}{1+k_{н.АРУ}/2k_{0.АРУ}} = \sigma_{l.0}^2 \eta_{l.м.3}; \quad (10a)$$

Таким образом, ухудшение точностных характеристик следящего измерителя за счет действия МП по сравнению со случаем, когда они отсутствуют, может быть оценено коэффициентами  $\eta_{l.м.i}$  при  $\sigma_{l.0}^2$  в (8a)-(10a).

Для вычисления этих коэффициентов достаточно определить характеристики дискриминатора: крутизну дискриминационной характеристики ( $k_{д.}, k_{д.о}$ ) и спектральную плотность флуктуаций на выходе дискриминатора при нулевой ошибке ( $G_{\chi}, G_{\chi.0}$ ), а также коэффициенты, определяющие нормирующее действие АРУ ( $k_{АРУ}, k_{0.АРУ}, k_{н.АРУ}$ ) при наличии и в отсутствие помех.

**1. Крутизна дискриминационной характеристики.** Дальнейшее рассмотрение мы ограничим широко распространенной в различных системах схемой дискриминатора – двухканальным дискриминатором с расстроенными по параметру  $l$  каналами (рисунок 2).

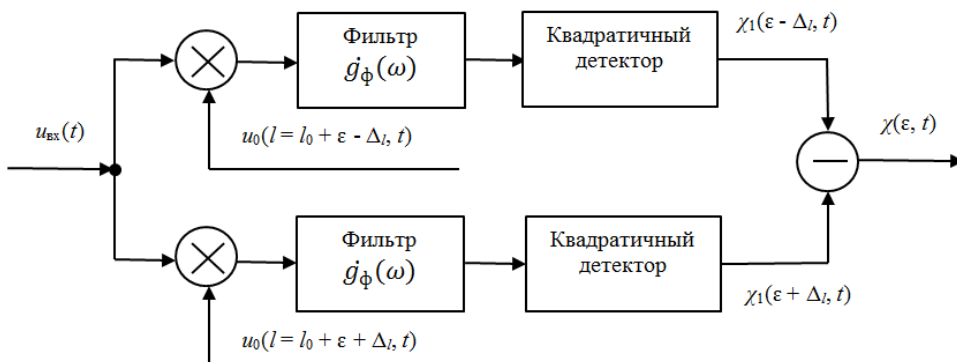


Рисунок 2 – Функциональная схема двухканального дискриминатора с расстроенными по параметру  $l$  каналами

Принцип его работы заключается в следующем. Входной сигнал, искаженный помехами,  $u_{вх}(t)$  поступает на два умножителя, где умножается на опорные сигналы, смещенные по параметру  $l$  на величину  $\pm \Delta_l$  относительно измеряемого в данный момент времени значения параметра  $l^*$ . Опорные сигналы формируются генераторами, которые управляются сигналами, пропорциональ-

ными измеренному значению параметра. После перемножения сигналы поступают на фильтры с частотной характеристикой  $\dot{g}_\phi(\omega)$  и затем на квадратичные детекторы огибающей [1].

Выходной сигнал дискриминатора (сигнал ошибки) пропорционален разности квадратов огибающих сигналов на выходе фильтров.

Коэффициенты  $k_{\text{АРУ}}, k_{0.\text{АРУ}}$ , которые определяют нормирующее действие АРУ и поддерживают постоянной мощность входного сигнала в полосе линейных цепей дискриминатора, в рассматриваемой схеме дискриминатора могут быть определены как величины, пропорциональные сумме квадратов огибающих на выходе фильтров.

В дальнейшем коэффициент пропорциональности будем считать равным единице. При этом в отсутствии помех сигнал на входе линейных цепей дискриминатора с учетом нормирующего действия АРУ будет иметь единичную мощность.

**а. Крутизна дискриминационной характеристики при когерентном входном сигнале.** В соответствии с функциональной схемой, представленной на рисунке 2, выходной сигнал дискриминатора записывается в виде

$$\chi(\varepsilon, \tau) = \chi_1(\varepsilon - \Delta_l, \tau) - \chi_2(\varepsilon + \Delta_l, \tau), \quad (11)$$

где функции  $\chi_{1,2}(\varepsilon \pm \Delta_l, \tau)$  в стационарном режиме равны

$$\begin{aligned} \chi_{1,2}(\varepsilon \pm \Delta_l, \tau) = & \frac{1}{8} \operatorname{Re} \left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} [\dot{M}(t_1) \dot{U}(t_1, l_0) + \dot{N}(t_1)] \times \right. \\ & \times [\dot{M}(t_2) \dot{U}(t_2, l_0) + N^*(t_2)] \dot{H}(\tau - t_1) H^*(\tau - t_2) \times \\ & \left. \times U_0^*(t_1, l_0 - \varepsilon \mp \Delta_l) \dot{U}_0(t_2, l_0 - \varepsilon \mp \Delta_l) dt_1 dt_2 \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

где  $\dot{H}(\tau - t)$  – комплексная огибающая импульсной характеристики фильтра с частотной характеристикой  $\dot{g}_\phi(\omega)$ ;  $\dot{U}_0(t, l_0 + \varepsilon \mp \Delta_l)$  – комплексная огибающая опорного сигнала единичной энергии;  $U^*(t, l_0) = \sqrt{E} U_0^*(t, l_0)$  – комплексная огибающая нормированного принимаемого сигнала;  $E$  – энергия принимаемого сигнала;  $\dot{N}(t)$  – комплексная огибающая аддитивного шума.

В выражении (12) отброшен быстро осциллирующий член, который отфильтровывается в инерционных цепях квадратичных детекторов, включенных в оба канала дискриминатора.

Найдем крутизну дискриминационной характеристики и коэффициенты, определяющие нормирующее действие АРУ, полагая аддитивный шум белым со спектральной плотностью  $N_0$ . Для когерентного входного сигнала среднее значение выходного сигнала дискриминатора в стационарном режиме равно

$$\begin{aligned} \overline{\chi(\varepsilon, \tau)} = & \frac{E}{2} \alpha_0^2 \left[ |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l)|^2 - |\dot{\lambda}(\varepsilon + \Delta_l)|^2 \right] + \\ & + \frac{E}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \left[ |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega)|^2 - |\dot{\lambda}(\varepsilon + \Delta_l, \Omega)|^2 \right] d\Omega, \quad (13) \end{aligned}$$

где

$$\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{g}_\phi(\omega) \rho^*(\varepsilon - \Delta_l, \Omega - \omega) d\omega;$$

$$\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l) = \dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega - \omega);$$

$$\rho(\varepsilon - \Delta_l, \Omega - \omega) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_0(t) U_0^*(t, \varepsilon - \Delta_l) \exp\{j(\Omega - \omega)t\} dt.$$

Коэффициент  $k_{\text{АРУ}}$  с учетом (13) равен



$$k_{\text{АРУ}} = \overline{\chi_1(\varepsilon, \tau)} + \overline{\chi_2(\varepsilon, \tau)} = \frac{E}{2} \alpha_0^2 \left[ |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l)|^2 + |\dot{\lambda}(\varepsilon + \Delta_l)|^2 \right] + \frac{E}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \left[ |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega)|^2 + |\dot{\lambda}(\varepsilon + \Delta_l, \Omega)|^2 \right] d\Omega + N_0/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} g_{\Phi}^*(\omega) \dot{\lambda}(0, \omega) d\omega. \quad (14)$$

Здесь учтено, что  $\overline{\dot{N}(t_1)N^*(t_2)} = 2N_0\delta(t_1 - t_2)$ ,  $\overline{\dot{N}(t_1)\dot{N}(t_2)} = 0$ .

Для определения условий отсутствия систематических ошибок измерения проведем анализ выражения для среднего значения выходного сигнала дискриминатора (13). В общем случае это требование выполняется, если  $\overline{\chi(0, \tau)} = 0$ .

В отсутствие МП выходной сигнал дискриминатора, очевидно, будет

$$\overline{\chi(\varepsilon, \tau)} = \frac{E}{2} |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l)|^2 - |\dot{\lambda}(\varepsilon + \Delta_l)|^2. \quad (15)$$

Из (15) видно, что при наличии только АП и при одинаковых частотных характеристиках фильтров  $\dot{g}_{\Phi}(\omega)$  в обоих каналах дискриминатора смещение оценки, систематическая ошибка измерения, будет отсутствовать ( $\overline{\chi(0, \tau)} = 0$ ) при условии

$$|\dot{\lambda}(-\Delta_l)|^2 - |\dot{\lambda}(\Delta_l)|^2. \quad (16)$$

Условие (16) выполняется, в частности, если  $|\dot{g}_{\Phi}(\omega)|$  – функция, четная относительно средней частоты фильтра.

В дальнейшем будем считать, что в дискриминаторе используется именно такие фильтры.

При наличии АП и МП систематическая ошибка измерения отсутствует, если дополнительно выполняется условие

$$\int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \left[ |\dot{\lambda}(-\Delta_l, \Omega)|^2 - |\dot{\lambda}(\Delta_l, \Omega)|^2 \right] d\Omega = 0. \quad (17)$$

Поскольку для большинства реальных сигналов и измерителей выполняется условие  $|\dot{\lambda}(-\Delta_l, \Omega)|^2 = |\dot{\lambda}(\Delta_l, -\Omega)|^2$ , то при наличии МП систематическая ошибка измерения отсутствует лишь в том случае, когда  $G_V(\Omega) = G_V(-\Omega)$ , то есть спектр флуктуаций функции помеховой модуляции симметричен относительно  $\Omega = 0$ . Последнее условие в некоторых случаях, например при наличии связи между амплитудными и фазовыми искажениями, может не выполняться.

Таким образом, МП могут привести к появлению систематической ошибки измерения даже в том случае, когда при наличии только АП такие ошибки отсутствуют.

При отсутствии систематических ошибок измерения, при выполнении условий (16), (17), крутизна дискриминационной характеристики равна

$$k_{\text{д}} = \alpha_0^2 E \frac{d}{d\varepsilon} |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l)|_{\varepsilon=0}^2 + \frac{E}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \frac{d}{d\varepsilon} |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega)|_{\varepsilon=0}^2 d\Omega. \quad (18)$$

Входящее в (8а) – (10а) отношение  $k_{\text{д}}/k_{\text{д},0}$  с учетом (18) будет равно

$$\frac{k_{\text{д}}}{k_{\text{д},0}} = \alpha_0^2 + \left[ 2\pi \frac{d}{d\varepsilon} |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l)|_{\varepsilon=0}^2 \right]^{-1} \times \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \frac{d}{d\varepsilon} |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega)|_{\varepsilon=0}^2 d\Omega. \quad (19)$$

При условии отсутствия систематической ошибки измерения для входящих в (8а)-(10а) отношений  $k_{\text{АРУ}}/k_{0,\text{АРУ}}$ ,  $k_{\text{АРУ}}/k_{\text{н,АРУ}}$ ,  $k_{0,\text{АРУ}}/k_{\text{н,АРУ}}$  с учетом (14) имеем (при  $\varepsilon = 0$ )

$$\frac{k_{АРУ}}{k_{0,АРУ}} = \left\{ |\dot{\lambda}(\Delta_l)|^2 + \frac{N_0}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\Phi}^*(\Omega) \dot{\lambda}(0, \Omega) d\Omega \right\}^{-1} [\alpha_0^2 |\dot{\lambda}(\Delta_l)|^2 + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) |\dot{\lambda}(\Delta_l, \Omega)|^2 d\Omega + \frac{N_0}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\Phi}^*(\Omega) \dot{\lambda}(0, \Omega) d\Omega]; \quad (20)$$

$$\frac{k_{АРУ}}{k_{н,АРУ}} = |\dot{\lambda}(\Delta_l)|^{-2} [\alpha_0^2 |\dot{\lambda}(\Delta_l)|^2 + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) |\dot{\lambda}(\Delta_l, \Omega)|^2 d\Omega + \frac{N_0}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\Phi}^*(\Omega) \dot{\lambda}(0, \Omega) d\Omega];$$

$$\frac{k_{0,АРУ}}{k_{н,АРУ}} = |\dot{\lambda}(\Delta_l)|^{-2} \left[ |\dot{\lambda}(\Delta_l)|^2 + \frac{N_0}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\Phi}^*(\Omega) \dot{\lambda}(0, \Omega) d\Omega \right].$$

Из выражения (19) легко видеть, что наличии МП приводит к уменьшению крутизны дискриминационной характеристики и в пределе, при очень широкополосных МП, когда  $\Delta\Omega_M \rightarrow [G_V(0) \rightarrow 0]$ , отношение  $(k_d/k_{д,0})$  стремится к  $\alpha_0^2$ , то есть уменьшается в  $1/\alpha_0^2$  раз. С учетом нормирующего действия АРУ отношение  $(k_d/k_{д,0}) (k_{0,АРУ}/k_{АРУ})$  по мере увеличения ширины спектра функции помеховой модуляции в пределе при  $\Delta\Omega_M \rightarrow \infty$  достигает величины

$$\alpha_0^2 \left[ |\dot{\lambda}(\Delta_l)|^2 + \zeta \frac{N_0}{E} \right] \left[ \alpha_0^2 |\dot{\lambda}(\Delta_l)|^2 + \zeta \frac{N_0}{E} \right]^{-1},$$

где  $\zeta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\Phi}^*(\Omega) \dot{\lambda}(0, \Omega) d\Omega$  – постоянный коэффициент, определяемый характеристиками линейных цепей дискриминатора.

Последнее выражение отражает зависимость изменения крутизны дискриминационной характеристики под влиянием МП от уровня аддитивного шума. Оно показывает, что влияние МП на крутизну дискриминационной характеристики больше при высоком уровне аддитивного шума. Однако, как будет видно из нижеследующего, влияние МП на спектральную плотность выходного сигнала дискриминатора и дисперсию ошибок измерения тем больше, чем ниже уровень аддитивных шумов. Это связано с тем, что уменьшение крутизны дискриминационной характеристики, как следует, например, из (5), приводит к уменьшению эффективной ширины частотной характеристики измерителя, то есть к уменьшению дисперсии флюктуационных ошибок измерения.

При низком уровне аддитивного шума указанное уменьшение будет меньше, следовательно, увеличение спектральной плотности выходного сигнала дискриминатора за счет действия МП будет в большей степени влиять на ошибки измерения, чем уменьшение крутизны дискриминационной характеристики.

**б. Крутизна дискриминационной характеристики при входном сигнале в виде последовательности некогерентных импульсов.** Пусть принимаемый сигнал представляет последовательность некогерентных импульсов, последовательность импульсов со случайными начальными фазами  $\varphi_{0,k}$ , а отношение периода повторения импульсов  $T_{п}$  к длительности одного импульса  $T$  (скважность) много больше единицы, что в практике использования некогерентных импульсных последовательностей всегда выполняется.

Если  $U_1(t) \exp\{j\varphi_0\}$  – комплексная огибающая одного импульса последовательности, то комплексная огибающая всей принимаемой последовательности описывается выражением

$$\dot{U}(t) = \sum_k \dot{U}_1(t - kT_{п}) \exp\{j\varphi_{0,k}\}. \quad (20a)$$

Для нахождения среднего значения выходного сигнала дискриминатора

необходимо подставить в (11), (12) принимаемый сигнал в виде (20а). Представляя далее смешанный момент  $\overline{\dot{M}(t_1)M^*(t_2)}$  и импульсную переходную функцию фильтров в виде их преобразования Фурье и учитывая соотношение [2]

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\{jkT_{\Pi}(\omega_1 - \omega_2)\} = \frac{1}{T_{\Pi}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(\frac{2\pi k}{T_{\Pi}} - \omega_1 + \omega_2\right), \quad (21)$$

после достаточно громоздких преобразований получим следующее выражение для среднего значения выходного сигнала дискриминатора:

$$\begin{aligned} \overline{\chi(\varepsilon, \tau)} &= \frac{1}{T_{\Pi}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp\left\{j\tau \frac{2\pi m}{T_{\Pi}}\right\} \times \times \frac{E}{8\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} G_M(\Omega) \dot{g}_{\Phi}\left(\omega + \frac{2\pi m}{T_{\Pi}}\right) g_{\Phi}^*(\omega) \times \\ &\times [\rho_1^*\left(\varepsilon - \Delta_l, \Omega + \omega + \frac{2\pi m}{T_{\Pi}}\right) \dot{\rho}_1(\varepsilon - \Delta_l, \Omega + \omega) - \\ &- \rho_1^*\left(\varepsilon + \Delta_l, \Omega + \omega + \frac{2\pi m}{T_{\Pi}}\right) \dot{\rho}_1(\varepsilon + \Delta_l, \Omega + \omega)] d\Omega d\omega, \quad (22) \end{aligned}$$

где  $\dot{\rho}_1(\varepsilon - \Delta_l, \Omega + \omega) = \frac{1}{2} \int_0^{T_{\Pi}} \dot{U}_0(t, \varepsilon - \Delta_l) U_0^*(t) \exp\{j\Omega t\} dt$  – функция автокорреляции одного периода сигнала, которая в рассматриваемом нами случае, когда длительность сигнала много меньше периода повторения  $T_{\Pi}$  совпадает с функцией автокорреляции одиночного сигнала  $\dot{\rho}_1(\varepsilon - \Delta_l, \Omega)$ ;  $G_M(\Omega)$  – энергетический спектр функции помеховой модуляции.

В соответствии с (22) среднее значение выходного сигнала дискриминатора в стационарном режиме зависит от времени  $\tau$ . Эта зависимость обусловлена тем, что принимаемый сигнал представляет собой некогерентную последовательность импульсов большой скважности с периодом повторения  $T_{\Pi}$ , а постоянная времени линейных цепей дискриминатора равна длительности одиночного импульса последовательности. Поскольку постоянная времени сглаживающих цепей на выходе дискриминатора много больше  $T_{\Pi}$ , целесообразно рассматривать усредненные по времени на интервале  $T_{\Pi}$  характеристики сигнала на выходе дискриминатора.

Учитывая, что

$$\frac{1}{T_{\Pi}} \int_{-T_{\Pi}/2}^{T_{\Pi}/2} \exp\left\{j \frac{2\pi m}{T_{\Pi}} \tau\right\} d\tau = \frac{\sin \pi m}{\pi m} = \delta_m,$$

где  $\delta_m = 1$  при  $m = 0$ ,  $\delta_m = 0$  при  $m \neq 0$ , и представляя энергетический спектр функции помеховой модуляции в виде  $G_M(\Omega) = \alpha_0^2 \delta(\Omega) + G_V(\Omega)$ , из (22) получим следующее выражение для усредненного по ансамблю и времени выходного сигнала дискриминатора:

$$\begin{aligned} \langle \overline{\chi(\varepsilon, \tau)} \rangle &= \frac{\alpha_0^2 E}{4\pi T_{\Pi}} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}(\Omega) [|\dot{\rho}_1(\varepsilon - \Delta_l, \Omega)|^2 - \\ &- |\dot{\rho}_1(\varepsilon + \Delta_l, \Omega)|^2] d\Omega + \frac{E}{4\pi T_{\Pi}} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}(\Omega) \times \\ &\times [|\sigma_{s,1}^2(\varepsilon - \Delta_l, \Omega)|^2 - |\sigma_{s,1}^2(\varepsilon + \Delta_l, \Omega)|^2] d\Omega, \quad (23) \end{aligned}$$

где

$$G_{\Phi}(\Omega) = |\dot{g}_{\Phi}(\Omega)|^2;$$

$$\sigma_{s,1}^2(\varepsilon - \Delta_l, \Omega) = 2\sigma_s^2(\varepsilon - \Delta_l, \Omega) = \frac{2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) |\dot{\rho}_1(\varepsilon - \Delta_l, \omega + \Omega)|^2 d\Omega;$$

$\sigma_s^2(\varepsilon - \Delta_l, \omega)$  – дисперсия помеховой составляющей сигнала, искаженно-го МП, на выходе фильтра, согласованного с принимаемым сигналом.

Анализ выражения (23) показывает, что для сигнала в виде систематиче-

ской ошибки измерения, обусловленной МП, имеют вид

$$\begin{aligned} |\dot{\rho}_1(-\Delta_l, \Omega)|^2 &= |\dot{\rho}_1(\Delta_l, -\Omega)|^2; G_V(\Omega) = G_V(-\Omega); \\ G_\Phi(\Omega) &= G_\Phi(-\Omega), \end{aligned} \quad (24)$$

то есть фактически совпадают с соответствующими условиями для когерентного сигнала.

При отсутствии систематической ошибки измерения, при выполнении условий (24), имеем

$$\frac{k_d}{k_{d,0}} = \alpha_0^2 + \frac{\int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) \frac{d}{d\varepsilon} [\sigma_{s,1}^2(\varepsilon - \Delta_l, \Omega)]_{\varepsilon=0} d\Omega}{\int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) \frac{d}{d\varepsilon} [\dot{\rho}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega)]_{\varepsilon=0}^2 d\Omega}. \quad (25)$$

После преобразований, аналогичных проведенным выше, при вычислении функции  $\chi(\varepsilon, \tau)$ , в случае отсутствия систематической ошибки измерения для коэффициентов, учитывающих влияние АРУ, получим (при  $\varepsilon = 0$ )

$$\begin{aligned} \frac{k_{АРУ}}{k_{0,АРУ}} &= \left[ \frac{E}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) |\dot{\rho}_1(\Delta_l, \Omega)|^2 d\Omega + \frac{N_0}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) d\Omega \right]^{-1} \times \\ &\times \left[ \frac{\alpha_0^2 E}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) |\dot{\rho}_1(\Delta_l, \Omega)|^2 d\Omega + \frac{E}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) \sigma_{s,1}^2(\Delta_l, \Omega) d\Omega + \right. \\ &\left. + \frac{N_0}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) d\Omega \right], \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{k_{АРУ}}{k_{н.АРУ}} &= \left[ \frac{E}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) |\dot{\rho}_1(\Delta_l, \Omega)|^2 d\Omega \right]^{-1} \times \\ &\times \left[ \frac{\alpha_0^2 E}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) |\dot{\rho}_1(\Delta_l, \Omega)|^2 d\Omega + \right. \\ &\left. + \frac{E}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) \sigma_{s,1}^2(\Delta_l, \Omega) d\Omega + \frac{N_0}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) d\Omega \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{k_{0,АРУ}}{k_{н.АРУ}} &= \left[ \frac{E}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) |\dot{\rho}_1(\Delta_l, \Omega)|^2 d\Omega \right]^{-1} \times \\ &\times \left[ \frac{E}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) |\dot{\rho}_1(\Delta_l, \Omega)|^2 d\Omega + \frac{N_0}{2\pi T_\Pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\Omega) d\Omega \right]. \end{aligned}$$

Анализ выражений (25), (26) показывает, что для сигналов в виде некогерентной последовательности импульсов справедливы те же выводы относительно влияния АП и МП на крутизну дискриминационной характеристики, которые приведены в п. 1а для когерентных сигналов.

Таким образом, вид принимаемого сигнала не изменяет физической сущности влияния АП и МП на крутизну дискриминационной характеристики.

**Выводы.** Рассмотрена и проанализирована точность измерения информационного параметра сигнала следящим измерителем на фоне аддитивных и мультипликативных помех.

Проанализировано влияние мультипликативных и аддитивных помех на крутизну дискриминационной характеристики при когерентном входном сигнале. Получена зависимость изменения крутизны дискриминационной характеристики под влиянием мультипликативных помех от уровня аддитивного шума. Показано, что, влияние мультипликативных помех на спектральную плотность выходного сигнала дискриминатора и дисперсию ошибок измерения тем больше, чем ниже уровень аддитивных шумов. При низком уровне аддитивного шума, увеличение спектральной плотности выходного сигнала дискриминатора за счет действия мультипликативных помех будет в большей степени влиять на ошибки

измерения, чем уменьшение крутизны дискриминационной характеристики следящего измерителя.

*Литература*

1. Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. и др. Вопросы статистической теории радиолокации. Под ред. Г.П. Тартаковского. Т.1 и 2 // М.: Советское радио. 1963 и 1964.
2. Фалькович С.Е. Прием радиолокационных сигналов на фоне флюктуационных помех // М.: Советское радио. 1961.

УДК 629.764

**Концептуальные основы обеспечения высокой эффективности испытаний элементов перспективных изделий ракетно-космической техники на основе интеллектуализации технологий, измерительных, аппаратно-программных и технических средств наземных испытательных комплексов**

**Г.Г. Вокин**, доктор технических наук, профессор,  
**А.М. Гуменюк**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
базовая кафедра «Управление и информационные технологии  
в космических системах»,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,  
НИИ КС имени А.А.Максимова – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»,  
г. Королев, Московская область

*Изложены методические подходы, научно-технические предложения, результаты проработок, нацеленные на повышение показателей эффективности испытаний перспективных изделий ракетно-космической техники (РКТ) на основе использования элементов интеллектуализации информационно-измерительных технологий, аппаратно-технических и обеспечивающих средств наземных испытательных комплексов.*

Изделия РКТ; испытания; тезаурусы; интеллекторы; эффективность испытаний; опытно-теоретические оценки характеристик, параметров и свойств изделий; наземные испытательные комплексы РКТ; ожидаемый эффект.

**Conceptual foundations for ensuring high-efficiency testing of elements of advanced rocket and space technology products based on the intellectualization of technologies, measuring, hardware, software and technical means of ground-based test complexes**

**G.G. Vokin**, doctor of Technical Sciences, Professor,  
**A.M. Gumenyuk**, candidate of engineering sciences, senior researcher  
Basic Department «Management and Information Technologies in Space Systems»,  
A.A. Maksimov Research Institute of Computing Systems – a branch of the  
State Research and Production Center named after M.V. Khrunichev,  
Korolev, Moscow region,  
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*Presents methodological approaches, scientific and technical proposals, and the results of research aimed at improving the performance of tests of advanced rocket and space technology (RKT) products based on the use of elements of intellectualization of information and measurement technologies, hardware, and support facilities of ground-based test complexes.*

Products of rocket and space technology; tests; thesauri; integrators; test efficiency; experimental and theoretical assessments of the characteristics, parameters and properties of products; ground-based test complexes, the expected effect.

### **Введение**

Испытания изделий РКТ являются одним из важных этапов их жизненного цикла, а в силу их большой важности, требуемой большой надёжности и безотказности, тяжёлых условий функционирования, большой ответственности решаемых боевых, научных или социально-экономических задач требуют масштабных материально-финансовых затрат и серьёзного научно-технического обоснования для объективной опытно-теоретической оценки характеристик, параметров и свойств испытываемых изделий [1, С.304]. Календарно испытания изделий начинаются в земных условиях, а заканчиваются в условиях полёта в атмосфере, в безвоздушном пространстве или в условиях открытого космоса.

Не ранжируя по объёму, видам и времени испытаний, можно выделить среди них такие часто используемые испытания, как: лабораторные, стендовые, конструкторские, внутризаводские, ведомственные, межведомственные, наземные, лётные, приёмо-сдаточные, утяжелённые, государственные и другие наименования испытаний [2, С.11].

К настоящему времени, начиная с середины прошлого века, разработано большое число методик испытаний, закреплённых в нормах и стандартах разного уровня, в том числе и в государственных стандартах, тем не менее, потребность в совершенствовании технологий испытаний является актуальной в связи с использованием при создании перспективных изделий РКТ новых научно-технических решений, новых материалов, а также в связи с появлением нетрадиционных функций, с необходимостью обеспечения функционирования в тяжёлых условиях космической среды, в том числе и длительное время [3, С.13].

Кроме того, остро стоит вопрос о сокращении материально-финансовых и временных затрат на испытания, а также уменьшения количества занятого на испытаниях технического персонала при безусловном обеспечении надёжного определения с требуемой точностью оценок характеристик, параметров и свойств изделий [4, С.103].

Как показывает анализ, для выполнения упомянутых требований технологии испытаний зачастую из простых становятся достаточно сложными и, что главное, наукоёмкими. Это означает, что ситуация изменяется. Появляется настоятельная потребность в поиске новых подходов, научно-технических решений и новых технологических инструментов, основанных на новых информационно-измерительных технологиях, новых возможностях программно-аппаратных и проблемно-ориентированных программных продуктов, а также на создании усо-

вершенствованных обеспечивающих средств испытательных технических комплексов [5, С.56;6, С.72;7, С.20].

Повышение требований к результативности и показателям эффективности испытаний – это не локальные и не ситуативные явления и случаи, а это тенденция-тренд. В связи с этим возникает актуальная задача по теоретическому обобщению накопленного к настоящему времени опыта и поиску научно-технических подходов и разработке предложений по повышению эффективности испытаний базовых элементов перспективных изделий РКТ, тем более что по имеющимся данным проработки по упомянутым вопросам в соответствующих литературных источниках пока малочисленны.

**Направления, способы, методические и технические инструменты повышения эффективности испытаний изделий РКТ на основе использования научно-технических возможностей интеллектуализации технологических процессов и средств наземных испытательных комплексов**

Отправной точкой определения направлений совершенствования процессов испытаний является формирование понятия эффективности Э испытаний [8, С.19]. Под этим понятием в статье понимается совокупность таких практически значимых и численно выражаемых взаимосвязанных показателей эффективности испытательных комплексов ( $E_i, i=1,2,\dots,n$ ), как степень повышения точности оценок характеристик, параметров и свойств испытываемых элементов; уровень снижения продолжительности полномасштабных испытаний заданного вида при использовании в экспериментах натуральных изделий; уровни сокращения финансовых, материально-технических затрат и снижения количества обслуживающего персонала; увеличение числа контролируемых параметров изделий, повышение времени полноценного функционирования и точности определения надёжности изделия в заданных условиях работы, а также степень качественного и количественного повышения уровня автоматизации, информатизации и сервиса процессов испытаний на технической базе испытательных комплексов.

Сформированное понятие может характеризовать не только процессы испытаний, но и проводить сравнительные оценки следующих важнейших видов испытаний: функционирования двигательных установок; конструкции элементов изделий на прочность, на стойкость к тепловым нагрузкам, механическим перегрузкам и к вибрации; на стойкость к воздействиям агрессивных химических веществ и радиации; на герметичность и долговечность функционирования и т.д. [9, С.24;10, С.172].

Очевидно, что высокий уровень составляющих эффективности способен обеспечить высокую результативность R испытаний, что означает получение в результате проведения испытаний высококачественных и полномасштабных данных о характеристиках, параметрах и свойствах испытываемых изделий в запланированном требуемом объёме и с высокой степенью надёжности.

Как показывает анализ ретроспективного и современного опыта испытаний, основным путём повышения результативности испытаний является интеллектуализация всех технологических процессов и используемых технических средств, которые составляют контент работы испытательных комплексов. Именно на этом пути совершенствования технологий и средств испытаний в ряде слу-



чаев достигнут такой уровень наземной отработки изделий, что новые ракеты нередко запускаются с первого раза без аварий. В то время как на начальных этапах развития ракетно-космической техники успешные пуски начинались после нескольких аварийных, а перед принятием на вооружение ракет производился опытный их отстрел в количестве первых десятков штук. На первых этапах развития ракетно-космической техники с такими случаями вынуждены были мириться в силу отсутствия соответствующих научно-технических средств, но в настоящее время, когда имеется большой арсенал научно-технических возможностей, такие ситуации принципиально непозволительны.

Надо сказать, что понятие интеллектуализации базируется на использовании и интеграции научно-технических достижений, результатов и методов, нацеленных на построение достаточно точных математических моделей проектируемых изделий и расчётных методик по оценке их параметров и характеристик при широком использовании в процессе испытаний информационно-измерительных технологий, вычислительной техники, проблемно-ориентированных программных продуктов и средств автоматизации. Это означает, что в земных условиях при моделировании процессов испытываемых изделий должны быть проведены всевозможные режимы их работы и заблаговременно оценены их характеристики, параметры и свойства, тогда для дорогостоящих лётно-технических испытаний останется относительно немного невыясненных проблемных вопросов. Это обстоятельство, как будет показано в последующем изложении, очень сильно сказывается на улучшении составляющих элементов эффективности.

В связи с изложенным в итоге поисков и экспертных оценок основным направлением совершенствования процессов испытаний наиболее целесообразными следует считать теоретическое обобщение, разработку и внедрение научно-обоснованных проектно-конструкторских решений и научно-методических продуктов, в основу создания которых должно быть положено синергетически эффективное использование методических и технических средств интеллектуализации и автоматизации технологических процедур проведения наземных испытаний изделий РКТ.

Как представлено в итоге поискового анализа, основными средствами или инструментами повышения составляющих эффективности являются интеллекторы, представляющие собой новые, модернизированные или известные вновь вводимые научно-технические решения, адаптированный методический аппарат, новую технологическую логику испытаний, которые внедряются в технологическую цепочку испытаний на технической базе испытательных комплексов. При этом для каждого вида испытаний, упомянутых выше, может быть сформулирован свой специфический тезаурус интеллекторов.

Оставаясь на принятом уровне общности изложения, можно выделить ряд типов тезаурусов интеллекторов, в основу классификации которых положены назначения, функциональные возможности интеллекторов, а также принадлежность к той или иной составной части технического испытательного комплекса. В итоге экспертного анализа выделены следующие типы тезаурусов:

- методико-информационно-технологические (методики испытаний, про-

блемно-ориентированные программные продукты, математические модели; способы опытно-теоретических оценок характеристик, параметров и свойств изделий; базы данных и базы знаний, экспертные системы, цифровые двойники испытываемых элементов, элементы искусственного интеллекта, документирование результатов испытаний, имитационные модели, операции с нечёткими множествами данных, цифровые 3D-макеты, справочная литература и т.п.);

- аппаратно-технические (датчики для измерения параметров испытываемых элементов со встроенными аналого-цифровыми преобразователями, вычислительные средства; системы мониторинга, визуализации и отображения процессов испытаний; системы сервиса испытаний, контрольно-техническая аппаратура, средства автоматизации процессов испытаний, программно-аппаратные интерфейсы между математическими и натурными моделями и т.п.);

- модельно-имитационные (математические модели, натуральные модели испытываемых элементов в уменьшенных масштабах, гибридные схемы испытаний – сочетание математических моделей, схемы-замещения элементов изделий более простыми моделями: ракета – твёрдое тело, топливные баки – оболочки пустые или частично заполненные жидкостью; средства, имитирующие воздействие внешней среды: механические нагрузки, линейные, изгибные и вибрационные; влияние химических элементов, радиации и разного рода излучений; влияние невесомости и вакуума и т.п.).

Следует заметить, что интеллекторы рассматриваются в статье как некоторые функциональные элементы, они могут работать на различных физических принципах, при этом рассмотрение конкретных их научно-технических решений выходит за рамки тематики статьи, поскольку в статье излагаются пока только концептуальные основы взаимоувязанной интеллектуализации всех основных составных частей наземных испытательных комплексов.

Оставаясь на принятом уровне общности изложения, отметим также, что приращение составных элементов  $\mathcal{E}_i$  эффективности испытаний происходит за счёт совершенствования упомянутых интеллекторов  $I_j$  или за счёт внедрения новых их вариантов. В формализованном виде имеет место соотношение

$$\text{Extremum } \mathcal{E}(\mathcal{E}_i) = F(I_j), \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$  – число составляющих элементов эффективности  $\mathcal{E}$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$  – число интеллекторов;  $F(I_j)$  – функция технологической логики данного вида испытаний.

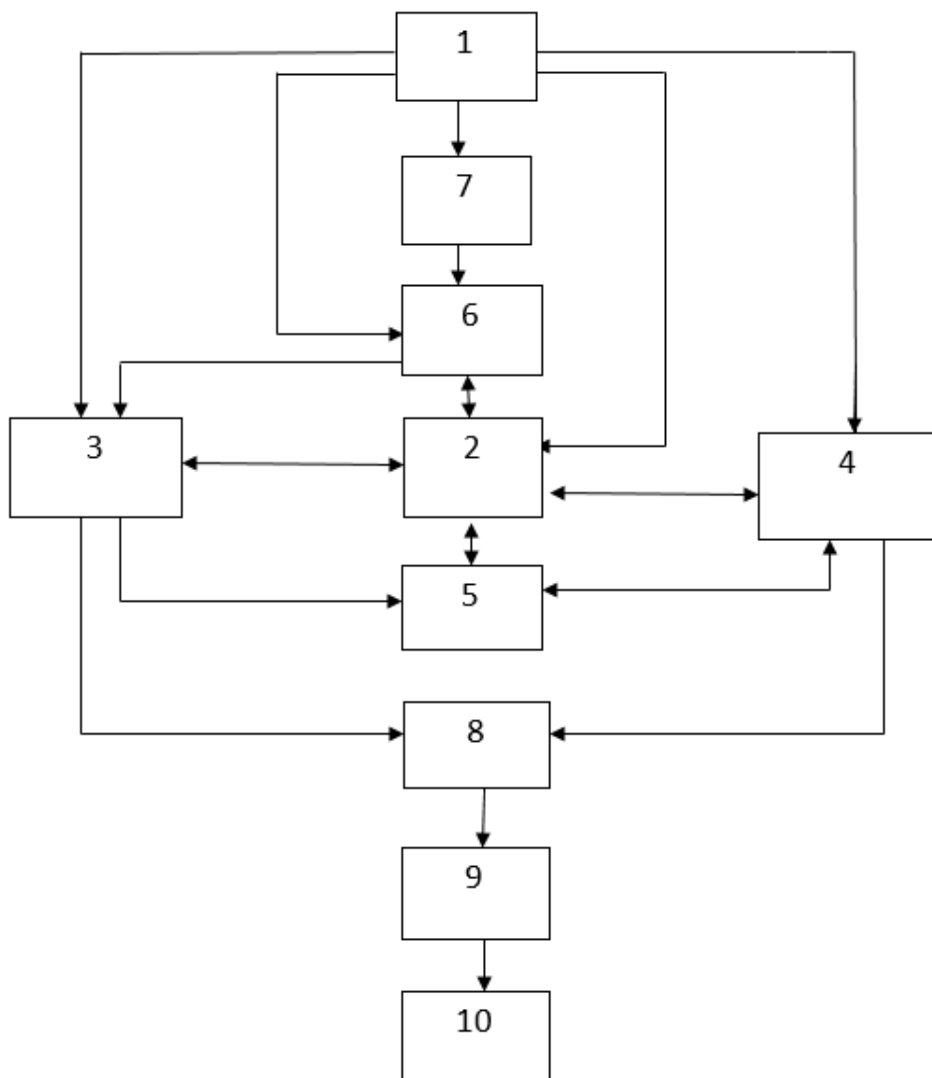
Из этих соображений логично можно сделать экспертное заключение о том, что максимальная результативность испытаний определённого вида имеет место, когда достигаются максимально возможные приращения  $\mathcal{E}_i$  элементов эффективности  $\mathcal{E}$ .

#### **Обобщённая структурно-функциональная схема интеллектуализированного испытательного комплекса**

Как показывает анализ, хотя испытательные комплексы различных видов испытаний в конструктивном отношении очень разнообразны, но в функциональном отношении они имеют много общего, что позволяет строить обобщён-

ную функциональную схему испытаний, которая базируется на использовании средств интеллектуализации, и при этом она отражает основные возможности испытательных технических комплексов всех типовых видов испытаний. Структура и основные функциональные звенья упомянутого комплекса приведены на рисунке 1.

Очевидно, что при рассмотрении процессов испытаний на концептуальном уровне не имеет смысла детализировать обобщённую структуру испытательного комплекса, потому что для реализации каждого из видов испытаний требуется использовать соответствующие специфические средства.



**Рисунок 1 – Обобщённая структурно-функциональная схема интеллектуализированного технического испытательного комплекса**

На рисунке 1 обозначены:

- 1 – система управления испытательного комплекса.
- 2 – тезаурус средств интеллектуализации и автоматизации,
- 3 – натурные элементы испытаний или их модели,
- 4 – математические модели элементов испытаний,
- 5 – интерфейсные средства обмена информацией,
- 6 – средства моделирования влияния внешней среды,
- 7 – технические средства обеспечения испытаний,
- 8 – опытно-теоретическая оценка характеристик, параметров и свойств испытательных элементов изделий,
- 9 – мониторинг и визуализация испытаний,
- 10 – протоколы и документирование испытаний.

Надо подчеркнуть, что на рисунке 1 представлен, образно говоря, костяк комплекса испытаний. При создании интеллектуализированного испытательного комплекса для проведения испытаний конкретного вида должен быть проявлен творческий подход и внесено много особенностей, направленных на повышение эффективности и результативности испытаний упомянутого вида.

**О методическом подходе к оценке приращений элементов эффективности за счёт интеллектуализации процессов испытаний и экспертная оценка ожидаемого суммарного синергетического эффекта при опытно-теоретической оценке характеристик, параметров и свойств перспективных изделий РКТ на технической базе интеллектуализированных испытательных комплексов**

Наиболее убедительными оценками эффективности и результативности, а также ожидаемого эффекта по определению являются такие оценки и заключения, которые базируются на натуральных экспериментальных испытаниях и которые выражаются количественно. Это условие становится обязательным, когда ожидаемый эффект от использования нововведения невелик и составляет, например, несколько процентов. В случае существенного значения ожидаемого эффекта допустимыми и приемлемыми становятся логически обоснованные оценки и заключения качественного и вербального характера. В нашем случае, когда изложение ведётся на концептуальном уровне и при этом ожидается получение существенного эффекта от использования предложенных мер и рекомендаций, то вполне правомерно и допустимо широко использовать экспертные оценки.

Из проведенного поискового анализа установлено, что в основу упомянутых оценок логично положить экспертно-исследовательские сценарии испытаний, построенные по методологии деловых игр с учётом имеющегося современного опыта. При проигрывании достаточного количества вариантов сценариев испытаний с учётом использования рассмотренных выше средств интеллектуализации накапливается значительное количество данных, необходимых для проведения оценок экспертного характера.

Вторым элементом излагаемого подхода является использование приёмов калькуляции в сочетании с использованием имеющегося практического опыта. При использовании изложенного подхода появляются вполне обоснованные ос-

нования для определения положительных приращений компонент эффективности испытаний и формирования заключения о существенном повышении результативности  $R$  испытаний.

Как свидетельствуют результаты анализа проведенных экспертно-исследовательских сценариев испытаний, при использовании средств интеллектуализации приращения элементов эффективности являются существенными и могут составлять многие десятки процентов и более; при этом мы не повторяем наименования элементов эффективности испытаний, которые имеют практическую направленность и выражаются в зависимости от содержания как количественно, так и качественно.

Особо надо подчеркнуть, что получение такого существенного эффекта от внедрения средств интеллектуализации вполне возможно обеспечить при использовании современных измерительных и программно-аппаратных средств, новых информационных технологий с элементами искусственного интеллекта, уточнённых математических моделей, а также при широком использовании средств и методов автоматизации технологических процессов испытаний.

По экспертным оценкам отработка проектируемых изделий РКТ при использовании интеллектуализированных испытательных комплексов приводит к сокращению как временных затрат, так и материально-финансовых затрат при повышении результативности испытаний.

### **Заключение**

Анализ проведённых концептуальных проработок свидетельствует о большом ожидаемом положительном эффекте от использования при проведении испытаний особенно ответственных элементов изделий РКТ средств интеллектуализации.

Эффект от использования интеллектуализации достигается в основном за счёт учёта при испытаниях большого прошлого интеллектуального опыта при построении уточнённых математических моделей испытываемых элементов и расчётных методик, а также за счёт использования вновь разработанных интеллекторов.

Повышенная надёжность достигается за счёт того, что при моделировании выявляются различного рода перегрузки, действующие на элементы, катастрофическое влияние которых устраняется путём соответствующего изменения конструкции, после чего элементы становятся работоспособными в ожидаемых условиях функционирования по определению.

Интеллектуализированные наземные испытательные комплексы позволяют резко сократить объёмы дорогостоящих лётно-технических испытаний при обеспечении существенного улучшения других составляющих элементов эффективности испытаний, имеющих большое практическое значение. Как показывает научно-технический анализ, при внедрении процедур интеллектуализации не ожидается проблемных трудностей, потому что имеется достаточно объёмный арсенал необходимых научно-технических средств для создания интеллекторов.

И, наконец, следует отметить, что все приёмы и средства интеллектуализации могут быть применены и на этапе лётно-технических испытаний, когда наряду с надёжностью определяются такие важнейшие лётно-технические характеристики, как дальность и точность боевых ракет и вес выводимого на заданную орбиту полезного груза ракетами космического назначения.

*Литература*

1. Азаренко Л.Г., Вокин Г.Г., Лашманов К.В. Концептуальная основа исследовательского синтеза высоко-эффективных систем обнаружения и определения координат в районах падения элементов, отделяемых от ракет стратегического и космического назначения на траекториях их полета в ходе испытаний и штатной эксплуатации / В книге: XLIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства. Сборник тезисов. 2019. С. 304-305.
2. Вокин Г.Г. О концепции исследовательского синтеза высоко-эффективных систем обнаружения и определения координат в районах падения элементов, отделяемых от ракет стратегического и космического назначения на траекториях их полета в ходе испытаний и штатной эксплуатации // Информационно-технологический вестник. 2018. № 3 (17). С. 10-21.
3. Вокин Г.Г. Об ограниченных возможностях космических технологий при реализации перспективных научно-технических и гуманитарных проектов космической деятельности // Социально-гуманитарные технологии. 2018. № 2 (6). С. 11-18.
4. Азаренко Л.Г. Метод синергетической оптимизации технологических и экономических процессов создания изделий ракетно-космической техники / В сборнике: Проблемы и перспективы экономического развития высокотехнологичных отраслей промышленности. Управление, ресурсное обеспечение и кооперация в условиях новых вызовов. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2015. С. 100-110.
5. Аббасова Т.С., Комраков А.А. Восстановление и проверка корректности телеметрических данных // Информационно-технологический вестник. № 2(04). 2015. С. 55-64.
6. Комраков А.А. Унификация программного обеспечения для декомпозиции телеметрических данных // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 5-3. С. 71-74.
7. Артюшенко В.М., Васильев Н.А., Аббасова Т.С. Комплекс полунатурного моделирования систем автоматического управления летательных аппаратов и ракетно-космической техники // Современные образовательные технологии, используемые в очном, заочном и дополнительном образовании / Сборник. Королев МО: Изд-во «Канцлер», Финансово-технологическая академия, ФТА, 2014. С. 17-22 (426 с.).

8. Vibrant Go hale, Gosh S.K., Armband Gupta. Classification of Attacks on Wireless Mobile Ad Hoc Networks and Vehicular Ad Hoc Networks. 196-217 p. Security of Self-Organizing Networks. MANET, WSN, WMN, VANET. CRC Press, 2011. 595 p.
9. Артюшенко В.М., Бекетов В.А., Кузьмин С.В., Майданов А.Ю., Мороз А.П., Привалов В.И. Сбор и обработка виброакустических процессов на борту ракетно-космической техники // Приволжский научный вестник. 2014. № 4 (32). С. 23-28.
10. Аббасова Т.С., Погосян А.Т. Анализ структуры наземного комплекса управления космическими летательными аппаратами // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2016): сб. статей VI международной заочной научно-технической конференции. Ч.1 / Поволжский гос. ун-т сервиса. Тольятти: Изд-во: ПВГУС, 24-25.03.2016. С. 19-22 (345 с.).

УДК 510.22

**Оценка состояния технических объектов в условиях неразличимости и наличии недетерминированности метрологических характеристик**

**А.А. Захаров**, кандидат технических наук, преподаватель,  
**В.А. Захаров**, научный сотрудник,  
Филиал военной академии РВСН им. Петра Великого,  
(ФВА РВСН им. Петра Великого), г. Серпухов

*В статье рассматривается проблема оценки прочности потенциально опасных систем техногенного характера в условиях недетерминированности метрологических характеристик и неразличимости информативных параметров такого метода диагностирования, как акустическая эмиссия. Приводится пример учета неразличимости и получения достоверных исходных данных для определения технического состояния объектов.*

Недетерминированность и неразличимость, метрологические характеристики, акустическая эмиссия.

**Assessment of the state of technical objects in the conditions of indistinguishability and the presence of non-deterministic metrological characteristics**

**A.A. Zakharov**, candidate of technical sciences, teacher,  
**V.A. Zakharov**, Researcher,  
Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Peter the Great,  
(FVA Strategic Missile Forces named after Peter the Great), Serpukhov

*The article deals with the problem of assessing the strength of potentially dangerous man-made systems under conditions of non-deterministic metrological characteristics and indistinguishability of informative parameters of such a diagnostic method as acoustic emission. An example of accounting for indistinguishability and obtaining reliable source data for determining the technical condition of objects is given.*

Nondeterminism and indistinguishability, metrological characteristics, acoustic emission.

В настоящее время роль оценок техногенного и других видов риска становится все более важной по мере роста масштабов, структурной и функциональной сложности современных технических систем. Оценки риска крайне важны на этапе принятия решений о выборе управляющих воздействий, мер и средств обеспечения работоспособности и, особенно, безопасности. При этом проблема управления и обеспечения безопасности различных технических систем космической отрасли в значительной мере определяется такими ее направлениями, как



получение информации о техническом состоянии основных конструктивных элементов объектов, проведение их технического диагностирования, оценка и анализ состояния. Роль оценок технического состояния частей оборудования становится всё более важной по мере роста масштабов, структурной и функциональной сложности современных образцов. В то же время достаточная точность применяемых методов должна сочетаться с минимально возможными затратами и сроками проведения диагностических операций.

Определение предразрушающего состояния (техническое диагностирование) объектов производится с целью установления степени возможности их дальнейшего использования после окончания заданных сроков эксплуатации, монтажа, ремонта, доработок, повреждений или в случае, когда рабочие характеристики объекта количественно не оценивались.

В работе рассматривается определение предразрушающего состояния методом акустической эмиссии в условиях недетерминированности и неразличимости метрологических характеристик, в роли которых выступают значения регистрируемых параметров. Метод акустической эмиссии в настоящее время получил широкое распространение среди методов диагностирования. Суть его заключается в регистрации и анализе акустических волн в элементах исследуемых образцов, которые возникают в процессе пластической деформации и разрушении вследствие образования микротрещин [2, С. 42]. В ходе применения акустической эмиссии для неразрушающего контроля объектов одной из наиболее информативных метрологических характеристик, дающей полное представление об имеющемся дефекте, является число зарегистрированных импульсов акустической эмиссии  $S$ .

Характерной особенностью метода акустической эмиссии (АЭ), определяющей его возможности и область применения, является обнаружение и регистрация только развивающихся дефектов. Это значит, что независимо от размеров дефекта выявляются наиболее опасные дефекты, склонные к развитию или развивающиеся.

Кроме того, изделие может выйти из строя не только в результате роста несплошностей, но также из-за изменения формы, потери устойчивости и других причин. В этих случаях АЭ сигнализирует о развитии нежелательных процессов.

Метод АЭ обладает весьма высокой чувствительностью к растущим дефектам – позволяет выявить в рабочих условиях приращение трещины порядка долей миллиметра.

В процессе реализации метода акустической эмиссии регистрирующая аппаратура определяет количество импульсов, излучаемых единичными источниками за определенный период времени  $\tau$ . Следует отметить, что ограниченность разрешающей способности аппаратуры, затруднение в имеющихся обстоятельствах использования более дорогостоящего регистрирующего оборудования, наличие внешних воздействий на исследуемый образец приводит к ситуациям, обуславливающим невозможность определения точного количества импульсов акустической эмиссии [2, С. 45].

Одним из путей повышения точности исследуемых параметров, которые характеризуют техническое состояние объекта, как правило, является проведение

некоторой группы измерений [1, С. 63] на объекте, находящимся в повторяющихся условиях. При невозможности аппаратного решения данной проблемы, применения иного оборудования реализуется подход многократных измерений. Такой подход с точки зрения точного повторения начальных условий измерений идеальным считать нельзя. И связано это, прежде всего, с тем, что всегда присутствует множество различных воздействий на объект, полный набор которых сложно и даже невозможно учесть. Подобное отсутствие знания приводит к неопределённости поведения объекта в виде недетерминированности. Таким образом, в ходе статистического эксперимента имеет место регистрация различных значений какого-либо исследуемого параметра.

Статистическим экспериментом в этом случае считается процедура многократного проведения измерений с целью получения данных, максимально соответствующих фактическим. Кроме того, наряду с изменениями повторных измерений в группе имеет место неразличимость, связанная с системой регистрации (СР) и вносимая принципиальными техническими ограничениями СР на регистрацию реального значения измеряемого параметра, различными искажающими процессами, происходящими в момент регистрации и т.д.

С учётом постоянного роста масштабов, структурной и функциональной сложности современных систем космического направления, их высокой стоимости, использование недостоверных экспериментальных данных при оценивании состояния входящих в их состав технических объектов может привести к катастрофическим последствиям, что показывают события последнего времени. Применение традиционных методов обработки [1, С. 61] подобных данных предусматривает замену полученных неразличимых значений недостоверным оценкам и дальнейшую обработку методами теории вероятностей, множеств и т.д. Поэтому для дальнейшей обработки требуется дополнение новыми моделями и методами, основанными на возможностных оценках объективной первичной, но неразличимой информации.

В сложившихся условиях на этапе первичной обработки возникает проблема учёта невыявленности и обработки подобных данных [1, С. 62].

В общем случае невыявленность заключается в невозможности отличить одно истинное, фактическое значение  $u_\phi$  [1, С. 61] какой-либо характеристики среди ряда ложных:

$$u_1, u_2, u_\phi, \dots, u_j. \quad (1)$$

Принципиально важным является то обстоятельство, что существует два подхода к обработке указанных в (1) данных: традиционно используемая замена невыявленности недостоверностью, либо учёт неразличимости, представляющий собой альтернативное направление оценивания первичных данных. При подходе, основанном на недостоверности, осуществляется замена (2) группы значений, среди которых имеется одно фактическое, на какое-либо ложное значение или оценку  $\tilde{u}$  :

$$\{u_j\} \rightarrow \tilde{u}_j. \quad (2)$$

Этот подход получил широкое распространение на практике. В дальней-

шем эта ложная оценка, принятая за истинную, сохраняется на всех этапах обработки данных, что, в свою очередь, может повлечь нежелательные последствия. Если по причине несовершенства СР не удаётся установить фактическое значение регистрируют совокупность близких к нему по значению характеристик. Происходит замещение значений  $u$  (2). Наибольшую эффективность при аутентификации значений характеристики, как отмечалось, первый подход приобрел при определении совокупности оценок  $u$  путём неоднократного проведения измерений одной системой регистрации.

Рассмотрим подробно второй путь обработки подобных данных. Допустим, имеет место многократная регистрация значений характеристики (выступающих в её роли параметров сигнала), поступающей в СР [2, С. 42]. Как отмечалось, вместо фактических значений из-за неразличимости системой регистрируются группы неразличимых исходов (ГНИ)  $E'_j$  их содержащие.

$$\exists! u'' \in E, u'' \in \Omega, \forall u^n \in E \setminus \{u''\} \subset \Psi, \quad (3)$$

В (3) показано существование единственного истинного значения параметра  $u''$ , принадлежащего множеству истинных значений  $\Omega$  и множество  $\Psi$  ложных значений  $u^n$ .

По аналогии с исходом какого-либо события первым будем считать регистрацию значения измеряемого параметра.

Для установления причинно-следственной связи между неразличимостью исходов и возможностью событий следует принять во внимание то, что неразличимость исходов представляет физическую причину рассмотрения событий как возможных и необходимых. Согласно с общепринятой версией понятие возможного события  $C$  состоит в том, что оно возможно при появлении события  $E$ , если имеет с  $E$  общие элементы, то есть если  $E \cap C \neq \emptyset$ . Если применима операция включения  $E \subset C$ , то имеет место частный случай возможного события – необходимое событие. При этом  $E, C \subset \Omega, \Omega$  – общее множество исходов.

В рассматриваемой версии вместо  $E$  используется произвольная ГНИ. Применение такой замены позволяет осуществить переход к обработке регистрируемых неразличимых данных методами теории множеств, вероятностей и случайных множеств [3, С. 30], а нахождение результатов на стыке указанных теорий позволяет сделать вывод о новизне разрабатываемого аппарата. Так, если зарегистрировано несколько ГНИ, то одно и то же событие может оказаться возможным несколько раз, то есть возможным с определенной частотой. Это утверждение справедливо и в случае необходимого события. Полученные частоты одновременно представляют большую и меньшую из возможных частот осуществления произвольного события. Поэтому если при проведении исследований методами неразрушающего контроля происходит по различным объективным и неустранимым причинам регистрация неразличимых первичных данных, то сохранение для их для дальнейшей обработки без замены недостоверными оценками представляет перспективное и актуальное практическое приложение. Важным в этом случае является условие разработки аппарата, позволяющего определять

диапазоны фактических значений вероятностных характеристик. Ниже будут представлены полученные в данном направлении результаты.

Таким образом, имеется принципиальное отличие, которое вносит неразличимость в статистический эксперимент. При различимости его результатами, как известно, являются частоты исходов. Непосредственно по ним находят частоту появления любого события. В условиях неразличимости по частотам регистрации ГНИ (по имеющемуся в ГНИ свидетельству) можно найти лишь наименьшие диапазоны возможных частот появления любых событий, включая, конечно, исходы.

При простых требованиях к статистическому эксперименту в условиях неразличимости его результаты представляют наборы пар различных ГНИ и их частот (вероятностей). Такой эксперимент предопределяет применение аппарата теории случайных множеств при следующем уточнении. Случайное множество представляет функционал, аргументами которого являются некоторые подмножества (определенного универсального множества), а значениями – приписываемые им вероятности, сумма которых равна 1. Выполненная конкретизация состоит в использовании ГНИ в роли аргументов функционала, а в роли его значений – частот (вероятностей) их регистрации.

Таким образом, случайные множества предназначены для получения количественной информации, обладающей из-за неразличимости исходных данных вероятностным характером. При этом исходные данные в обязательном порядке являются недетерминированными.

Исключительно важно, что первичные вероятностные понятия обусловлены только неразличимостью и не имеют отношения к недетерминированности. К таким понятиям относится, во-первых, возможное событие (один из исходов имеет место быть) и необходимое событие, все исходы которого обязательно осуществились. При наличии наряду с неразличимостью ещё стохастичности становится осуществимым введение понятий вероятности возможного и вероятности необходимого события, большей, меньшей и произвольных возможных вероятностей осуществления события. И в этом случае идёт речь о большем и меньшем возможных значениях вероятностной меры.

Для дальнейшего рассмотрения будут использоваться пространство (множество) исходов из ГНИ –  $\Omega$ , множество  $\Psi$ , содержащее ошибочно подозреваемые в осуществлении исходы (фикции). Исходы при этом являются элементами в ГНИ, а объединением всех исходов – множество  $\Phi$ .

Как отмечалось, вместо фактических значений параметров сигнала из-за неразличимости системой регистрируются ГНИ их содержащие. Без сведения к недостоверности результаты при имеющей место статистической устойчивости представляются набором пар:

$$(E'_j, s_j), E'_j \subset \Phi = \Omega \cup \Psi, j = 1 \dots m, \quad (4)$$

где  $E'_j$  – ГНИ;  $s_j$  – ее частота, равная  $n_j / n$ ;  $n_j$  – кратность регистрации  $E'_j$ ;  $n$  – общее число сеансов регистрации. Причем  $\sum_{j=1}^m s_j = 1$ .

Следует отметить, что различные  $E'_j$  могут иметь общие исходы и (или) общие фикции, то есть пересекаться [2, С. 46]. Таким образом, в (3)

$$E'_k \cup E'_j = \Phi = \Omega \cup \Psi; \quad E'_k \cap E'_j \neq \emptyset \quad (5)$$

при некоторых  $j \neq k$ , где  $j, k = 1 \dots m$ .

При всех  $j$  с ростом числа  $n$  сеансов регистрации частное  $n_j/n$  приближается к вероятности  $p_j$ , которая соответствует регистрации ГНИ в (4).

Полученное случайное множество (3) является функционалом, заданным на подмножестве конечного множества  $\Pi$ . Рассмотрение функционала  $\Pi$  позволяет сделать вывод о его подобии функции, которая по сути является случайной величиной. Причём в зависимости от аргумента (зарегистрированной ГНИ) принимаемые этой функцией значения являются вероятностями, сумма которых равна 1. Таким образом, случайное множество представляется набором  $m$  пар

$$(E'_j, p_j), E' \subset \Pi, \quad \sum p_j = 1, j = 1 \dots m. \quad (6)$$

Другими словами, модель получения данных, обладающих стохастичностью и поступающих в систему управления, в условиях неразличимости носит характер случайного множества (6). Данная трактовка случайного множества имеет простой содержательный смысл: оно подобно случайной величине, является функционалом с ГНИ в роли аргументов и (удовлетворяющими требованию статистической устойчивости) частотами их регистрации в роли значений. Существенным при этом является отсутствие недостоверных оценок первичных данных.

Такое случайное множество представляет исчерпывающую модель совместного учета неразличимости и стохастичности. Следует подчеркнуть, что данная модель применима к учету неразличимости и стохастичности, когда приходится оперировать не с вероятностями, а с частотами. Таким образом, случайное множество с неразличимыми исходами, как математическая модель, имеет широкий класс интерпретаций на практике, когда имеет место совместное проявление неразличимости и недетерминированности не только в форме стохастичности, но и хаотичности.

Коренное отличие указанной модели от вероятностной состоит в том, что последняя применима лишь при наличии условий статистической устойчивости наряду с имеющей место недостоверностью, что предопределяет ограниченность ее применения и сохранения первичных ошибочных значений.

Для примера рассмотрим контроль элемента силовой конструкции оборудования, в результате которого за промежуток времени регистрировались в качестве метрологических характеристик не импульсы  $S$ , а некоторые группы неразличимых исходов. Каждая группа при этом регистрировалась  $r_i$  раз, общее число регистраций в примере будет составлять  $n = 100$ , а частота регистрации каждого исхода (либо непосредственно определенного количества импульсов, либо группы импульсов) определяется отношением  $r_i/n$ . В обобщённом виде это

представлено в таблице 1.

**Таблица 1 – Зарегистрированные импульсы в составе ГНИ**

ГНИ	{200}	{200,230}	{210,220, 240}	{210,240}	{220,250}	{230}	{240}
$r_i$	5	23	30	14	13	8	7
$r_i/n$	0,05	0,23	0,30	0,14	0,13	0,08	0,07

Указанные в таблице группы неразличимых исходов содержат реальное количество импульсов, но какое именно нельзя определить из-за неразличимости. В данных условиях возможно лишь фиксирование количества регистрируемых импульсов из некоторых групп. Однако достоверно можно утверждать, что истинное количество импульсов укладывается в какую-либо из этих ГНИ.

В свою очередь от знания точного количества импульсов зависит достоверность принимаемых решений о состоянии, надёжности объектов и соответствии их предъявляемым техническим требованиям. В силу неразличимости регистрируемых импульсов определение математического ожидания их количества становится проблематичным. Наиболее приемлемым представляется применение аппарата, который позволяет оценить границы этого математического ожидания (минимальное и максимальное значения), в которых находится истинное значение количества импульсов акустической эмиссии. Принятие решения в этом случае будет осуществляться на основе достоверных исходных данных.

Рассмотрим, как определяются минимальная граница математического ожидания. Обозначим через  $k$  количество импульсов, регистрируемых аппаратом. Согласно таблице 1 определим постоянную часть, т.е. какое количество и каких импульсов является обязательным (регистрировалось непосредственно именно это количество, не в составе ГНИ). В рассматриваемом примере эти значения составляют: для  $S = 200$  (200 импульсов) количество регистраций такого исхода  $k_{200} = 5$  раз, для  $S = 230$  значение  $k_{230} = 8$  и для  $S = 240$   $k_{240} = 7$ . Общее количество таких регистраций для  $m_{пост}$  случаев получается равно  $k_{пост} = 5 + 8 + 7 = 20$ . Следовательно, на оставшиеся случаи приходится  $n = 100 - 20 = 80$  регистраций. Постоянная часть при этом вычисляется по формуле:

$$N_{пост} = \sum_{i=1}^{m_{пост}} S_i \cdot k_i. \quad (7)$$

Для рассматриваемого примера постоянная часть  $N_{пост} = 200 \cdot 5 + 230 \cdot 8 + 240 \cdot 7 = 4520$ . Проведем корректировку всех возможных реализаций количества импульсов с учетом постоянной части. При этом количество регистраций каждого количества импульсов из состава ГНИ уменьшается на число одиночных регистраций (табл. 2).

Таблица 2 – Откорректированное количество импульсов АЭ

$S_i$	200	210	220	230	240	250
$k_i$	23 (28-5=23)	44	57	23 (31-8=23)	44 (51-7=44)	13

При расчете минимального математического ожидания полагается, что самые минимальные значения регистрируемой характеристики встретились максимальное количество раз. Для вычисления слагаемых общей формулы определения как минимальной, так и максимальной границ математического ожидания используется следующая формула

$$N_i = S_i \cdot k_i. \quad (8)$$

Расчет начинается с минимального значения. При этом общее количество последующих больших значений  $S$ , учитываемых в порядке возрастания, уменьшается на количество регистраций предыдущих. Для рассматриваемого примера:

1.  $N_1 = 200 \times 23 = 4600, k = 80 - 23 = 57;$

2.  $N_2 = 210 \times 44 = 9240, k = 57 - 44 = 13;$

3.  $N_3 = 220 \times 13 = 2860$ , так как, несмотря на то, что наибольшее

количество возможных случаев регистрации трех импульсов равно 57, количество оставшихся реализаций составляет только 13.

Количество слагаемых  $m_{min}$ , таким образом, для вычисления минимальной границы равно 3.

На заключительном этапе вычисления минимальной границы математического ожидания необходимо просуммировать постоянную часть со значениями, полученными в результате умножения количества импульсов на максимально возможное число их регистрации, и произвести деление полученной суммы на общее число регистраций всех ГНИ.

$$M_{min} = \frac{N_{const} + \sum_{i=1}^{m_{min}} N_i}{n}. \quad (9)$$

$$M_{min} = \frac{4520 + 4600 + 9240 + 2860}{100} = 212,2.$$

Порядок определения максимальной границы математического ожидания аналогичен. В первую очередь также учитывается постоянная часть, значение которой остается неизменным. Далее вычисляются поочередно в порядке убывания начиная с максимального значения произведения количества импульсов и максимально возможного числа их регистрации. При этом общее количество последующих меньших значений  $S$ , учитываемых в порядке убывания, уменьшает-

ся так же, как в описанном выше примере, на количество регистраций предыдущих:

$$1) N_6 = 250 \times 13 = 3250, k = 80 - 13 = 67;$$

$$2) N_5 = 240 \times 30 = 7200, k = 67 - 30 = 37;$$

$$3) N_4 = 230 \times 23 = 5290, k = 37 - 23 = 14;$$

4)  $N_3 = 220 \times 14 = 3080$ , больше реализаций нет. Количество слагаемых  $m_{max}$  равно 4.

Теперь так же, как и для минимального значения математического ожидания, необходимо вычислить сумму полученных произведений с учетом постоянной части и поделить полученное значение на общее число реализаций ГНИ:

$$M_{max} = \frac{N_{пост} + \sum_{i=1}^{m_{max}} N_i}{n}. \quad (10)$$

$$M_{max} = \frac{4520 + 3250 + 7200 + 5290 + 3080}{100} = 233,4. \quad (11)$$

В результате вычислений с учетом неразличимости получен достоверный интервал значений математического ожидания количества зарегистрированных импульсов, в котором находится его истинное значение

$$M_{min} \leq M \leq M_{max}, \quad (12)$$

то есть  $212,2 \leq M \leq 233,3$ . Полученные данные для исследуемого объекта являются допустимыми по значению результатов диагностирования методом акустической эмиссии. Эксплуатация объекта может быть продолжена, не требуется проведение дополнительных дорогостоящих оценок технического состояния, либо еще более затратной замены элементов оборудования.

Таким образом, в дальнейшем принятие решения о состоянии технического объекта по результатам обработанных неразличимых параметров будет осуществляться на основе хотя и недостаточно детализированных, но достоверных данных. Существенно, что полученный диапазон – самое большее, на что можно рассчитывать без устранения неразличимости регистрируемых аппаратурой значений. Универсальность используемого подхода позволяет применять полученные результаты к самому широкому спектру практических ситуаций регистрации неразличимых метрологических характеристик.

#### Литература

1. Захаров А.А., Демочкин В.С. Проблема обработки невыявленных данных при моделировании информационных систем. Материалы Всероссийской НТК РВ. Часть 2 / А.А. Захаров, В.С. Демочкин. Серпухов: ФВА РВ, 2015. С. 61-64.



2. Захаров А.А., Попов А.В. Теоретико-вероятностная модель числа актов акустической эмиссии. Взаимообусловленность распределения времени между актами акустической эмиссии и распределения их числа // Захаров А.А., Попов А.В. Материалы НТК. Ростов-на-Дону: РВИ РВ, 2009. С. 41-52.
3. Золотухин В.Ф., Рева В.Ю. Характеристика совместного влияния неразличимости и недетерминированности опасных факторов и угроз в терминах теорий возможностей, вероятностей и случайных множеств. Труды Международной научной школы МА БР. Санкт-Петербург, 2009. С. 28-38.

УДК 51-74

**Генератор форматов группового телеметрического сигнала  
для систем измерений с программно управляемым способом  
сбора данных**

**А.П. Мороз**, доктор технических наук, профессор МГОТУ,  
Академик Российской академии космонавтики,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

**Г.Е. Полехина**, кандидат педагогических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)», г. Москва,

**А.И. Полехин**, ведущий инженер,  
Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной  
техники» (АО «НПО ИТ»), г. Королев, Московская область

*Предложен и обоснован алгоритм работы генератора форматов (ГФ) кадра для систем программируемой телеметрии. Алгоритм относится к новому классу алгоритмов, использующих принцип текущей фазы, отличается уменьшенной сложностью вычислений и минимальным объемом программ измерений (ПИ), что упрощает задачу подготовки ПИ и уменьшает объем памяти для их хранения.*

Системы программируемой телеметрии, алгоритмы управления сбором данных, двоичный граф, двоично-степенная сетка частот.

**Generator of formats of group telemetry signal for measurement systems  
with a software-controlled method of data collection**

**A.P. Moroz**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Moscow State University of  
Technology and Technology, Academician of the Russian Academy of Cosmonautics,  
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

**G.E. Polekhina**, Ph.D., Associate Professor,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
(National Research University)», Moscow,

**A.I. Polekhin**, Leading Engineer, Scientific and Production Association of Measuring  
Techniques Joint Stock Company (NPO IT JSC), Korolev, Moscow Region

*An algorithm for the operation of a frame format (GF) generator for programmable telemetry systems is proposed and substantiated. The algorithm belongs to a new class of algorithms using the principle of the current phase, it is distinguished by a reduced computational complexity and a minimum volume of measurement programs (PI), which simplifies the task of preparing PI and reduces the amount of memory for their storage.*

Programmable telemetry systems, data acquisition control algorithms, binary graph, binary-power frequency grid.

Системы бортовых измерений (СБИ) с программно управляемым способом сбора данных составляют основу отечественного парка существующей и перспективной бортовой аппаратуры для телеизмерений параметров во время натуральных испытаний аэрокосмических летательных аппаратов (ЛА) [1, 2].

При традиционно используемом в таких системах способе представления функциональных параметров в виде рядов дискретных регулярных выборок (отсчетов), поступающих в режиме временного разделения по измерительным каналам от узлов и агрегатов объекта испытаний с частотами  $f_{v(n)}$ , заданными в программе измерений (ПИ), одной из основных проблем является группирование потоков выборок в единую временную последовательность, т. н. групповой телеметрический сигнал (ГТС) для передачи по последовательному каналу связи (КС) с частотой его информативности –  $I_s$ . Здесь  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N$  – номер параметра (канала);  $v(n) = 1, 2, 3, \dots, l$  – задаваемые в ПИ относительные частоты выборок;  $N, l > 0$ , целое число.

Простое суммирование цифровых потоков разночастотных регулярных выборок неизбежно приведет к временному наложению или потере отсчетов, и, как следствие, к нерегулярности следования отсчетов некоторых телеметрируемых параметров в ГТС. При проектировании рассматриваемых типов СБИ указанное противоречие обычно решается методом «от обратного». Для формирования последовательного суммарного равномерного потока дискретных отсчетов ГТС, для ввода в КС или последовательный интерфейс в подсистеме сбора данных (ПСД) СБИ на основании исходных данных программы измерений генерируется единый временной периодический ряд управляющих команд опроса – адресов измерительных каналов (циклограмма опроса) многоуровневых многоканальных цифровых коммутаторов с кодоуправляемым переключением каналов, который должен удовлетворять следующим условиям:

- суммарная частота следования адресов в ряду должна быть  $\leq I_s$ ;
- адрес каждого канала  $n$  должен следовать в составе ряда со своей индивидуальной частотой  $f_{v(n)}$ , заданной в ПИ и кратной информативности  $I_s$ ;
- временное наложение адресов в общем едином ряду не допустимо [2].

Очевидно, что в случае формирования такого командного ряда обратный поток отчетов ГТС также будет удовлетворять заданным условиям. Фактически

при этом речь идет о распределении имеющегося фиксированного ресурса информативности  $I_s$  между бортовыми источниками информации в соответствии с априорными данными об их информационной активности.

Практическая реализация управляющей периодической последовательности адресов источников информации подразумевает разработку процедуры (алгоритма) вычисления элементов ряда для каждой временной позиции ГТС –  $\Delta t_{(j)}$ . Длительность между соседними позициями опроса равна периоду следования импульсов ГТС –  $1/I_s$ . Вычисление осуществляется на основании исходных данных ПИ, в качестве которых выступают тем или иным способом заданные состав и частоты дискретизации измеряемых параметров, и выполняется либо программно, либо аппаратно с помощью функциональных блоков, которые называются генераторами форматов кадров (ГФ), либо блоками формирования кадра (БФК).

Методика и математические условия алгоритмов корректного размещения адресов для произвольно заданного набора периодов опросов  $[T_1, T_2, T_3, \dots, T_n]$  по позициям ГТС сформулированы и рассмотрены в [2]. Показано, что аналитическое решение этой задачи можно выполнить способом разложения натурального ряда чисел  $j = 0, 1, 2, 3, \dots$  (номеров позиций ГТС) на непересекающиеся классы вычетов по модулям  $T_n$ :

$$\Psi_{n(i)} \equiv \Psi_{n(i)} \pmod{T_n} = C_n + i T_n, \quad (1)$$

где ряды  $\Psi_{n(i)}$  являются классами вычетов  $\Psi_{n(i)}$  по модулям  $T_n$  [3] и представляют собой номера позиций ГТС, на которых располагается  $i$ -я по счету команда опроса  $n$ -го канала, а целая величина  $C_n$  – остаток класса ( $0 \leq C_n < T_n$ ), – номер позиции, на которой располагается первая команда опроса  $n$ -го канала, имеет смысл фазы функции  $\Psi_{n(i)}$ , т.е.  $C_n = \Psi_{n(0)}$ .

Алгоритм формирования последовательности адресов должен используя данные о составе и частотах (периодах  $T_n$ ) опроса каналов определить остатки классов вычетов (фазы)  $C_n$ , для которых выполняется критерий отсутствия наложения [2]:

$$\Psi_{k(j)} \neq \Psi_{n(i)} \begin{cases} k, n = 1, 2, \dots, N; \\ k \neq n; i, j = 1, 2, 3 \dots \end{cases} \quad (2)$$

В работе [2] предложена наглядная графо-аналитическая модель способа разложения натурального ряда чисел  $j = 0, 1, 2, 3, \dots$  на непересекающиеся классы вычетов по модулям  $T_n$ , для которых выполняется условие (2), и определения остатков этих классов  $C_n$ . Модель предусматривает совокупность правил (алгоритм) построения графа и распределения его узлов между каналами и соответствует общему случаю произвольного задания частот (периодов) в ПИ, при котором наборы периодов  $T_n$  должны удовлетворять трем необходимым условиям отсутствия наложения команд опроса в ГТС, сформулированным в [2].

При проектировании функциональных блоков ГФ или БФК и разработке алгоритмов их функционирования условия физической реализуемости диктуют необходимость выбора частот опроса параметров не произвольно, а из некоторого фиксированного ряда, называемого сеткой частот (периодов). Можно показать, что наиболее частая сетка допустимых периодов, имеющая наибольший

диапазон при наименьшей длине цикла телеметрирования, получается при использовании степенного ряда вида:  $Tv_{(n)} = a^{v_{(n)}} \rightarrow Fv_{(n)} = a^{-v_{(n)}}$ , где  $Tv_{(n)}$  и  $Fv_{(n)}$  – соответственно элемент сетки периодов (частот), назначенный  $n$ -му каналу ( $n = 1, 2, 3, \dots, N$ ),  $a$  – основание степени,  $v_{(n)} = 0, 1, 2, \dots, l$ , – код относительной частоты (периода),  $l > 0$  – целое – количество элементов (допустимых частот) сетки.

Учитывая, что ГФ является цифровым устройством, выполненным обычно на элементах двузначной логики, в качестве основания степени членов ряда сетки целесообразно принять  $a = 2$ . С учетом этого выбираем относительный способ задания частот в долях информативности  $I_s$  системы в виде показателя степени (кода частоты)  $v_{(n)} = 0, 1, 2, \dots, l$  по формуле:

$$f_{v_{(n)}} = I_s / Fv_{(n)} \rightarrow I_s / 2^{v_{(n)}}. \quad (3)$$

В этом случае граф общего вида [2] преобразуется в двоичный граф (рисунок 1), количество узлов в горизонтальных сечениях (ярусах) которого равно  $2^{v_{(n)}}$ , а вес каждого узла соответствует значению относительной частоты  $f_{v_{(n)}} = \frac{I_s}{2^{v_{(n)}}$ . Причем граф является отображением всех возможных фаз частот ряда  $f_{v_{(n)}}$  (в каждом ярусе имеется  $2^{v_{(n)}}$  свободных фаз, которые можно резервировать под каналы с частотами  $I_s / 2^{v_{(n)}}$ ).

На рисунке 1 показан пример графа при  $v_{(n)}, (l) \leq 3$ , т. е. в двоичной системе счисления это соответствует условию  $v_{(n)}, (l) \leq 011$ .

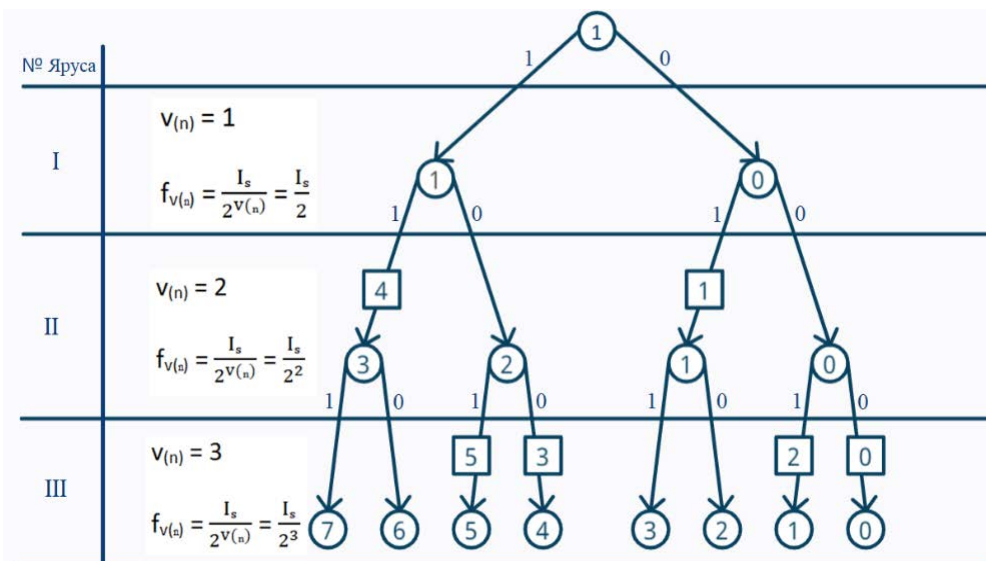


Рисунок 1 – Прадерево графа для программы из таблицы 1

Правила распределения конечных узлов (или путей – фаз  $C_n$ ), сформулированные в [2], обеспечивающие отсутствие наложений, отражающие процесс разложения натурального ряда чисел  $j = 0, 1, 2, 3, \dots$  (номеров позиций ГТС) на

непересекающиеся классы вычетов, и определения остатков  $C_n$ , трансформируются следующим образом:

4. нельзя одну фазу занимать под два или более измерительных канала;
5. нельзя занимать фазы, которые расщепляются от ранее занятой;
6. нельзя занимать фазу, расщеплением которой может быть получена ранее занятая.

Имеется ограниченное количество публикаций [4, 5], где приводятся граф-схемы алгоритмов формирования команд и описания функционирования ГФ для систем программируемой телеметрии, достаточно полные, чтобы провести сравнение их технической эффективности. Так, в работах [4, 5] описывается ГФ на основе блока памяти ПИ, в ячейки которой производится последовательная запись адресов параметров, опрашиваемых на протяжении интервала периодичности. Тогда при считывании очередной ячейки с частотой информативности  $I_s$  системы телеизмерений на выходе немедленно получаем адрес параметра, который должен опрашиваться на текущей позиции телеметрического кадра –  $\Delta t_{(j)} = 1/I_s$ , а заданные частоты опроса параметров  $f_{v(n)}$  (3) обеспечиваются соответствующим количеством повторений адресов каждого параметра на интервале периодичности –  $L$ . Таким образом, в блок памяти ПИ должен быть записан полный цикл телеметрирования – кадр СБИ –  $L$ , период которого по определению [4] соответствует периоду опроса самого низкочастотного параметра. При таком подходе необходимое количество ячеек памяти определяется отношением  $f_{v(n)} \max / f_{v(n)} \min$  в ПИ, которое в современной телеметрии ЛА достигает значения  $10^5$ . Учитывая, что интегральные микросхемы статических оперативных и flash запоминающих устройств (ОЗУ и ПЗУ) являются одними из самых дорогих электронных компонентов, а также необходимость использования нескольких ПИ во время испытаний, рассматриваемый подход нельзя признать оптимальным. Кроме того, прежде чем записывать последовательность адресов каналов в ячейки ОЗУ, ее нужно сформировать. Т.е. приходим все к той же вышеуказанной задаче распределения адресов каналов по позициям кадра на интервале периодичности  $L$ .

Уменьшения объема ОЗУ программ можно добиться путем перехода от прямой записи всей последовательности адресов в ячейки к вычислениям адреса для каждой позиции ГТС. Для практического решения этой задачи требуется показать наличие формальной процедуры (алгоритма) распределения фаз  $C_n$  между каналами по вышеуказанным правилам в соответствии с заданными в ПИ по формуле (3) частотами, причем это распределение необходимо выполнять для каждой позиции кадра  $\Delta t_{(j)}$ .

Можно показать, что состояния позиционного счетчика по основанию  $a$ , считающего последовательно позиции в кадре, начиная с нулевой, являются зеркальным отображением (относительно правого или левого края) всех возможных фаз допустимого набора периодов сетки  $[Tv_{(n)}]$ . Т.е. такой счетчик позиций одновременно будет счетчиком текущей фазы. Таким образом, теоретически задачу можно решить, распределяя по вышеуказанным правилам в течение  $\Delta t_{(j)}$  поочередно всем каналам фазы  $C_n$  с учетом назначенных частот, и сравнивая их с

текущей фазой счетчика позиций. Номер канала, фаза  $C_n$  которого совпадет с текущей, фиксируется в качестве команды опроса на  $j$ -й позиции.

При таком подходе ПИ представляет собой упорядоченный по номерам каналов список показателей степени (кодов частот)  $v_{(n)}$  (3), который определяет долю информативности  $I_s$ , выделенную каждому каналу. ПИ содержит лишь необходимый минимум данных и получается предельно простой, что не только уменьшает объем ОЗУ программ, но и значительно облегчает процесс подготовки ПИ. Пользователю достаточно составить таблицу со списком номеров каналов (параметров) с указанием каждому из них кода частоты опроса  $v_{(n)}$  (3). Расстановку адресов параметров в периодической последовательности предлагаемый алгоритм выполнит автоматически.

Отметим, что количество фаз  $C_n$ , для частоты  $f_{v(n)} = I_s/2^{v(n)}$ , равно  $2^{v(n)}$  и, поэтому, имеется  $2^{v(n)}$  вариантов размещения команд опроса канала с этой частотой в кадре (рисунок 1). Для записи фазы в двоичном коде требуется  $m_{(n)} = \log_2 v_{(n)}$  разрядов, которые сравниваются с  $m_{(n)}$  младшими разрядами счетчика номеров позиций, на которых может располагаться команда опроса  $n$ -го канала, т.е. с текущей фазой частоты  $f_{v(n)}$ .

Предлагаемый алгоритм распределения фаз  $C_n$  между измерительными каналами в соответствии с назначенными частотами  $f_{v(n)}$  более подробно рассмотрим на конкретном примере.

Пусть необходимо организовать программный опрос пяти измерительных каналов –  $N = 5$  с частотой информативности  $I_s$ . Пользуясь двоично-степенной сеткой частот, можно задать частоту опроса любого из каналов в виде показателя степени  $v_{(n)}$  в делителе информативности по формуле (3). Для простоты ограничим пока диапазон возможных частот опроса – пусть  $v_{(n)}$ ,  $(l) \leq 3$ . Тогда цикл телеметрирования составит  $Tv_{(n)}\max = L = 2^3 = 8$  периодов  $\Delta t_{(j)}$  тактовой частоты системы  $I_s$ . Т.е. кадр будет иметь восемь позиций (рисунок 2). Зададим некоторую программу измерений (опроса), представленную в таблице 1.

Все возможные фазы заданных в программе частот можно отобразить графически с помощью двоичного прадерева фаз (рисунок 1).

Нетрудно видеть, что номер яруса дерева совпадает с показателем степени  $v_{(n)}$  в формуле (3), причем на каждом ярусе имеется  $2^{v(n)}$  свободных фаз, которые можно занимать под каналы с частотой опроса  $f_{v(n)} = I_s/2^{v(n)}$ .

**Таблица 1 – Пример программы измерений (опроса)**

Номер измерительного канала, $n$	$n = 0$ (000)	$n = 1$ (001)	$n = 2$ (010)	$n = 3$ (011)	$n = 4$ (100)	$n = 5$ (101)
Значение $v_{(n)}$ кода частоты по формуле(3)	3(011)	2(010)	3 (011)	3 (011)	2 (010)	3(011)
Полученное значение фазы для $n$ -го канала	000	01x	001	100	11x	101

Порядковые номера фаз для каждой частоты на рисунке 1 отмечены в

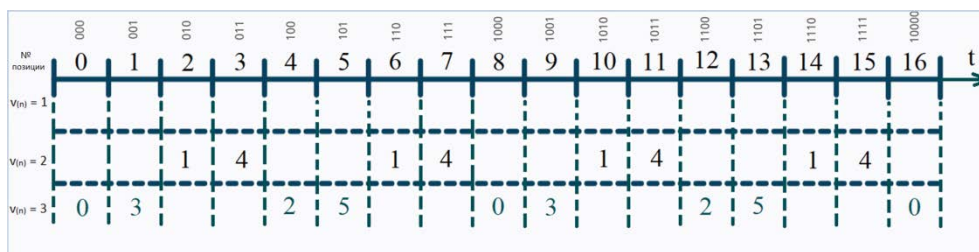
кружках. Пользуясь прадеревом (рисунок 1), проведем распределение фаз опроса между измерительными каналами согласно заданной для каждого канала частоте опроса (таблица 1). Будем выбирать из программы (таблица 1) элементы согласно порядковому номеру и резервировать за каждым каналом первую, справа – налево, свободную фазу заданной для него частоты на соответствующем ярусе, соблюдая при этом вышеуказанные правила распределения. Получим распределение фаз, приведенное в таблице 2.

**Таблица 2 – Распределение фаз  $C_n$  по каналам (параметрам) и каналов по позициям кадра для ПИ в таблице 1**

$V(n)$ – код частоты (двоичный)	011	011	010	010	011	011	010	010	011
Номер текущей позиции (код двоичный)	000	001	010	011	100	101	110	111	000
Полученная фаза (код двоичный)	000	100	01x	11x	001	101	01x	11x	000
Последовательность каналов – кадр (код десятичный)	0	3	1	4	2	5	1	4	0

Примечание к таблице 2: код номера позиции – младший разряд – справа, код фазы – младший разряд – слева (зеркальное отображение), x – значение разряда безразлично

На рисунке 1 номера соответствующих распределению каналов (параметров) отмечены в квадратах. Поскольку, как уже сказано выше, последовательные номера позиций в кадре зеркально отображают все возможные фазы допустимого набора периодов сетки  $[Tv(n)]$ , номер  $n$ -го канала (команда опроса) будет располагаться на тех позициях, для которых полученное значение фазы совпадает с текущим в соответствующем количестве разрядов (таблица 2, рисунок 2).



**Рисунок 2 – Итоговая последовательность. Распределение каналов по позициям кадра в соответствии с ПИ**

Для формализации описанного алгоритма действий и его аппаратурной реализации в виде ГФ используется диагональная матрица, приведенная к треугольному виду (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Треугольная матрица состояния фаз  $C_n$** 

Каждый элемент матрицы представляет собой один двоичный разряд, а вся матрица содержит информацию о свободных и занятых фазах двоичного прадерева (рисунок 1).

Количество двоичных разрядов в каждой строке матрицы равно соответствующему значению  $v_{(n)} = 1, 2, 3, \dots, l$  и содержит код последней занятой фазы частоты  $f_{v_{(n)}}$  (3).

При распределении фаз в течение текущей позиции  $\Delta t_{(j)}$  выполняются следующие операции. В исходном состоянии все элементы матрицы устанавливаются в единичное состояние, что соответствует самым старшим значениям фаз и означает, что первая свободная фаза любой частоты является нулевой. Далее производится последовательный анализ списка каналов ПИ и извлечение из памяти ПИ назначенных значений  $v_{(n)}$ . При каждом извлечении выполняется обращение к  $v_{(n)}$ -ой строке матрицы, которое заключается в добавлении единицы к младшему диагональному разряду строки. Если его значение равно единице, то в него записывается ноль, но при этом возникает перенос, который распространяется в младший разряд  $(v_{(n)} - 1)$ -ой строки. Если и его значение равно единице, то оно меняется на ноль, а перенос распространяется дальше – в младший разряд  $(v_{(n)} - 2)$ -ой строки, т.е. выше по диагональным разрядам матрицы, пока не дойдет до строки, диагональный (младший) разряд которой содержит ноль. Значение этого разряда меняется на единицу, дальнейшее распространение переноса прекращается, а само значение строки заносится в старшие разряды строк, по диагональным разрядам которых прошел перенос, до строки первичного обращения  $v_{(n)}$  включительно. Содержимое этой строки и будет последней фазой, распределенной каналу с частотой опроса  $f_{v_{(n)}}$ . Далее значение  $v_{(n)}$ -ой строки сравнива-

ется с  $v_{(n)}$  правыми разрядами кода номера текущей позиции, представляющими текущую фазу частоты  $f_{v_{(n)}}$ . В случае их совпадения номер ячейки ПИ фиксируется в качестве номера канала опроса для данной позиции кадра и дальнейший анализ списка частот ПИ на этой позиции прекращается. В противном случае анализ продолжится до тех пор, пока для какого-либо из каналов распределенная фаза не совпадет с текущей, либо пока не будет исчерпан список частот. Тогда данная текущая позиция остается пустой, что возможно в случае, если  $\sum_{n=1}^N 2^{-v_{(n)}} < 1$ .

Для примера для ПИ из таблицы 1 ниже приведены последовательные состояния матрицы, когда выполняется предлагаемый алгоритм действий по резервированию фаз (рисунок 4).

1	0	0	0	1	1	1
1 1	0 0←	<u>0 1</u>	0 1	1 0←	<u>1 1</u>	1 1
1 1 1←	<u>0 0 0</u>	0 0 0←	<u>0 0 1</u> ←	<u>1 0 0</u>	1 0 0←	<u>1 0 1</u>

**Рисунок 4 – Последовательные состояния матрицы по алгоритму резервирования фаз**

Алгоритм принадлежит новому классу, который мы назвали алгоритмами, использующими принцип текущей фазы. Рассмотрим пример аппаратурной реализации на его базе ГФ для системы измерений с двухступенчатой коммутацией измерительных каналов. Блок-схема ГФ приведена на рисунке 5.

Генератор предназначен для формирования команд опроса 256-ти измерительных каналов, подключенных к восьми устройствам группового преобразования, – локальным коммутаторам (ЛК) группами по 32 канала в каждой. Максимальная информативность системы измерений (потока команд)  $I_s$  – 128 кГц. В память ПИ можно загрузить до восьми программ опроса. Диапазон кодов частот опроса, задаваемых в ПИ для ЛК и каналов, одинаков  $v_{(n)} = 1, 2, 3, \dots, l, (l = 7)$ .

С приходом очередного такта информативности содержимое счетчика позиций увеличивается на единицу, а схемы матриц и схемы управления устанавливаются в исходное состояние. Далее по тактовым сигналам производится последовательное извлечение из памяти ПИ кодов частот опроса ЛК, при этом адрес ячейки памяти поступает со счетчика номера ЛК в блоке управления, и происходит резервирование за ЛК фаз соответствующих частот опроса. Этот процесс продолжается до тех пор, пока для какого-либо ЛК зарезервированная фаза не совпадет с текущей. В случае совпадения, схемой матрицы первой степени формируется сигнал сравнения, который останавливает дальнейший просмотр программы опроса ЛК, блокируя тактовые сигналы, поступающие на счетчик номера ЛК. Состояние счетчика будет представлять собой номер ЛК, опрашиваемого на данной позиции кадра. Так как номер опрашиваемого ЛК определяет программу опроса его каналов, вычисление номера канала может быть проведено только после вычисления номера ЛК.

**Рисунок 5 – Блок схема ГФ для системы измерений  
с двухступенчатой коммутацией каналов**

С целью достижения заданной информативности потока команд, циклы вычисления номера ЛК и номера его канала разнесены во времени. Если вычисление номера ЛК выполняется на позиции  $\Delta t_{(j)}$ , то вычисление номера канала аналогичным образом, с помощью матрицы второй ступени, выполняется на позиции  $\Delta t_{(j+1)}$ . При этом для сравнения используется код модификатора, представляющий собой сдвинутый вправо код счетчика позиций, причем значение кода частоты опрашиваемого ЛК равно числу разрядов сдвига.

ГФ, созданный на основе предлагаемого алгоритма, был использован для решения задачи программно-адресного опроса телеметрируемых параметров в составе измерительно-вычислительного комплекса ВЛ-1033-03 [6] и его последующих модификаций. Эти комплексы предназначены для решения задач информационно-телеметрического обеспечения при предстартовых испытаниях изделий ракетно-космической техники. Использование предлагаемых ГФ позволило снизить трудоемкость решения задачи формирования форматов кадра для систем программируемой телеметрии.

**Выводы**

На основании ранее разработанной с использованием математического

аппарата теории чисел методика [2] предложен алгоритм автоматического размещения адресов опроса измерительных каналов по позициям группового телеметрического сигнала в соответствии с назначенными в программе измерений частотами дискретизации.

Алгоритм позволяет вычислить номер канала для каждой позиции кадра на основании заданных кодов частот в программе измерений и кода текущей фазы, выделенного из номера позиции группового телеметрического сигнала. Это дает возможность не записывать в память программ полный цикл телеметрирования, ограничившись лишь необходимыми данными кодов частот каналов и, тем самым, значительно сократить объем памяти программ и упростить подготовку программы измерений.

Генератор форматов кадра, разработанный на базе предлагаемого алгоритма, позволил снизить трудоемкость решения задачи программно-адресного опроса параметров в составе измерительно-вычислительных комплексов, предназначенных для использования при предстартовых испытаниях изделий ракетно-космической техники.

#### *Литература*

1. Кошевой А.А. Телеметрические комплексы летательных аппаратов // М.: Машиностроение». 1975. 311 с.
2. Мороз А.П., Полехина Г.Е., Полехин А.И. Математические критерии формирования единой временной периодической последовательности адресов источников информации в системах бортовых измерений с программно-управляемым сбором данных // Информационно-технологический вестник. 2021. Т. 27. 1. С. 41-52.
3. Бухштаб А.А. Теория чисел // М.: Просвещение. 1966. 371 с.
4. Мановцев А.П. Основы теории радиотелеметрии // М.: Энергия. 1973. 592 с.
5. Сорока Н.И., Кривинченко Г.А. ТЕЛЕМЕХАНИКА. Конспект специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» // Минск. 2013. 256 с.
6. Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) ВЛ-1033-03. Техническое описание. 2001. 222 л.

УДК 629

## **Разработка комбинированной двигательной установки первой ступени ракеты**

**К.В. Щурин**, доктор технических наук, профессор,  
**С.А. Береснев**, студент третьего курса кафедры Техники и технологий,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,  
**В.А. Капустин**, студент третьего курса  
кафедры Геодезии, геоинформатики и навигации,  
Российский Университет Транспорта (МИИТ), г. Москва

*Статья посвящена разработке комбинированной двигательной установки первой ступени ракеты. Рассмотрены действующие системы, их преимущества и недостатки, а также задача выведения большего количества полезной нагрузки в космос за счёт уменьшения веса топлива, а также улучшения экологического фактора. Показана аналогичная разработка КДУ. Представлены расчеты веса конструкции и количества топлива.*

Инновации, проблематика, анализ, изменение.

## **Designing of a combined propulsion system for the first stage of the rocket**

**K.V. Shchurin**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
**S.A. Beresnev**, 3<sup>rd</sup> year student of the Department of Engineering and technology,  
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,  
**V.A. Kapustin**, 3<sup>rd</sup> year student Department of geodesy,  
Geoinformatics and navigation RUT (MIIT), Moscow

*The article is devoted to the development of the combined propulsion system of the first stage of the rocket. The current systems, their advantages and disadvantages, as well as the task of bringing more payload into space by reducing the weight of fuel, as well as improving the environmental factor are considered. A similar development of the CPS is shown. Calculations of the weight of the structure and the amount of fuel are presented.*

Innovations, problematic issues, analysis, changes.

В статье представлены технические предложения по разработке комбинированной двигательной установки (КДУ) первой ступени ракеты. Основными целями и задачами данной работы являются:

1. Снижение стартовой массы ракеты с соответствующим повышением полезной нагрузки за счет использования комбинированной двигательной установки
2. Качественное улучшение экологических показателей пуска
3. Многократное использование дорогостоящих компонентов КДУ первой ступени ракеты.

Задачи:

1. Анализ существующих систем вывода ракет-носителей;
2. Оценка преимуществ и негативных факторов в применяемых системах;
3. Анализ известного аналога для разработки КДУ;
4. Представление эскизного технического проекта КДУ;

Базой для постановки проектных задач, безусловно, являются существующие в настоящее время ракеты-носители, которые имеют длительную и результативную историю эксплуатации и решения задач космической программы РФ.

Ракета «Союз». Данный вид ракеты-носителя имеет множество модификаций, и является многоцелевой. На основе многолетней истории эксплуатации ракеты «Союз» можно выделить ее как эффективный проект, который стал основным на долгие годы. Но также стоит отметить, что в этой системе есть моменты, которые было бы весьма привлекательно преодолеть.

Очевидной проблемой ракеты «Союз» является использования значительного количества жидкого кислорода в качестве окислителя, который требуется на всех этапах полета, и помещается в больших по объему баках, чем основное горючее – керосин. Это является основным фактором, снижающим эффективность вывода полезной нагрузки. На (рис. 1) представлено соотношение окислителя и горючего. Можно увидеть, насколько значительна доля окислителя в первой ступени.



Рисунок 1 – Соотношение окислителя и горючего

«Протон-М». Если в предыдущем примере возможно было обозначить проблему с точки зрения массового совершенства, то в случае с «Протоном-М» очевидна экологическая проблема. Топливо, которое использует «Протон-М», крайне опасно для окружающей среды (рис. 2).

Несимметричный диметилгидразин (НДМГ – гептил) и его окислитель (тетраоксид азота – амил) на всех стадиях применения причиняют значительный вред здоровью человека и окружающей среде.

Технические характеристики «Протон-М»:

1. Стартовая масса: 705т;
2. Кол-во ступеней: 3;
3. Используемое топливо: НДМГ +АТ;
4. Масса полезной нагрузки:
  - Для НОО – 22 т;
  - Для ГСО – до 4 т.

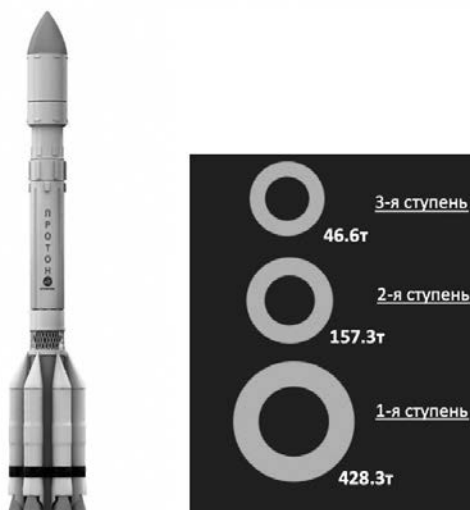


Рисунок 2 – Протон-М и количество используемого топлива

После рассмотрения существующих систем, можно выделить следующие проблемы их использования:

- В ракете «Союз» – масса окислителя и его криогенные свойства;
- В ракете «Протон-М» – Токсичность топлива и масса окислителя;

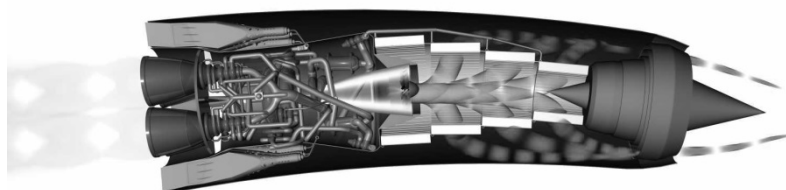
Таким образом, анализ данных систем ракет позволяет сформировать следующие задачи:

- Уменьшить общую массу топлива, исключая компонент-окислитель.
- Улучшить экологический фактор пуска

На данный момент, с развитием космических и авиастроительных техно-

логий, появляется множество технических решений, которые приходят на смену существующим системам.

В качестве примера можно привести британскую разработку – новый тип комбинированной двигательной установки под названием «Sabre», которая является силовой установкой инновационного беспилотного самолета «Skylon» (рис. 3).



**Рисунок 3 – Двигательная установка «SABRE»**

Принцип работы заявленной системы, следующий:

В основные (ракетные) камеры сгорания подается топливо «жидкий водород» и окислитель, которым выступает либо атмосферный воздух, нагнетаемый турбокомпрессором и сильно охлаждаемый при прохождении через теплообменник – (воздушно-реактивный режим), либо жидкий кислород из баков – (ракетный режим).

Изучая будущее представленной ранее разработки, мы пришли к выводу, что ее перспективы достаточно неопределенны и в данный момент нельзя с уверенностью сказать, когда она будет реализована.

В то же время в нашей стране имеются все необходимые компоненты и технологии, комбинированное использование которых может позволить реализовать данный принцип работы в настоящее время.

При подборе компонентов для нашего проекта мы рассмотрели уже существующие российские технологии двигательных установок и наиболее оптимальным вариантом представляется двухконтурный турбореактивный двигатель P-79B-300 – подъемно-маршевый двигатель самолета Як-141.

Як-141 – это многоцелевой палубный сверхзвуковой самолет с функцией вертикального взлета и посадки.

Это являлось решающим фактором при подборе двигательной установки для проекта, так как расчеты для данного двигателя выполнялись в том числе и для вертикального положения.

Силовая установка Як-141 состоит из одного подъемно-маршевого двигателя P79B-300 и двух подъемных PД-41 (рис. 4).

Подъемно-маршевый двигатель P79B-300 расположен внутри корпуса самолета. Воздух к нему поступает от двух разнесённых воздухозаборников.



Двигатель имеет поворотное сопло с регулируемой площадью критического сечения, которое позволяет отклонять вектор тяги в вертикальной плоскости в диапазоне  $95^\circ$  вне зависимости от режима работы двигателя.

Двигатель обеспечивает максимальную тягу в 10 900 кгс на безфорсажном режиме и в 15 500 кгс при использовании форсажа. Является первым в мире двигателем, способным использовать форсаж как на горизонтальном, так и на вертикальном режимах.

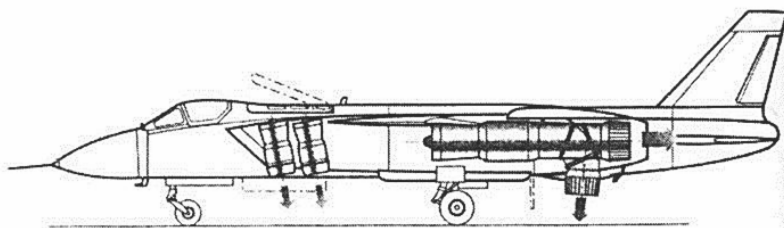


Рисунок 4 – Устройство двигательной установки Як-141

После выбора всех компонентов устройства КДУ, мы представили следующую схему их компоновки (рис. 5).

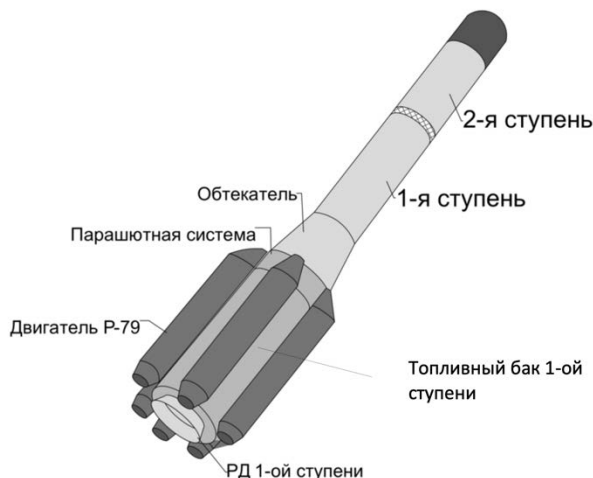


Рисунок 5 – Устройство КДУ

Система КДУ при отработке топлива, отключается и продолжает лететь вместе с 1-ой ТТРД ступенью до ее полной отработки. Затем, после ее полной отработки происходит сброс вместе с КДУ с последующим его отделением от ступени ТТРД. Это делается для предотвращения повреждений компонентов КДУ от воздействия струи выходящих газов из сопла ракеты.

Характеристики ТТРД:

- Тяга – 150 тс
- Компоненты топлива – Смесевое топливо на основе перхлората аммония
- Удельный импульс – 250 с

Ранее отмеченная возможность управления вектором тяги в двигателе.

Р-79 обеспечит большую управляемость ракеты (на этапе работы ее твердотопливной ступени), а также использовать все двигатели из системы ДУ попеременно для увеличения безопасности (в случае отказа работы одного из двигателей).

Далее задействуется система безопасного возврата на землю.

КДУ раскрывает парашютную систему, которая находится в верхней части установки (рис. 6).

Данное расположение парашютной системы позволяет установить ровное, относительно Земли посадочное положение КДУ.

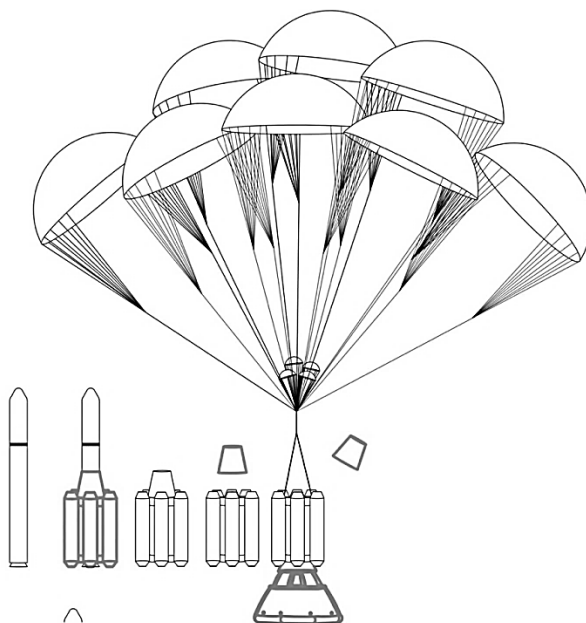


Рисунок 6 – Схема системы безопасного возврата

Характеристики КДУ:

Для двигателя Р-79-В300:

- Масса двигателей – 11,1 т
- Тяга двигателей – 90 тс
- Вес топлива (на 60 с) – 950,4 кг

Для топливного кольца:

- Материал кольца – дюралюминий

- Масса топливного кольца – 728 кг
- Площадь кольца – 14,6 м<sup>2</sup>
- Масса парашютной системы – 70 кг

Исходя из названного материала можно сделать выводы:

- Предложенная схема построения первой ступени ракеты, предполагающая использование, в том числе, реактивных авиационных двигателей, позволяет существенным образом сэкономить массу за счет использования атмосферного кислорода – окислителя, а также избавиться от применения токсичных компонентов топлива.
- Предлагаемое использование данного типа авиационных двигателей, совместно с твердотопливным двигателем первой ступени, позволит обеспечить управляемость ракеты.
- Предполагаемая компоновка двигательной установки позволяет разработать вариант их многократного использования.
- В настоящее время оценивается возможность патентной защиты предлагаемого варианта КДУ.

#### *Литература*

1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/20067/> (Дата обращения: 23.12.2019).
2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://avia.pro/blog/yak-141> (Дата обращения 25.12.2019).
3. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. 2006.
4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.universetoday.com/143810/skylons-sabre-engine-passes-a-big-test/> (Дата обращения: 23.12.2019).

УДК 629.7.017.1

## Распространение отказов во взаимозависимых многоуровневых сетях

**А.А. Брусков**, аспирант второго года обучения кафедры информационных технологий и управляющих систем,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*В этой работе разрабатываются новый подход и алгоритмические инструменты для моделирования и анализа живучести сетей с разнородными узлами, а также рассматривается их применение в космических сетях. Космические сети позволяют совместно использовать ресурсы космических аппаратов на орбите, такие как хранение, обработка и обмен данными. Каждый космический аппарат в сети может иметь различный состав и функциональность подсистем, что приводит к неоднородности узлов. Большинство традиционных анализов живучести сетей предполагают однородность узлов и в результате не подходят для анализа космических сетей. Эта работа предполагает, что гетерогенные сети могут быть смоделированы как взаимозависимые многоуровневые сети, что позволяет проводить анализ их живучести. Многоуровневый аспект фиксирует разбивку сети в соответствии с общими функциональными возможностями в различных узлах и позволяет создавать однородные подсети, в то время как аспект взаимозависимости ограничивает сеть для захвата физических характеристик каждого узла.*

Взаимозависимые многоуровневые сети, анализ живучести, космические сети, отказы, сбои, деградация.

### **Failure propagation in interdependent multi-level networks**

**A.A. Bruskov**, second-year postgraduate student of the Department of Information Technologies and Control Systems,

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*In this paper, we develop a new approach and algorithmic tools for modeling and analyzing the survivability of networks with heterogeneous nodes, and also consider their application in space networks. Space networks allow the sharing of spacecraft resources in orbit, such as data storage, processing, and exchange. Each spacecraft in the network may have a different composition and functionality of subsystems, which leads to heterogeneity of nodes. Most traditional network survivability analyses assume node homogeneity and as a result are not suitable for space network analysis. This work suggests that heterogeneous networks can be modeled as interdependent*

*multi-level networks, allowing analysis of their survivability. The multi-level aspect captures the network breakdown according to the common functionality in different nodes and allows for the creation of homogeneous subnets, while the interdependence aspect restricts the network to capture the physical characteristics of each node.*

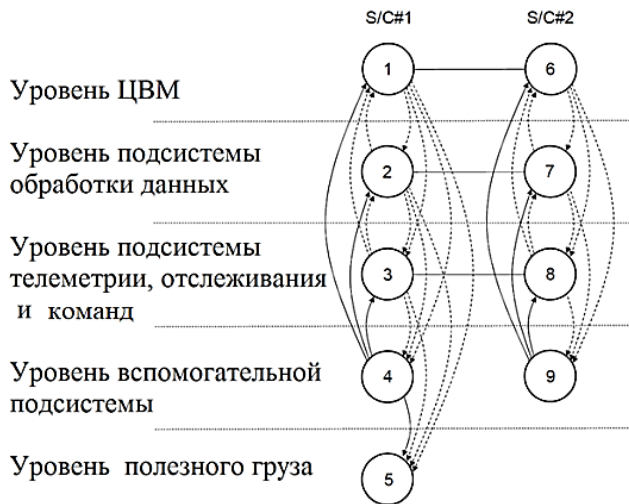
Interdependent multi-level networks, survivability analysis, space networks, failures, failures, degradation.

Оценка живучести взаимозависимой многослойной сети требует оценки целевой функции, связанной с временем отказа узлов в сети. Из-за взаимозависимости в модели эта оценка не является тривиальной и требует тщательного учета различных вопросов, обсуждаемых далее. Часть распространения отказа обусловлена как «эффектом убийцы», так и «эффектом предшественника». В следующих подразделах подробно рассматриваются эти эффекты. Способ включает четыре стадии:

- генерация времени до отказов  $T_F$  для каждого узла и внутриуровневой линии связи;
- распространение отказов через межуровневые линии связи, связанные с «эффектом убийцы»;
- распространение отказов через межуровневые линии связи, связанные с «эффектом предшественника»;
- объединение всех эффектов для получения вероятности недоступности каждого узла.

Ниже приводится математическая характеристика этих этапов.

Взаимозависимая многоуровневая сеть, представляющая интерес, определяется как  $N(A_1, A_2, A_3, C, f)$ . В этой работе исследуются отказы узлов и каналов связи.

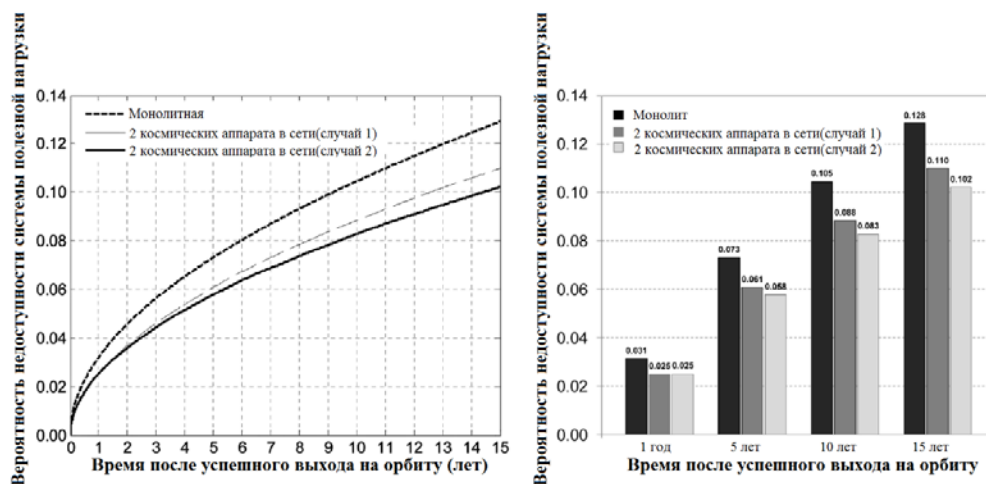


**Рисунок 1 – Взаимозависимое многоуровневое сетевое представление космической сети с резервированием центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных**

**Таблица 1 – Параметры Вейбулла для времени отказа подсистем космического аппарата в случае центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных**

Функциональность	Параметр формы Вейбулла $\beta$	Параметр масштаба Вейбулла $\theta$ (лет)
Центральная вычислительная машина	1.251	691.2
Подсистемы обработки данных	0.6266	350,000
Подсистема телеметрии, отслеживания и команд	0.4650	47,770
Поддерживающая подсистема	0.5529	918.5
Полезная нагрузка	0.5767	49,990

**Генерация времени до отказа.** Для распространения отказов по сети необходимо сначала генерировать время до отказов для различных объектов в космической сети – узлов и внутриуровневых связей. Используя кумулятивные функции распределения, представляющие поведение отказа каждого узла, можно генерировать случайное время до отказа для узлов  $T_{F, \text{узел } i} (i \in N_n^*)$ . Следует отметить, что для каждого узла общего уровня нет необходимости совместно использовать одно и то же поведение отказа (разнесение избыточности).



**Рисунок 2 – Выходная вероятность неготовности полезной нагрузки с функциональным резервированием центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных наряду с случаем монолита и случаем подсистемы телеметрии, отслеживания и команд**

Для формирования времени отказа для внутрислойных связей  $T_{F, \text{канал связи } j \rightarrow i^*}$  необходимо два шага: связь между двумя космическими аппаратами устанавливается через беспроводной блок, встроенный в каждый космиче-

ский аппарат.

Для функционирования канала оба блока должны быть работоспособными, отказ одного из них приводит к отказу канала:

- генерация времени до отказа беспроводных блоков на каждом космическом аппарате с использованием заданных кумулятивных функций распределения;

- генерировать время до отказов для каждого внутриуровневого канала  $T_{F, \text{канал связи } j \rightarrow i^*}$  принимая минимальное время до отказов двух связанных беспроводных устройств (блок  $i$  и блок  $j$ ).

**Распространение сбоя через «Эффект убийцы».** Информация об «эффекте убийцы» содержится в межслойной матрице  $C$ , и первый шаг заключается в извлечении из  $C$  пар вершин «убийца» и «жертва». Как показано в предыдущем параграфе,  $E_k$  может быть определен из  $C$  следующим образом:

$$E_k = \{(j, i) | c_{ij} = 1\} \quad (2)$$

Определив  $v$  вектор  $k_1$  как «убийцу» и вектор  $v_1$  как «жертву» так, чтобы:

$$\begin{cases} k_1, v_1 \in N^{|E_k|} \\ \forall q \in N^*_{|E_k|}, (k_1(q), v_1(q)) \in E_k \\ \forall r, s \in N^*_{|E_k|} \text{ и } r \neq s, (k_1(r), v_1(r)) \neq (k_1(s), v_1(s)) \end{cases} \quad (2)$$

Последний шаг заключается в вычислении времени до недоступности  $T_U^{k,F}$  – вершины «жертвы» с использованием времени до отказа вершины «убийцы». Математически это выражается как:

$$\forall q \in N^*_{|E_k|}, T_{U, \text{вершина } v_1(q)}^{k,F} = T_{F, \text{вершина } k_1(q)} \quad (3)$$

В случае, когда вершина жертвы имеет несколько «убийц»,  $T_U^{k,F}$  равно минимуму времени до отказа вершин «убийцы».

**Распространение отказа через «Эффект предшественника».** Что касается «эффекта убийцы», то информация о «эффекте предшественника» содержится в межуровневой матрице  $C$ , а  $C$  используется для извлечения пар вершин «убийцы» и «жертвы». Как определено в предыдущей главе,  $E_p$  определяется следующим образом:

$$E_k = \{(j, i) | c_{ij} = 2\} \quad (4)$$

«Убийца» вектора  $k_2$  и «жертва» вектора  $v_2$  определяются как:

$$\begin{cases} k_2, v_2 \in N^{|E_p|} \\ \forall q \in N^*_{|E_p|}, (k_2(q), v_2(q)) \in E_p \\ \forall r, s \in N^*_{|E_p|} \text{ и } r \neq s, (k_2(r), v_2(r)) \neq (k_2(s), v_2(s)) \end{cases} \quad (5)$$

Расчет времени до неисправности из-за «эффекта предшественника» не так прост, как для «эффекта убийцы». Действительно, отказ вершины, имеющей функциональную избыточность, не обязательно будет немедленно распространяться на вершины, принадлежащие одному и тому же объекту (здесь, космический аппарат). Время, в которое функция, представленная вершиной, станет недоступной, зависит от времени до отказа самой вершины, а также от времени до

отказа других вершин и рёбер части того же слоя. Например, в моем исследовании космических сетей отказ узла 1 будет распространяться на узлы 2 и 3, если узел 1 не способен подключиться к ресурсам узла 4, то есть если неисправна линия связи между узлами 4 и 1, или узел 4. Следовательно, необходимо сравнить время до отказа узла, с теми парами линии связи/узла, к которым он подключен. Необходимо выполнить несколько шагов, которые описаны ниже.

1. Чтобы узнать, когда вершина становится недоступной после «эффекта убийцы», вводится «минимальное время недоступности»  $T_U^{m,F}$  и определяется как:

$$\forall q \in N_n^* \begin{cases} T_{U, \text{вершина } q}^{m,F} = \min [T_{F, \text{вершина } q}, T_{U, \text{вершина } q}^{k,F}] & \text{если } T_{U, \text{вершина } q}^{k,F} \text{ существует,} \\ \text{иначе } T_{U, \text{вершина } q}^{k,F} = T_{F, \text{вершина } q} & \end{cases} \quad (6)$$

2. Для сравнения времени до отказа вершины  $i$  и тех пар рёбер ( $j \rightarrow i$ )/вершина  $j$ , с которыми она связана (т.е. рёбра к этой вершине  $i$ ), вводится конструктивный  $H_i^F = [h_{ij}^{l,F}]_{n_l \times n_l}$  объект - матрица, определённая следующим образом для  $l \in E_L$ :

$$\forall l \in E_L, \begin{cases} \text{если } i = j, h_{ij}^{l,F} = T_{U, \text{вершина } f^{-1}(l,j)}^{m,F} \\ \text{если } a_{ij}^l = 1, h_{ij}^{l,F} = \\ \text{если } i \neq j, \left\{ \begin{aligned} & \text{если } a_{ij}^l = 1, h_{ij}^{l,F} = \\ & \text{если } a_{ij}^l = 0, h_{ij}^{l,F} = 0 \end{aligned} \right. = \min [T_{F, \text{ребро } f^{-1}(l,j) \rightarrow f^{-1}(l,i)}, T_{U, \text{вершина } f^{-1}(l,j)}^{m,F}] \\ \text{если } a_{ij}^l = 0, h_{ij}^{l,F} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Эта матрица  $H$  полезна тем, что она представляет время до отказа вершины и пары ребер/вершин, с которыми она связана.

3. Время до недоступности с учетом функциональной избыточности  $T_U^{r,F}$ , интересующей вершины, можно найти как максимальное время до отказа в связанной линии. Рассмотрим вектор столбца  $m_i^F = [m_i^{l,F}]_{n_l \times 1}$ , определенный для  $l \in E_L$  как:

$$\forall l \in E_L, m_i^{l,F} = \max_j h_{ij}^{l,F} \quad (8)$$

4.  $T_U^{r,F}$  теперь можно вычислить как:

$$\forall l \in E_L, \forall i \in N_{nl}^*, T_{U, \text{вершина } f^{-1}(l,i)}^{r,F} = m_i^{l,F} \quad (9)$$

5. Теперь может быть применен тот же процесс, что и для «эффекта убийцы», то есть распространение «отказа» узла по слоям на узлы, принадлежащие одному и тому же объекту. Этот шаг заключается в вычислении времени до недоступности  $T_U^{p,F}$  вершины «жертвы» с использованием времени до отказа вершины «убийцы». Математически это выражается как:

$$\forall q \in N_{|E_p|}^*, T_{U, \text{вершина } v_1(q)}^{p,F} = T_{U, \text{вершина } k_1(q)}^{r,F} \quad (10)$$

В случае, когда вершина жертвы имеет несколько «убийц»,  $T_U^{p,F}$  равно минимуму времени  $T_U^{r,F}$  вершин «убийцы».

6. Из-за того, что несколько уровней избыточности могут рассматривать-



ся одновременно, взаимозависимость «эффекта предшественника» между вершинами, принадлежащими одному и тому же космическому аппарату, но в разных слоях, может потребовать итеративной схемы времени недоступности, чтобы сойтись к их правильным значениям. Следующее условие указывает, если требуется больше итераций: если  $T_{U, \text{вершина } q}^{m,F} \leq T_{U, \text{вершина } q}^{p,F}$  распространение отказа из-за «эффекта предшественника» завершено (можно пропустить шаг 7). В противном случае перейдите к следующему шагу.

7. Пока  $T_{U, \text{вершина } q}^{m,F} > T_{U, \text{вершина } q}^{p,F}$ , установите  $T_{U, \text{вершина } q}^{m,F} = T_{U, \text{вершина } q}^{p,F}$  и повторите шаги 2-5.

**Комбинация всех эффектов.** Наконец, для каждой вершины во взаимозависимой многоуровневой сети время недоступности получается следующим образом:

$$\forall q \in N_n^*, T_{U, \text{вершина } q}^F \\ = \min[\max(T_{F, \text{вершина } q}, T_{U, \text{вершина } q}^{rF}), T_{U, \text{вершина } q}^{kF}, T_{U, \text{вершина } q}^{pF}] \quad (11)$$

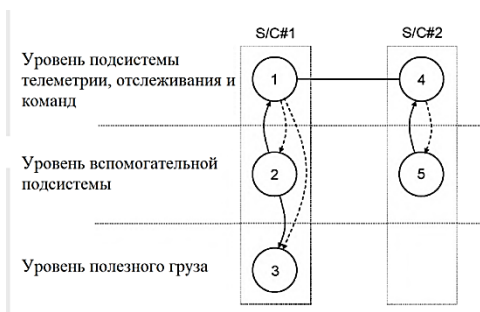
Где  $T_{U, \text{вершина } q}^{rF}$ ,  $T_{U, \text{вершина } q}^{kF}$  и  $T_{U, \text{вершина } q}^{pF}$  включены, если они имеют место.

**Алгоритм распространения отказов.** Ниже приведен алгоритм процесса, используемого для распространения катастрофических отказов по сети. Требуются следующие входные данные: матрицы смежности и межслойная матрица, функция отображения (эти три элемента определяют сетевую архитектуру) и кумулятивную функцию распределения для распределения отказов вершин и рёбер.

1. Создать для каждой вершины  $T_{F, \text{вершина } q}$
2. Создать для каждого ребра  $T_{F, \text{ребро } j \rightarrow i}$
3. Вычислить  $E_k$  с использованием выражение (1)
4. Вычислить  $k_1$  и  $v_1$ , используя выражение (2)
5. Вычислить  $T_U^{kF}$  для каждой вершины жертвы, используя выражение (3)
6. Вычислить  $E_p$  с использованием выражение (4)
7. Вычислить  $k_2$  и  $v_1$ , используя выражение (5)
8. Вычислить  $T_U^{mF}$  для каждой вершины, используя выражение (6)
9. Для всех  $l \in E_L$  вычислить  $H_l^F$ , используя выражение (7)
10. Для всех  $l \in E_L$  вычислить  $m_l^F$ , используя выражение (8)
11. Вычислить  $T_U^{rF}$  для каждой вершины для всех слоев  $l \in E_L$ , используя выражение (9)
12. Вычислить  $T_U^{pF}$  для каждой вершины жертвы, используя выражение (10)
13. Повторить шаги 9-12 до  $T_{U, \text{вершина } q}^{m,F} \leq T_{U, \text{вершина } q}^{p,F}$  для всех вершин жертвы  $q$  в «эффекте предшественника»
14. Вычислить  $T_U^F$  для каждой вершины, используя выражение (11)

**Функциональная избыточность подсистемы телеметрии, отслеживания и команд с использованием идеальной беспроводной связи.** Первая рас-

сма­три­ва­е­мая кос­ми­че­ская сеть – это про­стой при­мер, ис­поль­зо­вав­ший­ся ран­ее (ри­сун­ок 3), ко­то­рый со­сто­ит из сети из двух кос­ми­че­ских ап­па­ра­тов, ко­то­рые мо­гут со­вмес­тно ис­поль­зо­вать свои ре­сур­сы под­си­сте­мы те­ле­мет­рии, от­сле­жи­ва­ния и ко­ман­д.



**Рисунок 3 – Взаимозависимое многоуровневое сетевое представление для примера космической сети**

Этот конкретный пример был выбран, так как предыдущие исследования определили подсистему телеметрии, отслеживания и команд как основной движущей силы ненадежности космических аппаратов [1], поэтому космические аппараты в сети выиграют, если смогут подключаться к подсистеме телеметрии, отслеживания и команд друг друга. В этом иллюстративном случае основное внимание уделяется эндогенным отказам, и, как следствие, результаты живучести ограничиваются этим конкретным классом угрозы, и их не следует экстраполировать на другие классы ударов на орбите. Характеристики отказов различных подсистем космического аппарата приведены в таблице 2.

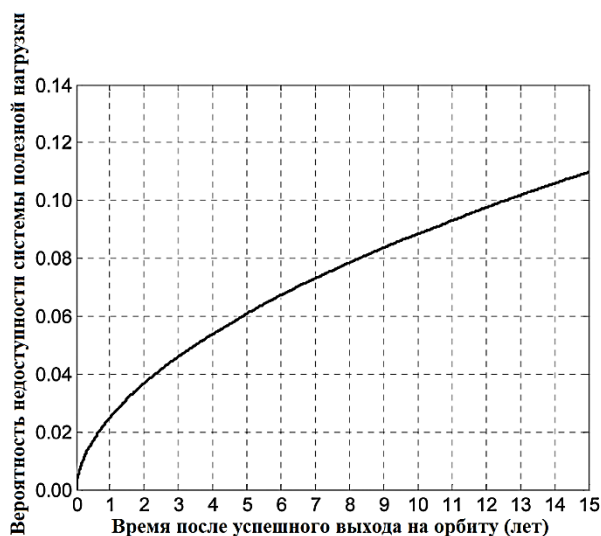
**Таблица 2 – Параметры Вейбулла для времени отказа подсистем космического аппарата в случае подсистемы телеметрии, отслеживания и команд**

Функциональность	Параметр формы Вейбулла $\beta$	Параметр масштаба Вейбулла $\theta$ (лет)
Подсистема телеметрии, отслеживания и команд	0.4650	47,770
Поддерживающая подсистема	0.5529	918.5
Полезная нагрузка	0.5921	30,150

Анализ живучести взаимозависимой многослойной сети, показанной на рисунке 3, рассматривает способность космической системы генерировать полезность, то есть вероятность того, что узел полезной нагрузки (узел 3) остается полностью работоспособным, или вероятность того, что он станет недоступным. Как следствие, интересующей метрикой является  $P(T_{U,3}^F < t)$ . Представленные здесь результаты живучести ограничены этой метрикой, но они могут быть легко

расширены до других интересующих показателей производительности.

Предполагая сначала совершенно надежную беспроводную связь между космическим аппаратом и запуском моделирования Монте-Карло, можно получить вероятность недоступности узла полезной нагрузки, показанного на рисунке 4.

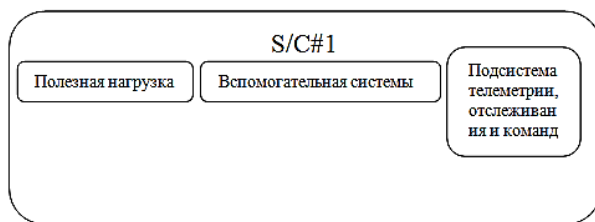


**Рисунок 4 – Выходная вероятность неготовности системы полезной нагрузки с функциональным резервированием подсистемы телеметрии, отслеживания и команд**

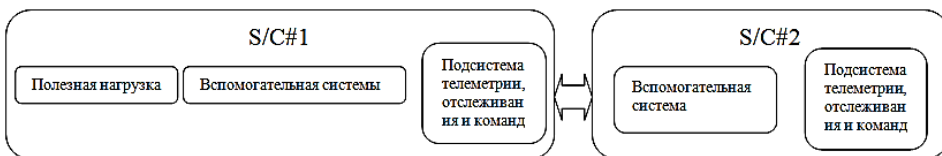
Рисунок 4 выглядит следующим образом: например, через 5 лет на орбите существует примерно 6% вероятность того, что полезная нагрузка будет недоступна для генерации утилиты. Эта вероятность увеличивается примерно до 9% после 10 лет пребывания на орбите.

В дополнение к таким результатам, как показано на рисунке 4, предложенный здесь способ позволяет быстро проводить сравнительный анализ живучести различных архитектур. Например, далее рассматриваются две дополнительные архитектуры: традиционный монолитный космический аппарат и трех сетевая архитектура космического аппарата, представленная на рисунке 5, наряду с космической сетью из двух космических кораблей, изученным выше.

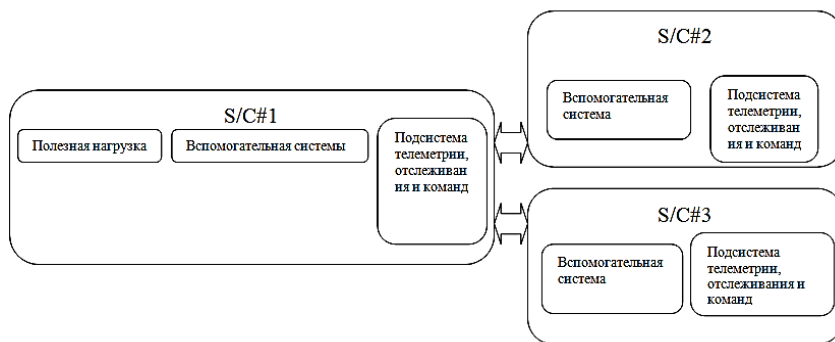
Традиционная монолитная архитектура:



Космическая сеть из двух космических аппаратов:



Космическая сеть из трех космических аппаратов:



**Рисунок 5 – Космические архитектуры с различными уровнями избыточности подсистемы телеметрии, отслеживания и команд**

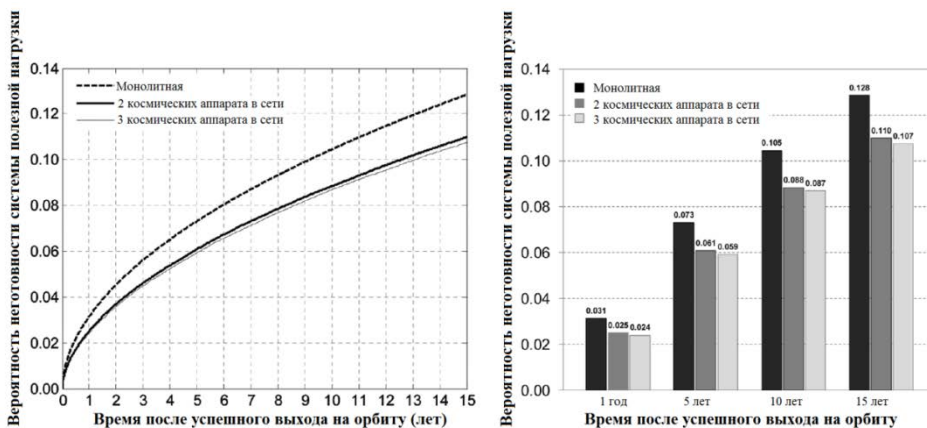
Взаимозависимое многослойное представление сети трех космических аппаратов показано на рисунке 5, а соответствующие матрицы и функция отображения являются следующими:

$$\text{Матрица смежности: } A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_2 = 0_{3 \times 3} \text{ и } A_3 = 0_{1 \times 1};$$

$$\text{Межслойная матрица: } C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\text{(Обратная) функция отображения: } f^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 6 \\ 2 & 4 & 7 \\ 5 & \text{NaN} & \text{NaN} \end{bmatrix}.$$

Если предположить, что беспроводные каналы связи между космическими аппаратами абсолютно надежны, то вероятность недоступности полезной нагрузки для каждой из трех архитектур показана на рисунке 6.



**Рисунок 6 – Сравнение вероятностей недоступности системы полезной нагрузки для архитектур одного, двух и трёх космических аппаратов**

На рисунке 6 показано, что по прошествии 15 лет вероятность того, что традиционный монолитный космический аппарат будет недоступен, составляет 12,8% (без выработки энергии), по сравнению с 11,0% для сети с двумя космическими аппаратами и 10,7% для сети с тремя космическими аппаратами. Другими словами, добавление космических аппаратов в сеть с резервированием подсистемы телеметрии, отслеживания и команд увеличит коэффициент живучести архитектуры по отношению к эндогенным отказам. Подход моделирования и анализ здесь предложили количественно оценить степень живучести различных сетевых архитектур. В этом примере уменьшение вероятности полного отказа узла полезной нагрузки (или недоступности узла) для сетевых архитектур двух космических аппаратов представляет собой 14% вариацию по сравнению с вероятностью полного отказа монолитной архитектуры, что можно считать значительным улучшением по сравнению с нынешней парадигмой проектирования космического аппарата. Значительная часть разницы происходит в начале жизни космической сети, что согласуется с тем, что большинство подсистем космических аппаратов страдают от младенческой смертности [2].

Следует провести тщательный анализ затрат и выгод для оценки того, стоит ли эта дополнительная вероятность создания полезного ресурса для его получения за счет проектирования, производства и запуска дополнительных космических аппаратов.

На рисунке 6 показано незначительное дополнительное преимущество 3-космических аппаратов по сети 2-космических аппаратов в соответствии с рассмотренными здесь предположениями (эндогенные сбои и идеальная беспроводная связь): добавление одного космического аппарата к традиционному монолитному космическому аппарату для функционального резервирования подсистемы телеметрии, отслеживания и команд снижает вероятность неготовности полезной нагрузки на 1,8%, но добавление двух космических аппаратов к монолиту для той же цели уменьшает такую же вероятность на 2,1%. Возможность получения таких результатов важна для системных инженеров при оценке стоимости и количественной оценки преимуществ различных вариантов проектирования сети.

**Влияние сбоя беспроводной линии связи.** Допущение, сделанное ранее относительно совершенно надежной беспроводной связи между космическими аппаратами, может быть не оправдано на практике, и, как следствие, преимущества живучести космической сети по сравнению с монолитным космическим аппаратом могут быть не в полной мере реализованы. Для оценки влияния отказа беспроводной линии связи при моделировании вводится поведение износа линии связи. Вероятность отказа линии связи обозначается как  $v_F(t)$ . Предполагая, что оба беспроводных блока для сети на рисунке 4 идентичны и что их отказ моделируется с использованием распределения Вейбулла с параметром формы  $\beta$  и параметром масштаба  $\theta$ , вероятность отказа линии связи задается следующим образом:

$$v_F(t) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{t}{\theta / 2^{(1/\beta)}} \right)^\beta \right) \quad (24)$$

Мы изучили широкий спектр параметров поведения отказа Вейбулла беспроводной линии связи, демонстрируя как младенческую смертность, так и сбои износа. Результаты, показанные на рисунке 7, относятся к характерным параметрам Вейбулла  $\beta = 3$  и  $\theta = 21,36$  лет, которые приводят к 50% вероятности отказа линии связи после 15 лет нахождения на орбите.

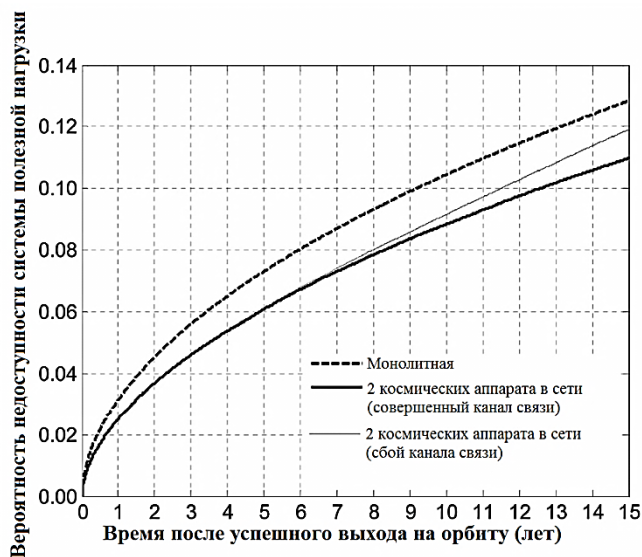


Рисунок 7 – Влияние несовершенного беспроводного канала

На рисунке 7 показана вероятность недоступности узла полезной нагрузки наряду с результатами для монолитной архитектуры и архитектуры сети двух космических аппаратов с идеальной связью. По существу, на рисунке 9 четко идентифицирует эффект отказа беспроводной линии связи.

На рисунке 7 показано, как ненадежность канала влияет на вероятность недоступности полезной нагрузки. В случае, показанном здесь, когда связь демонстрирует изношенные отказы, мы отмечаем, как и ожидалось, что вероятность отказа для архитектуры сети двух космических аппаратов с несовершенной связью расходится с ее идеальным случаем в конце жизни системы на орбите (около 7 года на рисунке). Более общий вывод заключается в том, что преимущество живучести космической сети возникает до того, как линия связи начинает демонстрировать отказы, и что, чем больше вероятность отказа линии связи, тем меньше преимущество живучести (больше расхождения от идеального случая).

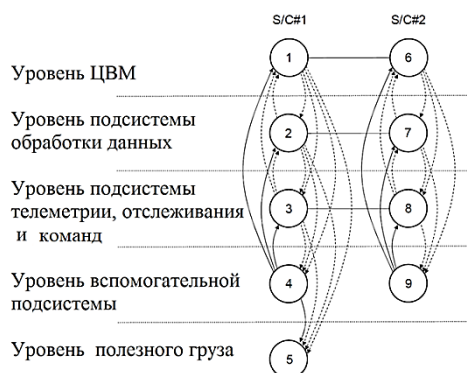
«Младенческая смертность» по беспроводной линии связи (распространенность ранних сбоев) притупило преимущество живучести космической сети на ранней стадии и, как следствие, искоренить такое поведение отказа беспроводной линии связи, путем включения или других процедур, должно быть высоким приоритетом для конструкторов и производителей, если космическая сеть должна предложить устойчивое преимущество по сравнению с традиционной конструкцией монолитного космического аппарата.

**Вариант функционального резервирования центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных с идеальным беспроводным каналом.** Предыдущий пример с избыточностью подсистемы телеметрии, отслеживания и команд показал простой пример демонстрации возможностей и использования представленного здесь подхода. Этот подход позволяет обрабатывать более сложные архитектуры, которые выходят за рамки возможностей

современных средств обеспечения надежности. В качестве примера ниже представлена более сложная архитектура. Для совместного использования орбитальных ресурсов могут быть выбраны и другие подсистемы космических аппаратов: например, управляющий процессор (основной компьютер космического аппарата) является хорошим кандидатом, поскольку космический аппарат может объединять свою вычислительную мощность, или один космический аппарат может запускать процессы и управлять другим космическим аппаратом, если центральная вычислительная машина этого космического аппарата вышла из строя, если достаточный запас вычислительной мощности встроено в поддерживающий космический аппарат. Дополнительной фракционируемой подсистемой является подсистема обработки данных (отвечающая за хранение и обмен данными): например, в качестве «жёсткого диска» созвездия можно предусмотреть один космический аппарат, на котором сетевые модули загружают свои данные, данные затем спускаются на наземную станцию космическим аппаратом-сборщиком.

Макросистема, объединяющая подсистемы телеметрии, отслеживания и команд, обработки данных и центральную вычислительную машину также называется подсистемой обработки команд и данных.

Взаимозависимая многослойная модель должна учитывать эти новые отдельные функциональные возможности: в настоящее время существует пять функциональных возможностей: подсистемы телеметрии, отслеживания и команд, обработки данных и центральную вычислительную машину, а также вспомогательные подсистемы и полезная нагрузка. Как следствие, представление сети будет состоять из пяти уровней, по одному для каждой из вышеупомянутых функциональных возможностей. Два КА входят в сеть: первый КА имеет все подсистемы, в то время как второй имеет все подсистемы, кроме полезной нагрузки и выступает в качестве функционального резервирования для первого КА для подсистемы телеметрии, отслеживания и команд, обработки данных и центральную вычислительную машину. Ассоциированное представление показано на рисунке 8, и далее представлены матрицы смежности и межуровневые матрицы, а также функция отображения.



**Рисунок 8 – Взаимозависимое многоуровневое сетевое представление космической сети с резервированием центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных**



Характеристики отказов этих функций (узлов) приведены в таблице 1.

Матрица смежности:  $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $A_4 = 0_{2 \times 2}$  и  $A_5 = 0_{1 \times 1}$ ;

Межслойная матрица:  $C = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}$ ;

(Обратная) функция отображения:  $f^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 2 & 7 \\ 3 & 8 \\ 4 & 9 \\ 5 & \text{NaN} \end{bmatrix}$ .

Если исходить из того, что между космическим аппаратом и имитацией Монте-Карло существует абсолютно надежная беспроводная связь, то можно получить следующие результаты, представленные на рисунке 2, наложенные на показанные ранее случаи: традиционную архитектуру монолита и случай функционального резервирования системы телеметрии, отслеживания и команд.

На рисунке 2 показаны улучшения живучести космических аппаратов на орбите, которые позволяют им подключаться к подсистемам обработки команд и данных друг друга. Например, видно, что через 15 лет сеть снижает риск недоступности полезной нагрузки на 2,6% по сравнению с космическим аппаратом-монолитом. Это представляет собой снижение риска потери полезной нагрузки на 20,5% (по отношению к эндогенным сбоям подсистемы обработки команд и данных), что является одним дополнительным аргументом, со стороны выгоды, в пользу космических сетей. Как отмечалось ранее, все преимущества, живучесть и другие преимущества, обеспечиваемые подключением космических аппаратов на орбите, должны быть тщательно взвешены с учетом затрат и риска, связанных с этим.

Современные космические технологии легко поддерживают фракционирование и создание сетей подсистемы обработки команд и данных и ее составных элементов. Другие подсистемы, такие как подсистема электропитания и подсистемы контроля положения и орбиты, потребуют технологических прорывов, прежде чем их можно будет подключить к сети.

Рассматриваемая здесь проблема была ограничена эндогенными отказами космических аппаратов, но она может быть адаптирована к другим классам угроз (орбитальный мусор или спутниковое оружие), как только будут смоделированы их вероятности возникновения.

**Выводы.** В этой работе представлен новый подход и алгоритмические

инструменты для моделирования и анализа живучести сетей с гетерогенными узлами. Исследование было мотивировано, с одной стороны, предполагаемыми ограничениями традиционного анализа живучести сети, которые предполагают по большей части однородность узлов (или некоторые вариации одной и той же функции), а с другой стороны, растущий интерес к космическим сетям, в которых различные узлы (космические аппараты) могут совместно использовать различные ресурсы на орбите с соседними космическими аппаратами.

Предлагаемый подход основан на идее отображения сети с разнородными узлами во взаимозависимую многоуровневую сеть. Многослойный аспект фиксирует разбивку сети в соответствии с общими функциональными возможностями в различных узлах и допускает появление однородных подсетей, в то время как аспект взаимозависимости ограничивает сеть для захвата физических характеристик каждого узла.

Примитивы распространения отказов по сети были разработаны в поддержку анализа живучести рассматриваемой сети. Также был предоставлен алгоритм распространения отказов узла и линии связи.

Этот подход и разработанные инструменты были применены в случае космических сетей, которые состоят из нескольких сетевых космических аппаратов, которые могут совместно использовать орбитальные ресурсы. Рассмотренные примеры включали сетевые космические аппараты, которые могут совместно использовать подсистемы телеметрии, отслеживания и команд, центральной вычислительной машины и подсистемы обработки данных.

Результаты количественно определяли прирост живучести, демонстрируемый космической сетью по сравнению с традиционными монолитными космическими аппаратами, и они подчеркивали, среди прочего, важность надежности беспроводных линий связи между космическими аппаратами (узлами) для достижения этого прироста.

#### *Литература*

1. Zio E, Sansavini G (2001) Modeling Interdependent Network Systems for Identifying Cascade-Safe Operating Margins. IEEE T Reliab 60(1): 94-101.
2. Брусков А.А. Определение объема комплексных электрических испытаний наноспутников, Инновационные аспекты социально-экономического развития региона: сборник статей по материалам участников X Ежегодной научной конференции аспирантов «МГОТУ» (14 мая 2020 г., наукоград Королев). М.: Издательство «Научный консультант», 2020. 554 с.

УДК 621.396.96:621.26

## **Системный анализ моделирования точности совместного измерения двух информационных параметров сигнала**

**В.И. Воловач**, доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования,  
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

*Проведен системный анализ влияния мультипликативных помех, действующих одновременно с аддитивными помехами, на точность измерения двух информационных параметров полезного сигнала. Получены зависимости влияния мультипликативных помех на точность измерения частоты и времени прихода радиопульсов.*

Совместное измерение двух информационных параметров, мультипликативные помехи, «низкий» уровень помех, влияние мультипликативных помех на точность совместного измерения двух информационных параметров полезного сигнала.

## **System analysis of modeling the accuracy of joint measurement of two information parameters of a signal**

**V.I. Volovach**, doctor of technical Sciences, associate Professor,  
head of the Department «Information and electronic service»,  
State budgetary educational institution of higher education Volga region  
state University of service, Tolyatti

*The system analysis of the influence of multiplicative interference acting simultaneously with additive interference on the accuracy of measurement of two information parameters of the useful signal is carried out. The dependences of the influence of multiplicative interference on the accuracy of measuring the frequency and time of arrival of radio pulses are obtained.*

Joint change of two information parameters, multiplicative interference, «low» level of interference, influence of multiplicative interference on the accuracy of joint measurement of two information parameters of a useful signal.

**Введение.** Рассмотрим и проанализируем влияние мультипликативной (модулирующей) помехи (МП) на точность совместного измерения двух информационных параметров полезного сигнала. При этом будем полагать, что приемное устройство будет оптимальным при совместном измерении двух параметров сигнала на фоне аддитивных помех (АП) в виде белого шума. Тогда

$$\dot{U}_{\text{вх}}(t) = \dot{U}(t, l_0, p_0, \varphi_0) + N(t) \quad (1)$$

образует на выходе сигнал [4]

$$\Lambda(l, p) = \ln I_0[Z(l, p)], \quad (2)$$

где

$$Z(l, p) = \frac{1}{2} \left| \int_0^{T_n} \dot{U}_{\text{вх}}(t) U_0^*(t, l, p) dt \right| \quad (3)$$

– огибающая двумерной случайной функции параметров  $l, p$ .

В выражении (1)  $\dot{U}(t, l_0, p_0, \varphi_0)$  – комплексная огибающая сигнала с измеряемыми параметрами  $l, p$  ( $l_0, p_0$  – истинные значения параметров) и случайной начальной фазой  $\varphi_0$ ;  $N(t)$  – комплексная огибающая нормального шума.

Здесь, и далее, знак звездочка будет означать комплексно-сопряженную величину.

Как видно из выражения (3),  $Z(l, p)$  на выходе линейной части определяется [1]

$$Z(l) = \frac{1}{2} \left| \int_0^{T_n} \dot{N}(t) U_0(t, l) \exp\{-j\Phi(t, l)\} dt + \exp\{j\varphi_0\} \times \int_0^{T_n} U(t, l_0) U_0(t, l) \exp\{j[\Phi(t, l_0) - \Phi(t, l)]\} dt \right|, \quad (2)$$

где  $T_n$  – интервал наблюдения;  $U(t, l_0)$  – информационный сигнал;  $U_0(t, l)$  – опорный сигнал;  $\Phi(t, l_0)$  – закон фазовой модуляции сигнала;  $\Phi(t, l)$  – закон фазовой модуляции опорного сигнала.

Оценочные значения параметров находятся из системы уравнений правдоподобия [4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial l} \Lambda(l, p) &= \frac{\partial}{\partial l} Z(l, p) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial p} \Lambda(l, p) &= \frac{\partial}{\partial p} Z(l, p) = 0. \end{aligned} \quad (3a)$$

На рисунке 1 приведена структурная схема, реализующая выражения (2), (3), где И – интегратор; ДО – детектор огибающей; РУ – решающее устройство

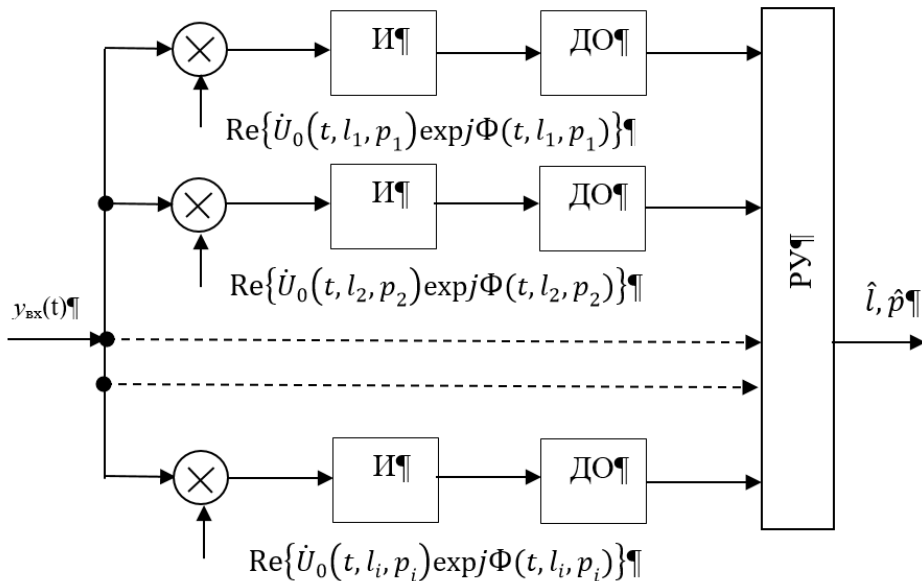


Рисунок 1 – Структурная схема оптимального приемного устройства

**Измерения двух информационных параметров при одновременном воздействии малых аддитивных и мультипликативных помех.** Если МП и АП малы, то, как и в случае измерения одного информационного параметра [1], огибающая сигнала может быть записана в виде

$$Z(l, p) \simeq \alpha_0 W(l - l_0, p - p_0) + \frac{\exp\{j\beta_0\} W_2^*(l - l_0, p - p_0) \dot{W}_1(l - l_0, p - p_0) + \alpha_0 W(l - l_0, p - p_0)}{\exp\{j(\varphi_0 + \beta_0)\} n_1^*(l - l_0, p - p_0) \dot{W}_1(l - l_0, p - p_0)} =$$

$$= \alpha_0 W(l - l_0, p - p_0) + n(l - l_0, p - p_0), \quad (4)$$

где  $n(l - l_0, p - p_0) = n_m(l - l_0, p - p_0) + n_a(l, p)$ , причем функции  $n_m(l - l_0, p - p_0)$  и  $n_a(l, p)$ , которые учитывают флуктуации огибающей, обусловленные АП и МП, соответственно, определяются вторыми и третьими слагаемыми в (4).

Функции

$$\dot{W}_1(l - l_0, p - p_0) = \alpha_0 W(l - l_0, p - p_0) \exp\{j\beta(l - l_0, p - p_0)\},$$

$$\dot{W}_2(l - l_0, p - p_0), \dot{n}_1(l - l_0, p - p_0) \text{ описываются выражениями}$$

$$\dot{W}_1(l - l_0, p - p_0) = \frac{\alpha_0}{2} \int_0^{T_H} \dot{U}(t, l_0, p_0) U_0^*(t, l, p) dt;$$

$$\dot{W}_2(l - l_0, p - p_0) = \frac{1}{2} \int_0^{T_H} \dot{V}(t) \dot{U}(t, l_0, p_0) U_0^*(t, l, p) dt;$$

$$\dot{n}_1(l - l_0, p - p_0) = \frac{1}{2} \int_0^{T_H} \dot{N}(t) U_0^*(t, l, p) dt,$$

где  $\dot{W}_1(l - l_0, p - p_0)$  и  $\dot{W}_2(l - l_0, p - p_0)$  определяют, соответственно, комплексные огибающие преобразованной линейной частью приемника неискаженной части сигнала и помеховой составляющей сигнала;  $\dot{n}_1(l)$  – комплексную огибающую преобразованного аддитивного шума;  $\dot{V}(t)$  – флуктуации функции помеховой модуляции (ФПМ).

Условие малости МП и АП, при котором справедливо соотношение (4), имеет вид:

$$[\alpha_0 W(l - l_0, p - p_0)]^{-2} \operatorname{Re}\{\exp\{j\beta_0\} W_2^*(l - l_0, p - p_0) \times \times \dot{W}_1(l - l_0, p - p_0) + \exp\{j(\varphi_0 + \beta_0)\} n_1^*(l - l_0, p - p_0) \times \times W_1(l - l_0, p - p_0)\} \ll 1. \quad (5)$$

Условие (5) должно выполняться в среднеквадратическом смысле.

Используя [4], можно показать, что при (5) оценки параметров  $l, p$  будут несмещенными, а дисперсии оценок

$$\sigma_l^2 = \frac{\left\{ \left( \frac{\partial n}{\partial l} \right)^2 \left( \frac{\partial^2 W}{\partial p^2} \right)^2 - 2 \frac{\partial n}{\partial l} \frac{\partial n}{\partial p} \frac{\partial^2 W}{\partial l \partial p} \frac{\partial^2 W}{\partial p^2} + \left( \frac{\partial^2 W}{\partial l \partial p} \right)^2 \left( \frac{\partial n}{\partial p} \right)^2 \right\}}{\alpha_0^2 \left[ \frac{\partial^2 W}{\partial l^2} \frac{\partial^2 W}{\partial p^2} - \left( \frac{\partial^2 W}{\partial l \partial p} \right)^2 \right]^2} \Bigg|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}}; \quad (6)$$

$$\sigma_p^2 = \frac{\left\{ \left( \frac{\partial n}{\partial p} \right)^2 \left( \frac{\partial^2 W}{\partial l^2} \right)^2 - 2 \frac{\partial n}{\partial l} \frac{\partial n}{\partial p} \frac{\partial^2 W}{\partial l^2} \frac{\partial^2 W}{\partial l \partial p} + \left( \frac{\partial n}{\partial l} \right)^2 \left( \frac{\partial^2 W}{\partial l \partial p} \right)^2 \right\}}{\alpha_0^2 \left[ \frac{\partial^2 W}{\partial l^2} \frac{\partial^2 W}{\partial p^2} - \left( \frac{\partial^2 W}{\partial l \partial p} \right)^2 \right]^2} \Bigg|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}} \quad (7)$$

Учитывая, что АП и МП не коррелированы, то есть

$$n_a(l, p) n_m(l - l_0, p - p_0) = 0,$$

выражения (6), (7) можно представить в виде

$$\sigma_l^2 = \sigma_{l.a}^2 + \sigma_{l.m}^2, \quad \sigma_p^2 = \sigma_{p.a}^2 + \sigma_{p.m}^2, \quad (8)$$

где  $\sigma_{l.a}^2, \sigma_{p.a}^2, \sigma_{l.m}^2, \sigma_{p.m}^2$  – дисперсии ошибок, обусловленных соответственно, АП и МП.

Дисперсии ошибок измерения, обусловленные АП и МП  $\sigma_{l.p.a}^2, \sigma_{l.p.m}^2$  определяются выражениями (6), (7) при подстановке в них вместо  $n(l, p)$  функций  $n_a(l, p)$  или  $n_m(l - l_0, p - p_0)$ , соответственно.

Вытекающие из (6), (7) выражения для  $\sigma_{l.a}^2, \sigma_{p.a}^2$  с точностью до постоянного множителя совпадают с выражениями для дисперсии ошибок совместного измерения двух параметров  $\sigma_{l_0}^2, \sigma_{p_0}^2$  в отсутствие МП и с учетом результатов [4] равны

$$\sigma_{l.a}^2 = \frac{\sigma_{l_0}^2}{\alpha_0^2} = - \frac{\frac{N_0}{2\sqrt{E}} \frac{\partial^2 W(l,p)}{\partial p^2}}{\alpha_0^2 \left[ \frac{\partial^2 W(l,p)}{\partial p^2} \frac{\partial^2 W(l,p)}{\partial l^2} - \left( \frac{\partial^2 W(l,p)}{\partial l \partial p} \right)^2 \right]^2} \Bigg|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}}, \quad (9)$$

$$\sigma_{p.a}^2 = \frac{\sigma_{p_0}^2}{\alpha_0^2} = - \frac{\frac{N_0}{2\sqrt{E}} \frac{\partial^2 W(l,p)}{\partial l^2}}{\alpha_0^2 \left[ \frac{\partial^2 W(l,p)}{\partial p^2} \frac{\partial^2 W(l,p)}{\partial l^2} - \left( \frac{\partial^2 W(l,p)}{\partial l \partial p} \right)^2 \right]^2} \Bigg|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}}. \quad (10)$$

Для нахождения дисперсии ошибок измерения  $\sigma_{l.m}^2, \sigma_{p.m}^2$ , обусловленных действием МП, необходимо найти функции

$$\left[ \frac{\partial}{\partial l} n_m(l - l_0, p - p_0) \right]^2 \Bigg|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}},$$

$$\frac{\partial}{\partial l} n_m(l - l_0, p - p_0) \frac{\partial}{\partial p} n_m(l - l_0, p - p_0) \Bigg|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}},$$

которые определяются на основе корреляционной функции помеховой составляющей сигнала, искаженного МП, на выходе рассматриваемого приемного устройства:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{\partial}{\partial l} n_m \right]^2 \Bigg|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}} = \\ & = \frac{\partial}{\partial l_1} \frac{\partial}{\partial l_2} n_m(l_1 - l_0, p - p_0) n_m(l_2 - l_0, p - p_0) \Bigg|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}} = \end{aligned}$$

$$= \frac{\partial}{\partial l_1} \frac{\partial}{\partial l_2} K_M(l_1, p_0, l_2, p_0) \Big|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}},$$

$$\frac{\partial}{\partial l} n_M \frac{\partial}{\partial p} n_M \Big|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}} = \frac{\partial^2}{\partial l \partial p} K_M(l, p, l, p) \Big|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}}.$$

Двумерная корреляционная функция  $K_M(l_1, p_1, l_2, p_2)$  находится теми же методами, что и одномерная корреляционная функция, рассмотренная в [1], и по аналогии равна:

$$K_M(l_1, p_1, l_2, p_2) = K_{M.1}(l_1, p_1, l_2, p_2) + K_{M.2}(l_1, p_1, l_2, p_2) =$$

$$= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) W(l_1 - l_0, p_1 - p_0, \Omega) W(l_2 - l_0, p_2 - p_0, \Omega) \times$$

$$\times \cos[\beta(l_1 - l_0, p - p_0) - \beta(l_2 - l_0, p - p_0) -$$

$$- \beta(l_1 - l_0, p_1 - p_0, \Omega) + \beta(l_2 - l_0, p_2 - p_0, \Omega)] d\Omega +$$

$$+ \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_D(\Omega) W(l_1 - l_0, p_1 - p_0, \Omega) W(l_2 - l_0, p_2 - p_0, \Omega) \times$$

$$\times \cos[\beta(l_1 - l_0, p - p_0) + \beta(l_2 - l_0, p - p_0) -$$

$$- \beta(l_1 - l_0, p_1 - p_0, \Omega) - \beta(l_2 - l_0, p_2 - p_0, \Omega)] d\Omega, \quad (11)$$

где  $W(l_i - l_0, i - p_0, \Omega)$ ,  $\beta(l_i - l_0, p_i - p_0, \Omega)$  – модуль и аргумент комплексной огибающей отклика линейной части приемного устройства оптимального измерителя на неискаженной МП сигнал с параметрами  $l_i$ ,  $p_i$  и сдвигом частоты  $\Omega$ , причем  $\beta(l_i - l_0, p_i - p_0) = \beta(l_i - l_0, p_i - p_0, \Omega = 0)$ .

После несложных, но громоздких преобразований получим:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial l} n_M \right]_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}}^2 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \left\{ \left[ \frac{\partial}{\partial l} W(l - l_0, 0, \Omega) \right]^2 + \right.$$

$$\left. + W(0, 0, \Omega)^2 \left[ \frac{\partial}{\partial l} \beta(l - l_0, 0) - \frac{\partial}{\partial l} \beta(l - l_0, 0, \Omega) \right]^2 \right\} \Big|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}} d\Omega +$$

$$+ \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_D(\Omega) \left\{ \left( \left[ \frac{\partial}{\partial l} W(l - l_0, 0, \Omega) \right]^2 - W(0, 0, \Omega)^2 \times \right. \right.$$

$$\times \left. \left[ \frac{\partial}{\partial l} \beta(l - l_0, 0) - \frac{\partial}{\partial l} \beta(l - l_0, 0, \Omega) \right]^2 \right) \times$$

$$\times \cos 2[\beta(0, 0) - \beta(0, 0, \Omega)] - 2 \frac{\partial}{\partial l} W(l - l_0, 0, \Omega) W(0, 0, \Omega) \times$$

$$\times \left[ \frac{\partial}{\partial l} \beta(l - l_0, 0) - \frac{\partial}{\partial l} \beta(l - l_0, 0, \Omega) \right] \times$$

$$\times \sin 2[\beta(0, 0) - \beta(0, 0, \Omega)] \Big|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}} d\Omega. \quad (12)$$

Заменой  $l$  на  $p$  из (12) получаем выражение для  $\left[ \frac{\partial}{\partial l} n_M \right]_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}}^2$ .

Далее имеем:

$$\frac{\partial n_M}{\partial l} \frac{\partial n_M}{\partial p} \Big|_{\substack{l=l_0 \\ p=p_0}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \left[ \frac{\partial}{\partial l} W(l, 0, \Omega) \frac{\partial}{\partial p} W(0, p, \Omega) + \right.$$

$$\left. + W(0, 0, \Omega) \frac{\partial^2}{\partial l \partial p} W(l, p, \Omega) \right] \Big|_{l=p=0} d\Omega +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_D(\Omega) \left\{ \frac{\partial}{\partial l} W(l, 0, \Omega) \frac{\partial}{\partial p} W(0, p, \Omega) \cos 2[\beta(0, 0) - \right. \\
 & - 2(0, 0, \Omega)] + W(0, 0, \Omega) \frac{\partial^2}{\partial l \partial p} W(l, p, \Omega) \cos 2[\beta(0, 0) - \\
 & - \beta(0, 0, \Omega)] - 2W(0, 0, \Omega) \frac{\partial}{\partial l} W(l, 0, \Omega) \frac{\partial}{\partial p} [\beta(0, p) - \\
 & - \beta(0, p, \Omega)] \sin 2[\beta(0, 0) - \beta(0, 0, \Omega)] - \\
 & - 2W(0, 0, \Omega) \frac{\partial}{\partial p} W(0, p, \Omega) \frac{\partial}{\partial l} [\beta(l, 0) - \beta(l, 0, \Omega)] \times \\
 & \times \sin 2[\beta(0, 0) - \beta(0, 0, \Omega)] - 2W^2(0, 0, \Omega) \frac{\partial}{\partial l} [\beta(l, 0) - \\
 & - \beta(l, 0, \Omega)] \frac{\partial}{\partial p} [\beta(0, p) - \beta(0, p, \Omega)] \cos 2[\beta(0, 0) - \\
 & - \beta(0, p, \Omega)] - W^2(0, 0, \Omega) \frac{\partial^2}{\partial l \partial p} [\beta(l, p) - \\
 & \left. - \beta(l, p, \Omega)] \sin 2[\beta(0, 0) - \beta(0, 0, \Omega)] \right\}_{l=l_0}^{p=p_0} d\Omega. \tag{13}
 \end{aligned}$$

Выражение для дисперсии ошибок совместного измерения двух параметров, обусловленных МП  $\sigma_{l,m}^2, \sigma_{p,m}^2$ , получаются путем подстановки (12), (13) в (6), (7). при совместном измерении двух параметров сигнала ошибки измерения могут быть коррелированными. Коэффициент корреляции ошибки определяется выражением

$$r_{l,p}(l, p) = \frac{(\overline{l^* - l_0})(\overline{p^* - p_0})}{\sigma_l \sigma_p} = \frac{\overline{\Delta l \Delta p}}{\sigma_l \sigma_p}, \tag{14}$$

где

$$\overline{\Delta l \Delta p} = \frac{\overline{\frac{\partial n \partial n}{\partial l \partial p} \frac{\partial^2 W \partial^2 W}{\partial l^2 \partial p^2} - \left(\frac{\partial n}{\partial p}\right)^2 \frac{\partial^2 W \partial^2 W}{\partial l \partial p \partial l^2} - \left(\frac{\partial n}{\partial l}\right)^2 \frac{\partial^2 W \partial^2 W}{\partial l \partial p \partial l^2} + \frac{\partial n \partial n}{\partial l \partial p} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial l \partial p}\right)^2}}{\alpha_0^2 \left[ \frac{\partial^2 W \partial^2 W}{\partial l^2 \partial p^2} - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial l \partial p}\right)^2 \right]^2} \Bigg|_{l=l_0}^{p=p_0}. \tag{15}$$

Учитывая, что  $n(l, p) = n_a(l, p) + n_m(l, p)$ ,

$\overline{n_a(l, p) n_m(l - l_0, p - p_0)} = 0$ , имеем

$$\overline{\Delta l \Delta p} = \overline{\Delta l_a \Delta p_a} + \overline{\Delta l_m \Delta p_m}, \tag{16}$$

причем в соответствии с результатами [4]

$$\overline{\Delta l_a \Delta p_a} = \frac{\frac{N_0 \partial^2 W}{2\sqrt{E} \partial l \partial p}}{\alpha_0^2 \left[ \frac{\partial^2 W \partial^2 W}{\partial l^2 \partial p^2} - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial l \partial p}\right)^2 \right]^2} \Bigg|_{l=l_0}^{p=p_0}, \tag{17}$$

а выражение для  $\overline{\Delta l_m \Delta p_m}$  получается путем подстановки (12), (13) в (15).

Общие выражения для дисперсий и коэффициента корреляции ошибок при совместном измерении двух параметров сигнала, искаженного МП, оказываются, как видно из приведенных выше соотношений, настолько громоздкими, что проанализировать их при произвольных измеряемых параметрах весьма за-



труднительно.

Проведем такой анализ для одного частного случая. Предположим, что один из измеряемых параметров, например,  $l$ , есть частота, а функцию  $W(0, p, \Omega)$  можно представить в виде

$$W(0, p, \Omega) = B_1(l + \Omega)B_2(p), \quad (18)$$

причем

$$\left. \frac{d}{dp} B_2(p) \right|_{p=0} = 0, \quad \left. \frac{d}{dl} B_2(l) \right|_{l=0} = 0. \quad (18a)$$

При этом ошибки измерения, обусловленные действием АП, не коррелированы  $\overline{\Delta l_a \Delta p_a} = 0$ .

Подстановка (18), (18a) в (9) дает:

$$\sigma_{l,a}^2 = - \left. \frac{1}{\alpha_0^2 q^2 \frac{d^2}{dl^2} \dot{\rho}(l,0)} \right|_{l=0}; \quad \sigma_{p,a}^2 = - \left. \frac{1}{\alpha_0^2 q^2 \frac{d^2}{dp^2} \dot{\rho}(p,0)} \right|_{p=0}, \quad (19)$$

где  $q^2 = 2E/N_0$ ;  $\dot{\rho}(\tau, \Omega)$  – автокорреляционная функция сигнала ( $\tau = l, p$ ;  $\Omega = 0$ ).

Сравнивая (19) с результатами, полученными в [1], видно, что при выполнении условий (18), (18a) составляющие  $\sigma_{l,a}^2$ ,  $\sigma_{p,a}^2$  дисперсии ошибок, обусловленных АП, при совместном измерении двух параметров равны соответствующей составляющей дисперсии измерения одного параметра. Однако условия (18), (18a) не обеспечивают некоррелированности ошибок измерения, обусловленных МП.

Для того чтобы при совместном измерении двух параметров дисперсии ошибок измерения, обусловленных МП  $\sigma_{l,m}^2$ ,  $\sigma_{p,m}^2$ , совпадали с дисперсиями ошибок, обусловленных МП при раздельном измерении параметров, дополнительно к (18), (18a) необходимо выполнение условия

$$\beta(l, p, \Omega) = cp(l + \Omega), \quad (20)$$

где  $c$  – постоянный коэффициент.

Путем подстановки (18), (18a), (20) в (12)-(14) нетрудно показать, что при одновременном выполнении указанных условий коэффициент корреляции ошибок, обусловленных наличием МП, равен нулю, а дисперсии ошибок совместного и раздельного измерения параметров становятся одинаковыми.

Таким образом, когда одним из совместно измеряемых параметров является частота, условия (18), (18a), (20) оказываются достаточными для того, чтобы ошибки измерения при наличии АП и МП были некоррелированными и имели дисперсии, равные дисперсиям ошибок при раздельном измерении каждого из параметров. Эти условия выполняются, например, при совместном измерении частоты и времени прихода радиоимпульсов с колоколообразной огибающей и постоянной частотой заполнения, а также с некоторыми приближениями [3] для фазоманипулированных сигналов.

Общие выражения для дисперсий и коэффициента корреляции ошибок измерения, обусловленных наличием МП, при совместном измерении двух параметров, как видно из вышеизложенного, оказываются весьма сложными. Однако в ряде случаев, например, при совместном измерении частоты и времени прихода

сигнала, их удается упростить.

**Точность совместного измерения частоты и времени прихода сигнала.** При совместном измерении частоты  $\omega$  ( $\omega = l - l_0$ ) и времени прихода  $\tau$  ( $\tau = p - p_0$ ) приемным устройством, оптимальным при приеме сигнала на фоне аддитивного белого шума, имеем

$$W(\tau, \omega, \Omega) \exp j\beta(\tau, \omega, \Omega) = \frac{\sqrt{E}}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_0 U_0^*(t - \tau) \exp j(\omega + \Omega)t dt, \quad (21)$$

причем для сигналов с четной функцией  $\Phi(t)$ , описывающей закон внутриимпульсной угловой модуляции,

$$\beta(\tau, \omega, \Omega) = \frac{1}{2} \tau(\omega + \Omega). \quad (22)$$

При условии, что сигнал целиком лежит внутри интервала наблюдения, и при соответствующем выборе начала его отсчета функции  $W(\tau, \omega, \Omega)$ ,  $\beta(\tau, \omega, \Omega)$  и их производные, входящие в (6)-(10), (12), (13), (15), (17) имеют вид

$$\begin{aligned} W(0, 0, \Omega) &= \sqrt{E} G_{ог}(\Omega); \beta(0, 0, \Omega) = \beta(0, 0) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial \omega} W(0, \omega, \Omega) \Big|_{\omega=0} &= G'_{ог}(\Omega); \\ \frac{\partial}{\partial \tau} \beta(\tau, \omega) \Big|_{\omega=0, \tau=0} &= \frac{\partial}{\partial \omega} \beta(\tau, \omega) \Big|_{\omega=0, \tau=0} = 0; \\ \frac{\partial}{\partial \tau} \beta(\tau, 0, \Omega) \Big|_{\tau=0} &= \frac{\Omega}{2}; \frac{\partial}{\partial \omega} \beta(0, \omega, \Omega) \Big|_{\omega=0} = 0; \\ \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} W(\tau, 0) \Big|_{\tau=0} &= -\bar{\Omega}^2 \sqrt{E}; \frac{\partial^2}{\partial \omega^2} W(0, \Omega) = -\bar{t}^2 \sqrt{E}; \\ \frac{\partial}{\partial \tau} W(\tau, 0, \Omega) \Big|_{\tau=0} &= \gamma(\Omega) \sqrt{E}, \end{aligned} \quad (23)$$

где  $G_{ог}(\Omega) = \frac{1}{2E} \int_{-\infty}^{\infty} U^2(t) \cos \omega t dt$  – нормированный спектр квадрата огибающей неискаженного сигнала [ $G_{ог}(\Omega) = |\dot{\rho}(0, \omega)|$ ],  $G'_{ог}(\Omega)$  – производная  $G_{ог}(\Omega)$  по  $\omega$ ;  $\gamma(\Omega)$  – функция от частоты.

Вычислим функцию  $\frac{\partial^2}{\partial \omega \partial \tau} W(\tau, \omega, \Omega)$ . Воспользовавшись результатами, представленными в [1], опуская промежуточные выкладки, последовательным дифференцированием по  $\omega$  и  $\tau$  получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial \omega \partial \tau} W(\tau, \omega, \Omega) \Big|_{\tau=0} &= -\sqrt{E} \frac{\frac{d}{d\omega} \operatorname{Re}\{\dots\} \frac{d}{d\tau} \operatorname{Re}\{\dots\} + \operatorname{Re}\{\dots\} \frac{\partial^2}{\partial \omega \partial \tau} \operatorname{Re}\{\dots\}}{2\sqrt{[\operatorname{Re}\{\dots\}]^2 + [\operatorname{Im}\{\dots\}]^2}} + \\ &+ \frac{\frac{d}{d\omega} \operatorname{Im}\{\dots\} \frac{d}{d\tau} \operatorname{Im}\{\dots\} + \operatorname{Im}\{\dots\} \frac{\partial^2}{\partial \omega \partial \tau} \operatorname{Im}\{\dots\}}{2\sqrt{[\operatorname{Re}\{\dots\}]^2 + [\operatorname{Im}\{\dots\}]^2}} - \\ &- \sqrt{E} \frac{(\operatorname{Re}\{\dots\} \frac{d}{d\omega} \operatorname{Re}\{\dots\} + \operatorname{Im}\{\dots\} \frac{d}{d\omega} \operatorname{Im}\{\dots\})(\operatorname{Re}\{\dots\} \frac{d}{d\tau} \operatorname{Re}\{\dots\} + \operatorname{Im}\{\dots\} \frac{d}{d\tau} \operatorname{Im}\{\dots\})}{2\sqrt{[\operatorname{Re}\{\dots\}]^2 + [\operatorname{Im}\{\dots\}]^2}}. \end{aligned} \quad (24)$$

Анализируя входящие в (24) функции, после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{\dots\} \Big|_{\tau=0} &= 2\sqrt{E} G_{ог}(\Omega); \operatorname{Im}\{\dots\} \Big|_{\tau=0} = 0; \\ \frac{d}{d\omega} \operatorname{Re}\{\dots\} \Big|_{\tau=0} &= 2\sqrt{E} G'_{ог}(\Omega)(\Omega); \frac{d}{d\omega} \operatorname{Im}\{\dots\} \Big|_{\tau=0} = 0; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\frac{d}{d\tau} \operatorname{Re}\{\dots\} \Big|_{\tau=0}^{\omega=0} = -2\sqrt{E}\gamma(\Omega); \quad \frac{\partial^2}{\partial\omega\partial\tau} \operatorname{Re}\{\dots\} \Big|_{\tau=0}^{\omega=0} = -2\sqrt{E}\gamma'(\Omega).$$

Подставляя (25) в (24), имеем

$$\frac{\partial^2}{\partial\omega\partial\tau} W(\tau, \omega, \Omega) \Big|_{\tau=0}^{\omega=0} = \sqrt{E}\gamma'(\Omega) + 2\sqrt{E} \frac{G'_{\text{ор}}(\Omega)}{G_{\text{ор}}(\Omega)} \gamma(\Omega). \quad (26)$$

Наконец, найдем функцию  $\frac{\partial^2}{\partial\omega\partial\tau} W(\tau, \omega) \Big|_{\tau=0}^{\omega=0}$ .

Учитывая, что  $G'_{\text{ор}}(\Omega) = 0$ , из (26) имеем

$$\frac{\partial^2}{\partial\omega\partial\tau} W(\tau, \omega) \Big|_{\tau=0}^{\omega=0} = \sqrt{E}\gamma'(0). \quad (27)$$

Отметим, что параметр

$$\gamma'(0) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} t U_0^2(t) \Phi'(t) dt \quad (28)$$

для широкополосных сигналов много больше единицы.

С учетом (21)-(28) после несложных соответствующих подстановок можно получить:

- дисперсии ошибок измерения, обусловленных наличием АП,

$$\sigma_{\omega.a}^2 = \frac{\Omega^2}{\alpha_0^2 q^2 \{\Omega^2 \bar{t}^2 - [\gamma'(0)]^2\}}, \quad (29)$$

$$\sigma_{\tau.a}^2 = \frac{\bar{t}^2}{\alpha_0^2 q^2 \{\Omega^2 \bar{t}^2 - [\gamma'(0)]^2\}}, \quad (30)$$

- дисперсия ошибок измерения, обусловленных наличием МП,

$$\begin{aligned} \sigma_{\omega.a}^2 &= \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [G_V(\Omega) + G_D(\Omega)]}{2\alpha_0^2 \{\Omega^2 \bar{t}^2 - [\gamma'(0)]^2\}^2} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{\{(\bar{\Omega}^2)^2 [G'_{\text{ор}}(\Omega)]^2 + 4\bar{\Omega}^2 \gamma'(0) [G_{\text{ор}}(\Omega) \gamma'(0) + G'_{\text{ор}}(\Omega) \gamma(\Omega)]\} d\Omega}{+} \\ &+ \frac{[\gamma'(0)]^2 \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \left[ \gamma^2(\Omega) + \frac{\Omega^2}{4} G_{\text{ор}}^2(\Omega) \right] d\Omega + \right.}{2\alpha_0^2 \{\Omega^2 \bar{t}^2 - [\gamma'(0)]^2\}^2} \rightarrow \\ &\left. \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_D(\Omega) \left[ \gamma^2(\Omega) - \frac{\Omega^2}{4} G_{\text{ор}}^2(\Omega) \right] d\Omega}{\right\}} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\omega.a}^2 &= \frac{(\bar{t}^2)^2 \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \left[ \gamma^2(\Omega) + \frac{\Omega^2}{4} G_{\text{ор}}^2(\Omega) \right] d\Omega + \right.}{2\alpha_0^2 \{\Omega^2 \bar{t}^2 - [\gamma'(0)]^2\}^2} \rightarrow \\ &\left. \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_D(\Omega) \left[ \gamma^2(\Omega) - \frac{\Omega^2}{4} G_{\text{ор}}^2(\Omega) \right] d\Omega}{\right\}} + \\ &+ \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [G_V(\Omega) + G_D(\Omega)] \{ [\gamma'(0)]^2 [G'_{\text{ор}}(\Omega)]^2 + \right.}{2\alpha_0^2 \{\Omega^2 \bar{t}^2 - [\gamma'(0)]^2\}^2} \rightarrow \\ &\left. \frac{4\bar{t}^2 \gamma'(0) [G_{\text{ор}}(\Omega) \gamma'(0) + G'_{\text{ор}}(\Omega) \gamma(\Omega)] d\Omega}{\right\}} \end{aligned} \quad (32)$$

Выражение (31), (32) существенно упрощаются при измерениях частоты и времени прихода сигналов без угловой модуляции ( $\Phi(t) = 0$ ).

Таким образом, для сигналов без угловой модуляции ошибки измерения частоты и времени прихода оказываются одинаковыми как при раздельном измерении параметров, так и при совместном измерении.

Вычисление коэффициента корреляции ошибок для данного случая по (14) показывает, что ошибки измерения не коррелированы.

Данный пример подтверждает сформулированный выше общий вывод о характеристиках совместного и раздельного измерения параметров при отсутствии корреляции ошибок измерения.

Выражения для дисперсии ошибок совместного измерения частоты и времени прихода (31), (32) могут быть упрощены также для случаев, когда МП являются медленными или быстрыми.

При медленных МП функции  $G_V(\Omega)$ ,  $G_D(\Omega)$  изменяются значительно быстрее, чем все остальные подынтегральные функции в (31), (32). Тогда функции  $G_{ог}(\Omega)$ ,  $\gamma(\Omega)$  и их производные под знаком интеграла можно разложить в ряд Тейлора по  $\Omega$ .

Ограничиваясь в указанном разложении членами порядка  $\overline{\Omega^2}$  и учитывая соотношения

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_V(\Omega) d\Omega &= B_V''(0), \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 \dot{G}_D(\Omega) d\Omega &= -\dot{B}_V''(0), \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) d\Omega &= B_V(0), \quad \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{G}_D(\Omega) d\Omega = -\dot{G}_V(0), \end{aligned}$$

получим

$$\begin{aligned} \sigma_{\omega,м}^2 &= \frac{-B_{V\Sigma}''(0)\{(\overline{\Omega^2 t^2})^2 + 2\overline{\Omega^2} \gamma'(0) \gamma'''(0) + 6\overline{\Omega^2 t^2} [\gamma'(0)]^2 + [\gamma'(0)]^4\} +}{2\alpha_0^2 \{\overline{\Omega^2 t^2} - [\gamma'(0)]^2\}^2} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+4B_{V\Sigma}(0) \overline{\Omega^2} [\gamma'(0)]^2 - \frac{1}{4} B_{Vp}''(0) [\gamma'(0)]^2}{}, \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau,м}^2 &= \frac{-2B_{V\Sigma}''(0)\{4(\overline{t^2})^2 [\gamma'(0)]^2 + \overline{t^2} \gamma'(0) \gamma'''(0)\} -}{2\alpha_0^2 \{\overline{\Omega^2 t^2} - [\gamma'(0)]^2\}^2} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{-\frac{1}{4} B_{Vp}''(0) (\overline{t^2})^2 + 4B_{V\Sigma}(0) \overline{t^2} [\gamma'(0)]^2}{}. \end{aligned} \quad (34)$$

В (33), (34) обозначено:

$$B_{V\Sigma}(0) = B_V(0) + B_D(0), \quad B_{Vp}(0) = B_V(0) - B_D(0).$$

В случае быстрый МП функции  $G_V(\Omega)$ ,  $G_D(\Omega)$  в (31), (32) изменяются медленно по сравнению с другими подынтегральными функциями. Для получения приближенных формул в этом случае можно разложить в ряд по степеням  $\Omega$  функции  $G_V(\Omega)$ ,  $G_D(\Omega)$  и провести необходимые преобразования, аналогичные [1]. однако получающиеся в результате указанных преобразований формулы оказываются весьма громоздкими и поэтому здесь приводиться не будут.

**Точность совместного измерения частоты и времени прихода частотно-модулированного (ЧМ) сигнала.** При совместном измерении частоты  $\omega$  и времени прихода  $\tau$  ЧМ радиосигнала с комплексной огибающей

$$\dot{U}(t, \tau, \omega) = \exp \left[ -\frac{\pi(t-\tau)^2}{T^2} - j \frac{\Delta\Omega_d(t-\tau)^2}{2T} + j\omega t \right]$$

большая часть функций, входящих в (29)-(32) определены в [1, 2]. Определим функции  $\gamma'(\Omega)$ ,  $\gamma'(0)$ .

Опуская промежуточные выкладки, имеем

$$\gamma'(\Omega) = \frac{d}{d\Omega} \left[ \frac{Q_y \Omega}{2} \exp\left(\frac{\Omega^2 T^2}{8\pi}\right) \right] = \frac{Q_y}{2} \left( 1 - \frac{\Omega^2 T^2}{4\pi} \right) \exp\left(\frac{\Omega^2 T^2}{8\pi}\right), \quad (35)$$

$$\gamma'(0) = \frac{Q_y}{2},$$

где  $Q_y = T \Delta \Omega_d / 2\pi$  – коэффициент укорочения импульса оптимальным фильтром;  $T = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{U}(t)| dt$  – эквивалентная длительность сигнала;  $\Delta \Omega_d$  – девиация частоты за время  $T$ .

Подставляя (35) в (29), (30), после необходимых преобразований, получаем:

$$\sigma_{\omega,a}^2 = \frac{4\pi(1-Q_y^2)}{\alpha_0^2 q^2 T^2} = \frac{\sigma_{\omega,0}^2}{\alpha_0^2}, \quad \sigma_{\tau,a}^2 = \frac{T^2}{\alpha_0^2 \pi q^2} = \frac{\sigma_{\tau,0}^2}{\alpha_0^2}, \quad (36)$$

$$\text{где } q^2 = T/N_0 \sqrt{2}.$$

Сравнивая (36) с выражениями для дисперсий ошибок измерения, обусловленных АП, при раздельном измерении параметров видим, что при совместном измерении частоты и времени прихода ЧМ радиоимпульса дисперсии ошибок измерения, обусловленных АП, возрастают в  $(1 + Q_y^2)$  раз по сравнению со случаем раздельного измерения параметров, причем дисперсия ошибок измерения времени прихода оказывается такой же, как и при измерении времени прихода немодулированного радиоимпульса длительностью  $T$  с колоколообразной огибающей. Это обусловлено линейной зависимостью между сдвигами по частоте и по задержке, характерной для функции автокорреляции сигналов с линейной частотной модуляцией.

Дисперсия ошибок измерения частоты и времени прихода, обусловленные МП, для рассматриваемого примера определяются выражениями

$$\begin{aligned} \sigma_{\omega,m}^2 = & q^2 (1 + Q_y^2) \frac{\sigma_{\omega,0}^2}{\alpha_0^2} \left[ \frac{T^2}{16\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_{\Sigma}(\Omega) \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi}\right\} d\Omega + \right. \\ & + 2 \frac{Q_y^2}{1+Q_y^2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\Sigma}(\Omega) \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi}\right\} d\Omega + \\ & + \frac{Q_y^2}{1+Q_y^2} \frac{T^2}{16\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_V(\Omega) \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi}\right\} d\Omega + \\ & \left. + \frac{T^2}{16\pi^2} \frac{Q_y^2(Q_y^2-1)}{(Q_y^2+1)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_D(\Omega) \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi}\right\} d\Omega \right], \quad (37) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau,m}^2 = & q^2 (1 + Q_y^2) \frac{\sigma_{\tau,0}^2}{2\pi \alpha_0^2} \left[ \frac{T^2}{8\pi^2} \frac{Q_y^2}{1+Q_y^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_{\Sigma}(\Omega) \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi}\right\} d\Omega + \right. \\ & + 2 \frac{Q_y^2}{1+Q_y^2} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\Sigma}(\Omega) \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi}\right\} d\Omega + \\ & + \frac{T^2}{8\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_V(\Omega) \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi}\right\} d\Omega + \\ & \left. + \frac{T^2}{8\pi} \frac{Q_y^2-1}{Q_y^2+1} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_D(\Omega) \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi}\right\} d\Omega \right], \quad (38) \end{aligned}$$

где  $G_V(\Omega)$ ,  $G_D(\Omega)$ ,  $G_{\Sigma}(\Omega) = G_V(\Omega) + G_D(\Omega)$  определяются так же как в [1].

Из (37), (38) непосредственно следует, что при  $Q_y^2 \rightarrow 0$  выражения для дисперсии ошибок измерения частоты  $\sigma_{\omega,m}^2$  и времени прихода радиоимпульсов  $\sigma_{\tau,m}^2$ , обусловленных действием МП, при их совместном измерении, как и следо-

вало ожидать, совпадают с соответствующими выражениями для дисперсии ошибок измерения при раздельном измерении этих параметров [1].

При  $Q_y^2 \gg 1$ , что является характерным для практики использования ЧМ сигналов, в случае совместного измерения частоты и времени прихода имеем

$$\begin{aligned} \sigma_\omega^2 &= \sigma_{\omega,a}^2 + \sigma_{\omega,m}^2 = \sigma_{\omega,0}^2 \eta_{\omega,m}; \\ \sigma_\tau^2 &= \sigma_{\tau,a}^2 + \sigma_{\tau,m}^2 = \sigma_{\tau,0}^2 \eta_{\tau,m}, \end{aligned} \quad (39)$$

где коэффициенты  $\eta_{\omega,m}$ ,  $\eta_{\tau,m}$ , показывающие степень увеличения дисперсии ошибок измерения за счет действия МП, определяются выражениями

$$\begin{aligned} \eta_{\omega,m} = \eta_{\tau,m} &= \frac{1}{\alpha_0^2} \left\{ 1 + q^2 Q_y^2 \left[ \frac{T^2}{8\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_\Sigma(\Omega) \exp \left\{ -\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi} \right\} d\Omega + \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Sigma(\Omega) \exp \left\{ -\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi} \right\} d\Omega \right] \right\}. \end{aligned} \quad (40)$$

Из (40) следует, что при совместном измерении частоты и времени прихода широкополосного ЧМ сигнала влияние МП значительно сильнее, чем при раздельном измерении этих параметров. Дисперсия ошибок измерения  $\sigma_{\omega,m}^2$ ,  $\sigma_{\tau,m}^2$  увеличивается более чем в  $2Q_y^2$  раз.

Определим коэффициент ошибок измерения. Для этого, в соответствии с (14), найдем величину  $\overline{\Delta l \Delta p}$ . В случае рассматриваемого в данном примере ЧМ сигнала

$$\begin{aligned} \overline{\Delta l \Delta p} &= \overline{\Delta \tau \Delta \omega} = \frac{2Q_y}{\alpha_0^2 q^2} \left\{ 1 + q^2 (1 + Q_y^2) \times \right. \\ &\times \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Sigma(\Omega) \exp \left\{ -\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi} \right\} d\Omega + \right. \\ &+ \frac{T^2}{16\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_V(\Omega) \exp \left\{ -\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi} \right\} d\Omega + \\ &+ \frac{Q_y^2 - 1}{Q_y^2 + 1} \frac{T^2}{16\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_D(\Omega) \exp \left\{ -\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi} \right\} d\Omega + \\ &+ \frac{Q_y^2}{1 + Q_y^2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Sigma(\Omega) \exp \left\{ -\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi} \right\} d\Omega + \\ &\left. \left. + \frac{T^2}{16\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_\Sigma(\Omega) \exp \left\{ -\frac{\Omega^2 T^2}{4\pi} \right\} d\Omega \right] \right\}. \end{aligned} \quad (41)$$

При  $Q_y^2 \gg 1$   $\overline{\Delta l \Delta p} = \frac{2Q_y}{\alpha_0^2 q^2} \eta_{\omega,m}$ , а коэффициент корреляции ошибок измерения, как следует из (14), (40), (41), с ростом коэффициента укорочения  $Q_y$  стремиться к единице.

Таким образом, рассматриваемый пример совместного измерения частоты и времени прихода ЧМ сигнала является предельным в том смысле, что коэффициент корреляции ошибок измерения близок к единице. Другой крайний случай, когда коэффициент корреляции ошибок измерения равен нулю, был рассмотрен выше, сигналы без угловой модуляции.

Пусть  $Q_y \gg 1$ , а МП представляю собой малые фазовые искажения с колоколообразной функцией корреляции. Тогда для ЧМ импульса с колоколообразной огибающей из (40), имеем

$$\eta_{\tau,m} = \eta_{\omega,m} = \left[ 1 - \sigma_\varphi^2 + \frac{1}{2} \sigma_\varphi^4 \right]^{-1} \left[ 1 + q^2 Q_y^2 \sigma_\varphi^4 \frac{2 + 5\xi_\varphi^2}{(1 + \xi_\varphi^2)^{3/2}} \right], \quad (42)$$

где  $\sigma_\varphi^2$  – дисперсия фазовых искажений;  $\xi_\varphi = T \Delta \Omega_\varphi / 2\pi$ .

На рисунке 1 приведена зависимость  $\eta_{\omega,м}(\xi_\varphi)$  при  $\sigma_\varphi^2 = \text{const}$ ,  $q^2 Q_y^2 = \text{const}$ .

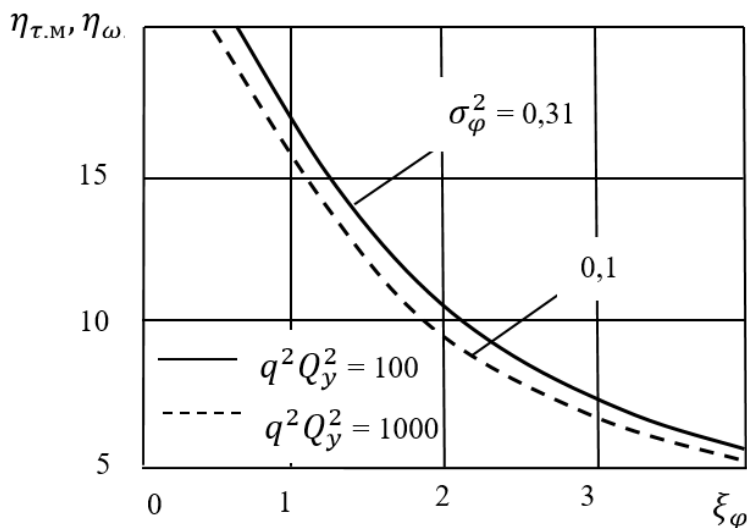


Рисунок 1 – Зависимости  $\eta_{\omega,м} = f(\xi_\varphi)$  при  $\sigma_\varphi^2 = q^2 Q_y^2 = \text{const}$

**Выводы.** Проведен системный анализ точности совместного измерения двух информационных параметров сигнала при наличии аддитивных и мультипликативных помех. Рассмотрены примеры совместного измерения частоты и времени прихода частотно-модулированного сигнала для двух предельных случаев, когда коэффициент корреляции ошибок измерения близок к единице и равен нулю. Получены зависимости для дисперсии ошибок измерения частоты и времени прихода радиоимпульсов, обусловленных действием мультипликативных помех.

#### Литература

1. Артющенко В.М., Воловач В.И. Точность измерения информационного параметра сигнала в авиационных и ракетно-космических радиосистемах при наличии аддитивных и мультипликативных помех с низким уровнем // Информационно-технологический вестник. 2020. № 1(23). С.3-12.
2. Артющенко В.М., Воловач В.И. Точность измерения информационного параметра сигнала в авиационных и ракетно-космических радиосистемах при наличии аддитивных и мультипликативных помех с низким уровнем. Часть 1. // Информационно-технологический вестник. 2020. № 2(24). С. 24-34.
3. Докторов А.Л. Спектры и совместная корреляционная функция модуляции сигналов с фазовой манипуляцией // Электросвязь. 1966. № 7.
4. Куликов Е.И. Вопросы оценок параметров сигналов при наличии помех // М.: Советское радио. 1969. 244 с.
5. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов // М.: Изд-во иностранной литературы. 1963. 432 с.

УДК 004.772

## **Модернизация программного обеспечения для измерения показателей качества сетевого трафика в корпоративной сети предприятия**

**Е.Е. Истратова**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры автоматизированных систем управления,  
**Е.Н. Антонянц**, студент 3 курса,  
**А.О. Амельченко**, студент 3 курса,  
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),  
г. Новосибирск

*В статье представлены результаты модернизации ранее разработанного клиент-серверного приложения для исследования характеристик корпоративной сети. Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод о том, что усовершенствованный программный продукт можно применять для сбора статистических данных о характеристиках сетевого подключения при передаче информации в корпоративной сети компании.*

Программное обеспечение, модернизация, сетевой трафик, передача данных.

## **Modernization of the software for measuring the quality of network traffic in the corporate network of the enterprise**

**E.E. Istratova**, Ph.D., Associate Professor of the Automated Control Systems Department,  
**E.N. Antonyants**, 3rd year student,  
**A.O. Amelchenko**, 3rd year student,  
Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk

*The article presents the results of the modernization of a previously developed client-server application for the study of the characteristics of the corporate network. The results of the conducted research allowed us to conclude that the improved software product can be used to collect statistical data on the characteristics of the network connection when transmitting information in the corporate network of the company.*

Software, upgrades, network traffic, data transmission.

В настоящее время в качестве одного из наиболее распространенных и одновременно востребованных направлений развития информационных технологий можно назвать сетевые технологии. Это связано с тем, что они охватывают существенный спектр услуг и являются достаточно доступными, что, в свою очередь, приводит существенному росту объемов сетевого трафика.

Одной из базовых особенностей планирования и последующей разработ-



ки корпоративной сети компании является анализ характеристик сетевого подключения, основанный на проводимом периодически мониторинге сетевого трафика.

Оценка отдельных характеристик сетевого трафика может осуществляться как на основе реальных экспериментальных данных, так и при помощи процесса моделирования физических величин и механизмов. Причем оба эти направления могут быть реализованы при помощи анализа сетевого трафика в современных мультисервисных сетях. Для решения данной задачи необходимы сбор, обработка и анализ таких статистических показателей, как объем передаваемых данных и скорость данной передачи. Сбор подобной статистики осуществляется различными программными средствами.

На основе проведенного литературного обзора были определены наиболее распространенные программные продукты для захвата и анализа сетевого трафика, к которым относятся следующие: Wireshark [1], Bandwidth Monitor Pro [2], tcpdump [3].

В результате проведенного сравнительного анализа указанных программных продуктов можно выделить программу для анализа сетевого трафика Wireshark, обладающую максимальным функционалом. Однако данный анализатор является слишком громоздким для анализа трафика локальных сетей небольших и средних предприятий. Программа Bandwidth Monitor Pro ориентирована на работу с небольшими сетями предприятий, но не обладает всем необходимым инструментарием для сбора необходимых характеристик сетевого трафика. Программный продукт tcpdump по своему функционалу уступает в случае повышенных требований к анализу качества сетевого подключения, которые предъявляются при проведении исследования сетевого трафика в корпоративных сетях или в научных целях.

Помимо указанных наиболее распространенных программных продуктов, были рассмотрены также и другие анализаторы сетевого трафика. Так, в статье [4] предлагается решение для анализа сетевого трафика в операционных системах WINDOWS, а также дается описание его инструментов, позволяющих выявить определенную избыточность сетевой активности. Кроме того, в исследовании представлены результаты сравнительного анализа данного решения с наиболее распространёнными программными продуктами, выполняющими функции мониторинга сетевого трафика.

Статья [5] рассматривает разнообразие инструментов, применяемых для решения практических задач, связанных с анализом трафика. В настоящее время спектр инструментов очень широк – при этом каждый из них использует собственные алгоритмы разбора трафика и оперирует над своим внутренним представлением разобранных сетевых пакетов.

В литературном источнике [6] приводится сравнительный анализ основных из существующих на сегодняшний день методов анализа сетевого трафика. Если необходимо проанализировать небольшой трафик, то для этого рекомендуется использование бесплатных программ-снифферов. Если же речь идет о

больших данных, то предполагается применение совокупности статистических методов или нейронной сети. Кроме того, анализ с помощью нейронных сетей – довольно перспективное и развивающееся направление, которое на сегодняшний день себя довольно хорошо зарекомендовало.

В работе [7] рассмотрены различные анализаторы сетевых протоколов с точки зрения применяемых в них способов перехвата сетевого трафика, а также продемонстрированы примеры практического применения программного инструмента Wireshark с учетом его ключевых преимуществ и недостатков.

В статье [8] рассмотрены проблемы анализа сетевого трафика, приведена их актуальность, а также изучены различные методы сбора пакетов через сеть Интернет, такие как: фильтрация и создание потоков для последующего анализа. По итогам исследования было получено системное представление о процессе анализа сетевого трафика.

В работе [9] был проведен анализ сетевого трафика локальной сети при помощи снифферов. На основании проведенного изучения основных понятий и определений компьютерных сетей, анализаторов трафика, назначения и принципа работы анализаторов трафика был проведен обзор и настройка анализатора трафика Wireshark.

В литературном источнике [10] приведен пример разработки программы, позволяющей захватывать сетевые пакеты, проходящие через выбранный сетевой интерфейс, что позволяет пользователю просматривать заголовки и содержимое пакетов.

Помимо изучения функционала программ для анализа сетевого трафика, также необходимо учитывать собираемые и анализируемые с их помощью показатели сетевого трафика, непосредственно влияющие на качество передачи данных в корпоративной сети предприятия. Так, в статье [11] в качестве ключевых показателей производительности сети были изучены следующие: задержка, сквозная задержка, пропускная способность и количество потерянных пакетов. Эти показатели оценивались на базовой станции по протоколам TCP, SCTP, DCCP и UDP по технологии 4G-LTE.

Основной целью работы в литературном источнике [12] является анализ производительности VoIP-приложения в беспроводных сетях с учетом различных протоколов транспортного уровня и аудиокодека. Для оценки производительности VoIP было рассмотрено несколько критериев QoS, таких как: пропускная способность, сквозная задержка, изменение величины задержки пакетов и значение коэффициента потери пакетов.

Приведенные выше характеристики сетевого подключения были исследованы ранее на сетевых симуляторах для анализа и оценки производительности транспортных протоколов TCP, UDP, DCCP, SCTP и TFRC. Так, в статье [13] данные протоколы были рассмотрены с точки зрения скорости сквозной задержки, пропускной способности скорости, коэффициента доставки пакетов и количества потерянных пакетов.

В работе [14] оценивается производительность UDP, DCCP, SCTP и TFRC для различных потоков трафика: передачи данных, видеотрафика и VOIP в проводных сетях. Критерии производительности, используемые для этой оценки, включают пропускную способность, сквозную задержку и количество потерянных пакетов.

Таким образом, на основе проведенного литературного обзора различных программ для анализа трафика в сетях были выявлены основные показатели сетевого трафика, оказывающие влияние на качество подключения в корпоративной сети предприятия. Как правило, данные характеристики применяются для оценки и анализа производительности транспортных протоколов TCP и UDP. К ним относятся следующие:

4. задержка передачи данных;
5. скорость передачи данных;
6. сквозная задержка передачи данных;
7. коэффициент доставки пакетов;
8. коэффициент потери пакетов.

Задержка (ping) принимает ответ от сервера, останавливает таймер и определяет затраченное на передачу данных время.

Скорость (speed, S) принимает от сервера значение времени, затраченного на принятие всех пакетов, и может быть рассчитана следующим образом (1):

$$S = \frac{V}{t} \quad (1)$$

где V – это объем передаваемых данных, t – это время, затраченное на прием всех пакетов.

Сквозная задержка (e2e delay, D) – это время успешной передачи пакета данных по сети от источника к месту назначения, вычисляется следующим образом (2):

$$D = t_n - t_o \quad (2)$$

где  $t_n$  – время доставки пакета,  $t_o$  – время отправки пакета.

Коэффициент доставки пакетов (DK) – это соотношение числа пакетов данных, транспортируемых к месту назначения, к числу тех, которые транспортируются источниками. Коэффициент доставки пакетов рассчитывается по формуле (3):

$$DK = \frac{K_n}{K_o} \quad (3)$$

где  $K_n$  – количество полученных пакетов,  $K_o$  – количество отправленных пакетов.

Коэффициент потери пакетов (PL) – это разница между переданными и полученными пакетами данных. Коэффициент потери пакетов рассчитывается по формуле (4):

$$PL = K_o - K_n \quad (4)$$

Цель работы заключалась в модернизации разработанного ранее программного обеспечения для измерения показателей качества сетевого трафика в корпоративной сети предприятия.

Исходный программный продукт [15] разработан на объектно-ориентированном языке программирования C# с использованием технологии сокетов для моделирования процесса передачи сообщений при помощи транспортного протокола TCP. Данное программное обеспечение позволяет собирать статистику по скорости передачи данных и величине задержки сетевого трафика. Имеющиеся функциональные возможности являются недостаточно обширными для проведения исследований и анализа качества сетевого подключения, в связи с чем было принято решение о необходимости модернизации данного программного продукта.

Для реализации возможности добавления новых метрик было решено изменить схему взаимодействия клиента и сервера на более универсальную. На рисунке 1 представлена схема взаимодействия клиента и сервера в предыдущей версии программы.

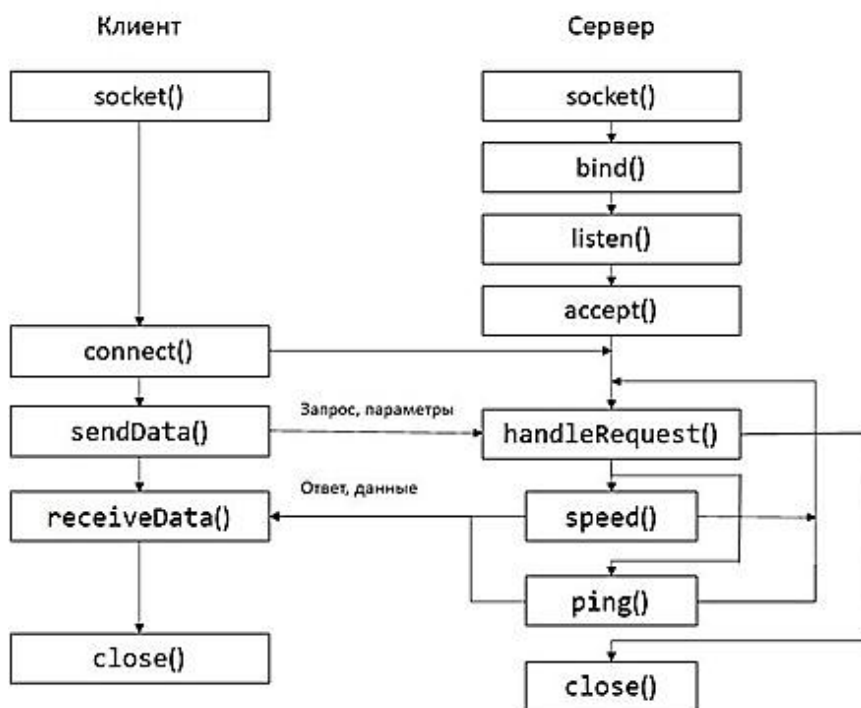


Рисунок 1 – Схема работы исходного программного продукта

Принцип работы исходной программы включает последовательное выполнение следующих действий. Клиент посылает серверу запрос на измерение характеристики сети и при необходимости передает параметры измерения. Для измерения скорости параметрами являются общий размер передаваемых данных и размер каждого отдельного пакета. В зависимости от принятых данных, сервер совершает определенные действия, например, в случае измерения задержки передачи данных, сервер просто отправляет пустой пакет клиенту для измерения времени между отправкой запроса и получением ответа. В случае измерения скорости, сервер принимает все пакеты от клиента, а только потом посылает ответ, содержащий информацию о затраченном на отправку времени.

На рисунке 2 представлена модернизированная схема взаимодействия клиента и сервера в новой версии программы.

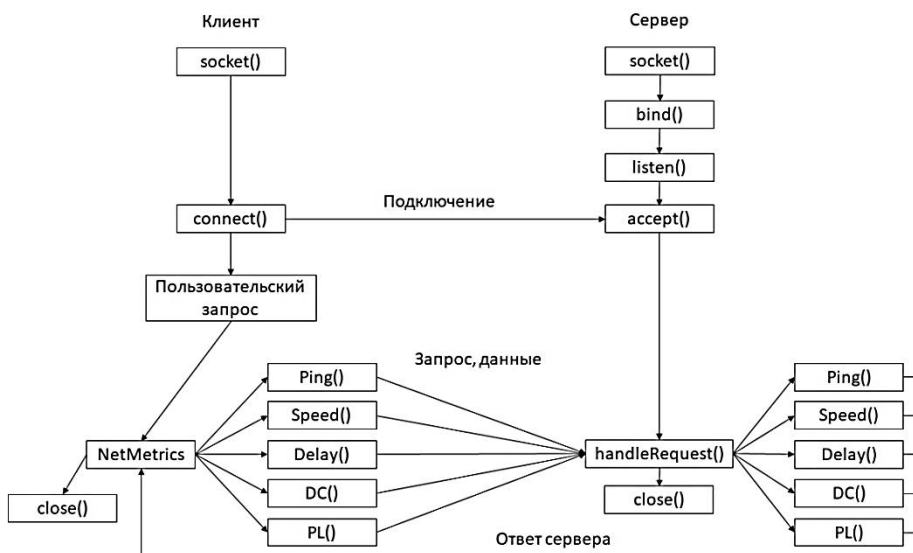
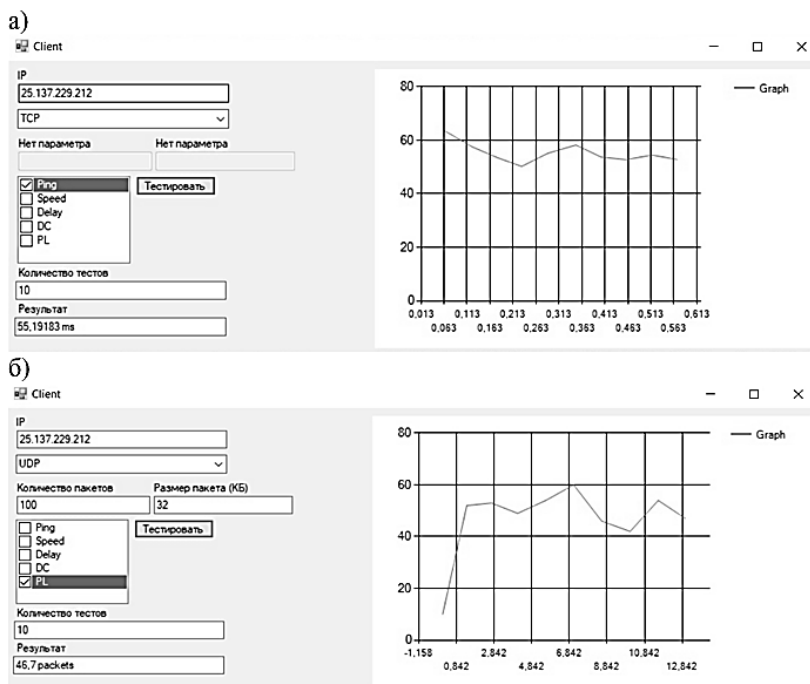


Рисунок 2 – Схема работы модернизированного программного продукта

Принцип работы модернизированной программы заключается в том, что клиент посылает серверу запрос на измерение определенной метрики и необходимые параметры измерения. После подтверждения готовности сервера начинается непосредственное измерение требуемых показателей. Результаты измерения сохраняются в клиентском приложении. Параметры нужного измерения, как и само измерение, выбираются пользователем в соответствующей форме. Изначально в текстовых полях записываются параметры измерений по умолчанию. За один запрос от пользователя на измерение метрики происходит несколько реальных измерений, количество которых можно задать. В результате заполняются два массива: результаты конкретной метрики и отметки времени, когда был получен данный результат. Из полученных массивов строятся графики: по горизонтальной оси откладывается время, по вертикальной – результат измерения. В качестве результата работы программы пользователь

получает вывод исходных данных, полученных измеренных значений и их среднее значение.

В целях расширения функциональных возможностей программы также была внедрена передача данных при помощи протокола транспортного уровня UDP. Скриншоты работы модернизированного программного продукта представлены на рисунке 3.

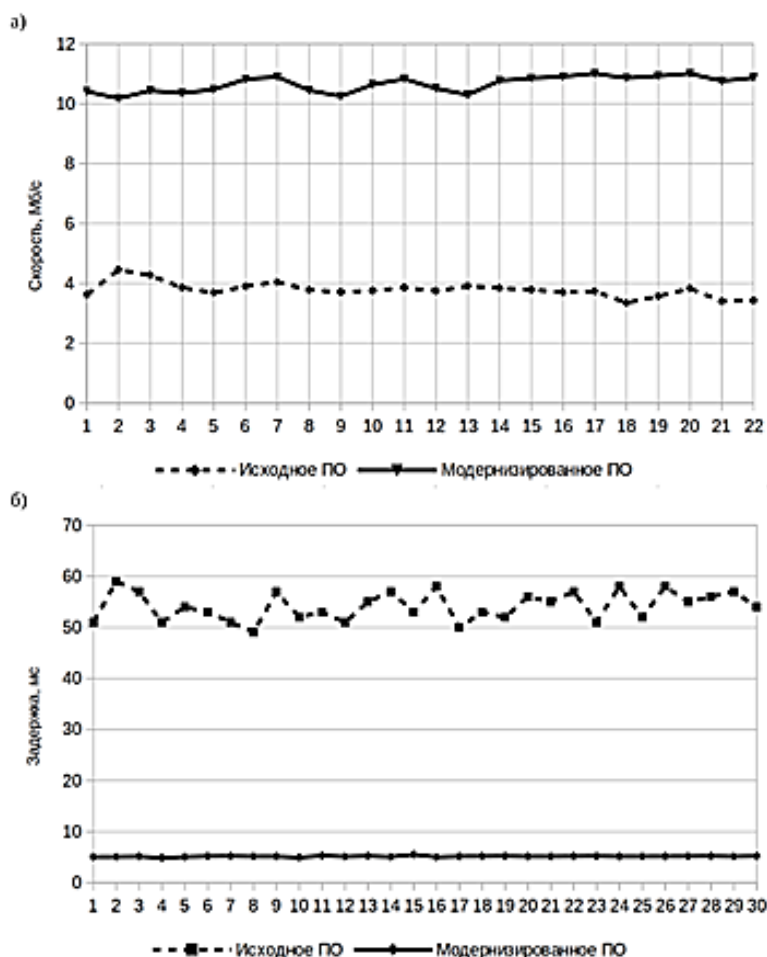


**Рисунок 3 – Результаты работы клиентской стороны программы: результаты измерения задержки при передаче данных по протоколу TCP (3а) и результаты измерения величины потери пакетов при передаче данных по протоколу UDP (3б)**

Таким образом, модернизация привела значительному расширению функционала программного обеспечения. Разработанный программный продукт можно применять для сбора статистических данных о характеристиках сетевого подключения при передаче информации в корпоративной сети компании. Это позволит исследовать протоколы транспортного уровня по таким характеристикам, как: задержка, скорость, сквозная задержка, коэффициент доставки пакетов, коэффициент потери пакетов.

После окончания процесса модернизации, готовый программный продукт был протестирован с точки зрения качества сетевого подключения. Результаты исследования были сопоставлены с данными, полученными при оценке исходного программного обеспечения.

На рисунке 4 приведены графики, иллюстрирующие скорость передачи данных и задержку пакетов в исходной и модернизированной программах.



**Рисунок 4 – Результаты сопоставления параметров сети в исходном и модернизированном программном обеспечении: при измерении скорости передачи данных (4а) и при измерении задержки доставки пакетов**

Как видно из графиков, в модернизированном программном продукте средняя скорость передачи данных составляет 10,7 МБ/с, что в 2,8 раза выше по сравнению с исходным значением в более ранней версии программы. Задержка сети в модернизированном программном обеспечении значительно ниже, чем в исходном, и составляет 5 мс.

Таким образом, модернизация привела не только к значительному расширению функционала программного обеспечения, но и к увеличению эффективности процесса передачи данных.

В результате проведенной работы была выполнена модернизация разработанного ранее клиент-серверного приложения для исследования характеристик корпоративной сети. Для этого предварительно были определены ключевые па-

раметры сетевого подключения, оказывающие непосредственное влияние на качество передачи данных в корпоративной сети предприятия. Для реализации измерения выявленных параметров был модернизирован принцип работы клиент-серверного приложения. В целях расширения функциональных возможностей данного программного продукта было решено добавить поддержку протокола UDP и улучшить реализацию уже существующего программного решения. Полученные результаты подтвердили, что модернизация программного обеспечения привела к значительному расширению его функционала, и разработанный программный продукт можно применять для сбора статистических данных и дальнейшего анализа качества сетевого подключения.

#### *Литература*

1. WireShark: официальный ресурс [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.wireshark.org> (дата обращения: 20.04.2021).
2. Bandwidth Monitor Pro: официальный ресурс [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.delphiplus.org/informacionnaia-arhitektura/bandwidth-monitor-pro.html> (дата обращения: 20.04.2021).
3. tcpdump: официальный ресурс [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tcpdump.org> (дата обращения: 20.04.2021).
4. Василенко К.А. Сетевой трафик в операционных системах WINDOWS: сравнение и анализ его генерирования // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9. С. 19-21.
5. Маркин Ю.В. Методы и средства углубленного анализа сетевого трафика: автореф. дис. кандидата технических наук. М.: Институт системного программирования. 2017. 30 с.
6. Гладких А.М. Основные методы анализа сетевого трафика // Вопросы науки и образования. 2020. № 19 (103). С. 112-116.
7. Киреев А.П. Анализ сетевого трафика корпоративной сети посредством программного обеспечения Wireshark // Фрактал. 2019. № 3. С. 11-15.
8. Габдуллин А.Ш., Инкинин И.Ф., Сафиуллина Л.Х. Анализ сетевого трафика // Вектор развития управленческих подходов в цифровой экономике. 2020. № 2. С. 36-40.
9. Медведев Д.О. Анализ сетевого трафика на предприятии // Доклады ТУСУР. 2017. № 3. С. 179-184.
10. Андрианов И.А. Анализатор сетевого трафика // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 6. С. 38-49.
11. Nor S.A. Simulated performance of TCP, SCTP, DCCP and UDP protocols over 4G network // Procedia computer science. 2017. Т. 111. С. 2-7.
12. Wheeb A.H. Performance analysis of VoIP in wireless networks // International Journal of Computer Networks and Wireless Communications (IJCNWC). 2017. Т. 7. № 4. С. 1-5.
13. AL-Dhief F.T. Performance Comparison between TCP and UDP Protocols in Different Simulation Scenarios // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Т. 7. № 4. С. 172-176.



14. Wheeb A.H. Performance evaluation of UDP, DCCP, SCTP and TFRC for different traffic flow in wired networks // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2017. Т. 7. № 6. С. 35-52.
15. Антонянц Е.Н., Амельченко А.О., Истратова Е.Е. Разработка программного обеспечения для исследования скорости передачи данных в корпоративной сети // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9. № 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.injoit.ru/index.php/j1/article/view/1035> (дата обращения: 20.04.2021).

УДК 004.94, 338.24, 623.618.3

**Функционально-целевые модели управления региональной безопасностью (Часть 1. Синтез цепочек целей и действий)**

**А.В. Маслобоев**, доктор технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник,

**В.А. Путилов**, доктор технических наук, профессор,  
научный руководитель,

Институт информатики и математического моделирования  
Федерального исследовательского центра  
«Кольский научный центр Российской академии наук»  
(ИИММ КНЦ РАН), г. Апатиты

*Работа направлена на развитие формального аппарата анализа и синтеза многоуровневых распределенных систем управления региональной безопасностью с целью повышения адекватности этих систем в условиях усложнения управленческих задач в этой области. В работе предложены математические модели управления региональной безопасностью, основанные на функционально-целевой технологии и теории иерархических многоуровневых систем. Модели обеспечивают формальную постановку задач и практическую реализацию процедур автоматизации структурно-алгоритмического синтеза адекватных систем информационной поддержки управленческой деятельности. Работа состоит из двух частей. В первой части рассматриваются формальные процедуры синтеза цепочек целей и действий в управлении региональной безопасностью. Во второй части обсуждаются вопросы синтеза моделей покрывающих и адекватных систем, обеспечивающих решение задач управления путем удовлетворения условий изоморфизма всех уровней их декомпозиции и функциональной организации системы.*

Рекуррентная модель, синтез, многоуровневая распределенная система, управление, региональная безопасность, алгебра целей и действий.

**Functional-target management models of regional security  
(Part 1. Chain synthesis of goals and actions)**

**A.V. Masloboev**, Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Leading research fellow,

**V.A. Putilov**, Dr. Sci. Tech., Professor, Research supervisor

Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal  
Research Center «Kola Science Center of Russian Academy of Sciences»  
(IIMM KSC RAS), Apatity

*The study is aimed to development of the mathematical apparatus for analysis and synthesis of the multi-level distributed management systems of regional security for the purpose of system adequacy enhancement under management problems compli-*

*cation in this field. Mathematical models for regional security management based on the functional-target technology and the theory of hierarchical multi-level systems are proposed. Models provide formalized problem statement and practical implementation of automation procedures of the structural-algorithmic synthesis of appropriate systems for information support of management activity. Our research work consists of two parts. In the first part formal procedures of the chain synthesis of goals and actions in regional security management are considered. In the second part the model synthesis issues of covering and adequate systems, providing management problem-solving by isomorphism conditions settlement of the all problem decomposition levels and the system functional organization.*

Recurrent model, synthesis, multi-level distributed system, management, regional security, goal and action algebra.

### **Введение**

В условиях современных вызовов и угроз региональной, национальной и международной безопасности сегодня стремительно развиваются методы и системы обеспечения безопасности критических инфраструктур, повышаются требования к этим системам и средствам защиты критически важных объектов, появляются новые стандарты в области безопасности [1]. Это является одной из стратегических задач государственной политики России, проводимой в целях укрепления национальных интересов. В настоящее время этому уделяется особое внимание на всех уровнях государственного управления. Работа в этом направлении ведется и в рамках Стратегии научно-технологического развития страны. Однако, одновременно с этим, активно прогрессирует усложнение управленческих задач по обеспечению безопасности на различных уровнях государственного управления в информационной, социально-экономической, военно-политической и других сферах, что, в свою очередь, сопровождается непрерывно растущими объемами информации, оперативная обработка которой необходима для принятия эффективных решений и координации управления безопасностью. Для нивелирования указанных сопутствующих факторов требуются новые технологические решения, способные в целом повысить адаптационные и интеллектуальные возможности существующих средств обеспечения безопасности. При этом, несмотря на высокий уровень современных научных разработок в области построения систем обеспечения разных видов безопасности и все многообразие организационно-технических мер и программно-аппаратных средств автоматизации ситуационного управления, вопросы математического моделирования и формального синтеза этих систем недостаточно глубоко проработаны. Практика показывает, что для конкретных приложений именно математическое обеспечение определяет адекватность проектируемых и внедряемых систем безопасности задачам управления и принятия решений с точки зрения их информационной обеспеченности, научной обоснованности и соответствия требуемым показателям качества (целям) управленческой деятельности. Таким образом, для рационального выбора средств защиты критически важных объектов, структурно-алгоритмического синтеза и конфигурирования автоматизированных систем

обеспечения безопасности критических инфраструктур необходим соответствующий теоретический аппарат (формальные модели и методы). Это позволит повысить эффективность работы (оперативность, экономия ресурсов, степень энтропии и ситуационной осведомленности) многоуровневых распределенных систем управления безопасностью сложных объектов на всех этапах жизненного цикла этих систем – от моделирования и проектирования до внедрения и эксплуатации.

На решение обозначенных задач направлена настоящая работа, состоящая из двух частей. В первой части предложены формальные процедуры синтеза цепочек целей и действий при построении систем управления региональной безопасностью на базе рекуррентной модели.

### Рекуррентная модель управления безопасностью региона

В ходе предыдущих исследований [2] создана многоуровневая рекуррентная иерархическая модель региональной безопасности, формализованная в виде иерархии алгебр, гомоморфно отображенных друг на друга «снизу вверх», и основанная на рекуррентной декомпозиции целей управления:

$$Z = \left\{ z_{\vec{j}}^k \right\}_{k=1}^K, \quad (1)$$

$$A^k = \left\langle \Sigma^k, \{\otimes, \oplus\} \right\rangle, \quad (2)$$

$$\gamma_k : A^{k+1} \rightarrow A^k, \quad (3)$$

где  $\left\{ z_{\vec{j}}^k \right\}_{k=1}^K$  – множество классов эквивалентности;  $K$  – число уровней декомпозиции;  $k$  – индекс уровня декомпозиции;  $\vec{j}^k = \{j_i\}, i = \overline{1, K}$  – вектор-индекс длиной  $k$  класса эквивалентности на  $k$ -ом уровне декомпозиции;  $j_i, i = \overline{1, K}$  –  $i$ -й компонент вектор-индекса;  $z_{\vec{j}}^k$  – имя класса на  $k$ -м уровне декомпозиции с вектор-индексом  $\vec{j}^k$ ;  $\gamma_k$  есть совокупность отношений  $\left\{ R_{\vec{j}}^k \right\}$ ;  $R_{\vec{j}}^k$  отношение эквивалентности, разбивающее  $z_{\vec{j}}^k$  на  $\left\{ z_{\vec{j}^{k+1}}^{k+1} \right\}, x, y \in z_{\vec{j}}^k$ ;  $\Sigma^k$  – множество цепочек над алфавитом  $\left\{ z_{\vec{j}}^k \right\}$ .

Модель разработана с использованием функционально-целевой технологии [3] и математического аппарата теории иерархических многоуровневых систем [4] и является аналогом оператора структурно-функционального синтеза исполнительной среды информационно-аналитической поддержки управления региональной безопасностью.

В модели используется понятие классов эквивалентности целей, то есть множеств целей, эквивалентных в смысле предметной направленности. В каждом классе эквивалентности задается новое отношение эквивалентности, разбиваю-

щее каждый класс на подклассы. Рекуррентный процесс детализации исходной задачи продолжается до достижения уровня «примитивов» – элементарных целей, неделимых с точки зрения целевой декомпозиции или субъекта управления. Таким образом, модель представляется смешанным графом иерархии классов эквивалентности, в котором вершины – имена классов, ребра – отношения включения, корень – имя задачи управления на предметной области (региональной безопасности), листья – примитивы.

Рекуррентное использование отношения эквивалентности, моделирующее процесс декомпозиции целей и задач управления безопасностью, приводит к синтезу формальной рекуррентной модели региональной безопасности. Рекуррентность заключается в применении модели к самой себе при декомпозиции целей управления и детализации соответствующих действий для их достижения (результат предыдущего выполнения процедуры декомпозиции является исходным для последующего).

Процесс рекуррентной декомпозиции исходной цели (задачи) обеспечивает построение алгоритмов управления для ее достижения большим числом вариантов, отличающихся степенью эффективности, полученными результатами, временными и ресурсными затратами и т.д. Для сравнения различных вариантов алгоритмов управления задаются их параметры на основе использования рекуррентной модели. Это обеспечивает применимость простого метода оценки параметров конкретного алгоритма управления и формальную основу оптимизации и синтеза этих алгоритмов. Синтез алгоритмов управления на модели осложняется тем, что с системой на разных уровнях обеспечения безопасности взаимодействуют разные типы субъектов управления, то есть в системе присутствуют несколько понятийных аппаратов и множество точек принятия решений. Вместе с тем, объект управления и автоматизации (процессы обеспечения региональной безопасности) крайне динамичен и не позволяет априори разработать единую систему знаний (понятийный аппарат), оперативно адаптируемую к изменениям предметной области и внешних условий.

### **Формальные процедуры синтеза цепочек целей и действий**

Формальная рекуррентная модель организации действий (алгоритмов и программ управления безопасностью) в многоуровневых системах обеспечения региональной безопасности представляет собой совокупность элементов множества  $\Sigma^k$ , две алгебраические операции  $\otimes$  и  $\oplus$ , и систему отношений эквивалентности действий по выполнению целевой задачи системы. Таким образом, для множества классов эквивалентности имеется множество операций над представителями классов:

$$\left\{ \left\{ z_j^k \right\}_{j=1}^{N_k} \right\}_{k=1}^K \leftrightarrow \left\{ \left\{ Q_{j, j+1}^k \right\}_{j=1}^{N_{k-1}} \right\}_{k=2}^K. \quad (4)$$

*Определение.* Формально алгоритм или программа управления безопасностью  $k$ -го уровня детализации есть графическая запись соответствующей цепочки из  $\Sigma^k$ .

Пусть некоторый  $j$ -й класс эквивалентности на  $k$ -м уровне иерархии  $z_j^k$  является объединением классов эквивалентности нижнего уровня ( $k+1$ ):

$$z_j^k = z_{j,i}^{k+1} \cup z_{j,2}^{k+1} \cup \dots \cup z_{j,N_j}^{k+1}. \quad (5)$$

Тогда  $j$ -й алгоритм  $\psi_j^k$  управления безопасностью на  $k$ -м уровне выражается как выполнение операций  $Q_{j,j+1}$  над представителями классов нижнего уровня иерархии:

$$\psi_j^k = z_{j,1}^{*k+1} Q_{\beta,\eta} z_{j,2}^{*k+1} Q_{\eta,\beta} z_{j,3}^{*k+1} \dots \quad (6)$$

В общем случае операции  $Q_{j,j+1}$  могут быть различными для разных уровней, то есть  $Q_{j,j+1}$  принадлежат некоторому множеству  $Q_k$  операций для данного уровня  $k$ :

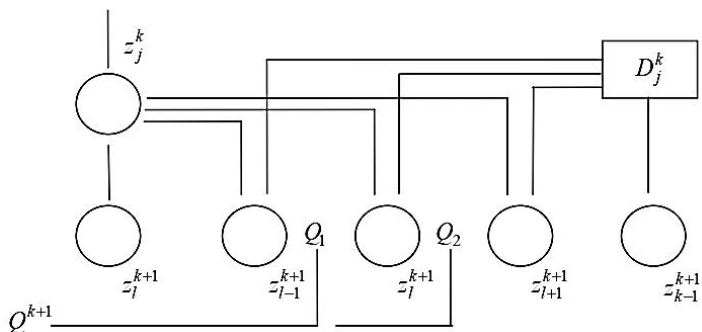
$$(\forall k, k = \overline{2, K})(Q_{j,j+1} \in Q_k). \quad (7)$$

*Замечание.* Эти операции не обязательно применимы к любым классам эквивалентности данного уровня. Применимость операций определяется физическим смыслом эквивалентности, формирующей данный класс.

Рассмотрим дерево рекуррентной структуры действий системы управления региональной безопасностью – выражения (1)-(3). В общем случае на каждом  $k$ -м уровне иерархии для каждого класса эквивалентности имеется набор операндов (параметров управления), которыми являются представители подклассов эквивалентности нижестоящего ( $k+1$ )-го уровня, две алгебраические операции  $\otimes$  и  $\oplus$  и дискриминатор, то есть правило выбора операнда или выражения из данного класса  $k$ -го уровня. В качестве операндов дискриминатора  $k$ -го уровня выступают предикаты эквивалентности нижестоящего ( $k+1$ )-го уровня, поскольку внутри рассматриваемого класса объекты являются эквивалентными.

Совокупность операций, операндов и дискриминатора представляет собой типичный макропроцессор [5], причем операнды и выражения являются макросами, а дискриминатор фактически определяет тип макровызова. Таким образом, ссылка на данный класс эквивалентности некоторого  $k$ -го уровня есть аналог макровызова. Дискриминатор данного класса является системной частью (скелетом) макропроцессора. Выражения и операнды представляют собой возможные макросы, один из которых активируется дискриминатором.

Структура таких макропроцессоров, используемых при решении задач управления, показана на рисунке и идентична на любом уровне иерархии организации многоуровневой распределенной системы управления региональной безопасностью. Адаптация общепринятого в информатике понятия «макропроцессор» для исследуемой предметной области обеспечила логическую основу процессов синтеза алгоритмов и программ управления безопасностью по рекуррентным описаниям действий в многоуровневой системе обеспечения безопасности.



**Рисунок 1 – Структура «макропроцессора» в системе управления региональной безопасностью**

Рассмотрим процедуру построения представителей некоторого класса эквивалентности на определенном уровне организации системы управления. Пусть задана рекуррентная модель системы управления в виде следующих наборов:

1. набор атомов  $L = \{L_i\}, i = \overline{1, N_L}$ , где  $N_L$  – длина исходного атомарного алфавита;

2. набор отношений эквивалентности  $\left\{ \left\{ R_j^k \right\}_{j=1}^{N_k} \right\}_{k=1}^K$ , где  $N_k$  – количество классов эквивалентности на  $k$ -м уровне,  $K$  – количество уровней иерархии управления;

3. набор процедур построения процесса из подпроцессов  $\left\{ \left\{ \psi_j^k \right\}_{j=1}^{N_k} \right\}_{k=1}^{K-1}$ ;

4. набор дискриминантов  $\left\{ \left\{ D_j^k \right\}_{j=1}^{N_k} \right\}_{k=1}^{K-1}$ .

Заданный набор отношений  $R_i^k$  определяет набор классов эквивалентности:  $\left\{ \left\{ z_j^k \right\}_{j=1}^{N_k} \right\}_{k=1}^K$ .

Дискриминатор  $k$ -го уровня выбирает одного представителя  $z_j^{*k}$  из множества вариантов алгоритмов управления  $j$ -го класса эквивалентности. Пусть на некотором  $k$ -м уровне имеются  $j_k$  классов эквивалентности, смежных одному классу эквивалентности более высокого уровня  $z_j^{k-1}$ . Классы эквивалентности  $z_j^k$   $k$ -го уровня имеют следующие множества представителей:

$$z_1 = \{z_{11}^*, z_{12}^*, \dots, z_{1M_1}^*\}, \dots, z_{j_k} = \{z_{j_k 1}^*, z_{j_k 2}^*, \dots, z_{j_k M_{j_k}}^*\}, \quad (8)$$

где  $M_{j_k}$  – число представителей в  $j$ -м классе эквивалентности  $k$ -го уровня.

Тогда процесс построения представителей некоторого  $j$ -го класса эквива-

лентности  $(k - 1)$ -го уровня задается следующей процедурой:

- 1) выбрать одного из возможных представителей каждого класса эквивалентности  $k$ -го уровня;
- 2) выполнить над представителями заданную операцию  $\otimes$  или  $\oplus$ .

Рассмотрим выполнение этой процедуры на примере. Пусть имеется некоторый фрагмент древовидной модели действий, адекватной декомпозиции целевой задачи предметной области – обеспечение региональной безопасности. Для каждого уровня этой модели можно определить алгоритм или программу управления безопасностью:

$$z = z_1 \cup z_2 \cup z_3 ; A : z^* = z_1^* \otimes (z_2^* \oplus z_3^*) ;$$

$$z_1 = z_{11} \cup z_{12} ; z_2 = z_{21} \cup z_{22} ;$$

$$A_1 : z_1^* = z_{11}^* \otimes z_{12}^* ; A_2 : z_2^* = z_{21}^* \otimes z_{22}^* ;$$

$$z_3 = z_{31} \cup z_{32} ; A_3 : z_3^* = z_{31}^* \otimes z_{32}^* .$$

Пусть исходный алфавит имеет следующий набор символов:

$$L = (A, B, C, D, E, F) .$$

Пусть классы эквивалентности нижнего уровня в этом примере имеют следующие наборы представителей:

$$z_{11} = (ABC, CBA, BAC), M_{11} = 3 ;$$

$$z_{12} = (ABCA, ACA), M_{12} = 2 ;$$

$$z_{21} = (DEF, FDE, FEA), M_{21} = 3 ;$$

$$z_{22} = (FD, ACF, CBF), M_{22} = 3 ;$$

$$z_{31} = (FCFA), M_{31} = 1 ;$$

$$z_{32} = (DECAF, FCA), M_{32} = 2 ,$$

где  $M_{ij}$  – число представителей.

Пусть в результате селекции представителей для организации алгоритма управления на нижнем уровне выбраны последние цепочки. Тогда в соответствии с процедурами синтеза алгоритмов управления более высокого уровня совокупная цепочка имеет вид:

$$z^* = BAC \otimes ACA \otimes ((FEA \otimes CBF) \oplus (FCFA \otimes FCA)) .$$

Определим количество представителей в классах эквивалентности на каждом уровне:

$$M_1 = M_{11} \times M_{12} = 3 \times 2 = 6 ;$$

$$M_2 = M_{21} \times M_{22} = 3 \times 3 = 9 ;$$

$$M_3 = M_{31} \times M_{32} = 1 \times 2 = 2 ;$$

$$M = M_1 \times M_2 \times M_3 = 6 \times 9 \times 2 = 108 .$$

В рассматриваемом примере получено, что один из вариантов алгоритма управления безопасностью верхнего уровня реализуется с помощью цепочки



действия  $z^*$ , а всего существует 108 различных вариантов алгоритмов (программ) управления для данной ситуации.

Определим общее число вариантов построения алгоритмов управления безопасностью в многоуровневой распределенной системе обеспечения региональной безопасности. Поскольку число вариантов выбора представителей из каждого класса на  $k$ -м уровне равно числу членов этого класса, то количество представителей в классе эквивалентности  $(k-1)$ -го уровня определится как произведение числа представителей каждого класса  $k$ -го уровня, смежного с классом  $z_j^{k-1}$ :

$$M_j^{k-1} = M_1 \times M_2 \times \dots \times M_{j_k} = \prod_{j=1}^{j_k} M_j. \quad (9)$$

Двигаясь по иерархии функциональной организации алгоритмов управления региональной безопасностью рекуррентно «снизу вверх», получаем, что на нижнем уровне иерархии для каждого класса эквивалентности  $z_j^{*k}$  число вариантов выбора параметров алгоритма управления равно количеству представителей в данном классе эквивалентности. Для каждого класса  $z_j^k$  более высокого  $k$ -го уровня ( $k = \overline{1, K-1}$ ) число альтернатив выбора вариантов построения алгоритма (программы управления) существенно больше и определяется произведением числа вариантов выбора в классах уровня  $(k+1)$ , смежных с классом  $z_j^k$ , в соответствии с выражением (9).

Общее число альтернатив выбора вариантов организации алгоритма управления в многоуровневой автоматизированной системе обеспечения региональной безопасности определяется произведением числа альтернатив выбора вариантов по всем классам эквивалентных действий нижнего уровня иерархии управления:

$$M = \prod_{j=1}^{N_k} M_j, \quad (10)$$

где  $M_j$  – число альтернатив выбора вариантов в  $j$ -м классе эквивалентности нижнего уровня,  $N_k$  – число классов эквивалентности нижнего уровня.

Для оценки числа альтернатив выбора вариантов организации алгоритмов на верхнем уровне иерархии предположим, что в каждом классе эквивалентности нижнего уровня имеется одинаковое число представителей, равное  $R$ , а число таких классов равно  $N$ . Тогда общее число вариантов выбора алгоритма управления для многоуровневой распределенной системы обеспечения безопасности региона:  $M = R^N$ . Так, процессы обеспечения безопасности региона в многоуровневой распределенной автоматизированной системе управления региональной безопасностью можно реализовать с помощью достаточно большого числа вариантов различных алгоритмов и программ управления. К примеру для  $R = 10$  и

$N = 6$  получается  $10^6$  вариантов различных реализаций программ управления.

Отождествим варианты выполнения эквивалентных действий (представителей внутри одного класса эквивалентности) с вершинами некоторого графа  $u$ , а отношения выбора представителей  $z_j^{*k}$  – с ребрами этого графа. Поскольку выбор альтернатив проводится внутри классов эквивалентности дерева действий, то построенный граф  $u$  тоже будет деревом. Назовем граф  $u$  деревом альтернатив выбора вариантов реализации алгоритмов (программ управления) обеспечения региональной безопасности. Корнем этого дерева является выбор представителя внутри класса эквивалентных действий на самом нижнем уровне иерархии (выбор внутри листа дерева действий), а листьями – варианты реализации всего рассматриваемого алгоритма (программы) в целом. Таким образом, чем ближе к корню дерева осуществляется выбор варианта алгоритма управления безопасностью, тем большее число альтернатив требуется рассмотреть.

Для сравнения вариантов реализации алгоритмов управления необходимо задать параметры, характеризующие эти алгоритмы. Одним из таких параметров, имеющих практическое значение, является время реализации мер противодействия угрозам безопасности региона, предусмотренных в алгоритме управления (антикризисной программе). В качестве других параметров, согласно [6, 7], используются степень ситуационной осведомленности, ресурсные затраты, наличие сил и средств, необходимых для полной реализации алгоритма (программы) управления безопасностью региона в условиях некоторой кризисной ситуации. Рассмотрим задачу определения параметров программы (алгоритма) управления региональной безопасностью, состоящей из большого числа различных действий.

Для определения параметров этой многоуровневой программы (алгоритма) управления воспользуемся рекуррентной моделью (1)-(3). Поскольку программа (алгоритм) управления представляется в виде совокупности синтезированных цепочек элементарных (атомарных) действий, то остается определить параметры используемых на нижнем уровне декомпозиции атомов и установить правила построения совокупного параметра цепочки по известным параметрам атомов, то есть отображения алгебры цепочек на алгебры параметров. Пусть каждый атом на нижнем уровне иерархии рекуррентной структуры управления характеризуется некоторыми параметрами  $p_1, p_2, \dots$  и т.д. Поскольку используемая модель задает отображения между уровнями иерархии управления, то для задания способа вычисления некоторого совокупного параметра цепочки определяется отображение алгебры цепочки на соответствующую алгебру параметров:  $g_i : A \rightarrow V_i, i = \overline{1, n}$ , где  $V_1$  – алгебра первых параметров,  $V_2$  – алгебра вторых параметров и т.д., а  $n$  – число параметров.

Поскольку всякий элемент цепочки характеризуется только одним значением каждого параметра и цепочка в целом – тоже одним значением соответствующего параметра, то тогда все отображения  $g_i$  должны быть гомоморфизмами:

$$g_i(\alpha_1 \otimes \alpha_2) = g_i(\alpha_1) \theta_1 g_i(\alpha_2), \quad (11)$$

$$g_i(\alpha_1 \oplus \alpha_2) = g_i(\alpha_1) \theta_2 g_i(\alpha_2), \quad (12)$$

где  $\theta$  – некоторая операция в алгебре соответствующего параметра  $V_i$ .

Вид операции  $\theta$  определяется на основании физического смысла конкретных параметров. Например, если в качестве одного из параметров элементов цепочки выбрано время их реализации  $t_i$  и  $t_j$ , то время  $t_\Sigma$  выполнения всей цепочки будет определяться для операции  $\otimes$  суммированием времени выполнения элементов, а для операции  $\oplus$  – определением максимума:

$$g_1 : \alpha_i \otimes \alpha_j \rightarrow t_i + t_j, \quad (13)$$

$$g_1 : \alpha_i \oplus \alpha_j \rightarrow \max(t_i, t_j). \quad (14)$$

Таким образом, на основе данных о параметрах атомов алгоритма управления можно построить параметры всего алгоритма в целом. Для выбора конкретного варианта из некоторого множества алгоритмов с известными параметрами необходимо задать критерий качества выполняемых действий по управлению и правило, по которому будет выполняться тот или иной вариант в зависимости от значения критерия. Выбор оптимального в смысле введенного критерия варианта реализации алгоритма управления сводится к известным задачам дискретной оптимизации, которые могут решаться известными методами направленного перебора [8]. Число альтернатив выбора минимально на нижнем уровне декомпозиции и максимально на верхнем. Поэтому аппарат дискретной оптимизации эффективно использовать в сочетании с эвристическими методами при выборе квазиоптимальных алгоритмов на основе неформальных знаний о преимуществах конкретных путей декомпозиции целевой задачи управления. Системные затраты на оптимизацию будут тем меньше, чем ближе к нижнему уровню будет включаться аппарат дискретной оптимизации. На нижнем уровне декомпозиции оптимизируется структура примитивов, в которой число вариантов выбора ограничено десятками и возможен простой перебор. Такой аппарат эвристической оптимизации реализует, например, разработанная в Институте информатики и математического моделирования Кольского научного центра РАН мультиагентная система поддержки принятия решений [9] по управлению региональной безопасностью, представляющая собой иерархическую сеть агентов и связанных с ними виртуальных ресурсов и предназначенная для информационной поддержки управленческой деятельности в области обеспечения безопасности критически важных объектов и инфраструктур в ситуационных центрах региона.

Пусть выполнение каждого примитива осуществляется одной или несколькими цепочками атомов. Набор всевозможных атомов, имеющих в наличие у участников процессов управления, образует функциональный алфавит:  $L = \{L_i\}, i = \overline{1, N_L}$ . Так, примитивы также оказываются классами эквивалентности, элементами которых являются цепочки атомов. Следовательно, для полного определения алгоритма управления (программы мер и средств противодействия

угрозам) в многоуровневой системе обеспечения безопасности мало определить требуемые для реализации управления примитивы, необходимо также выбрать конкретные цепочки атомов, реализующих тот или иной примитив. Продолжение декомпозиции по признаку функциональной направленности ниже уровня примитивов невозможно, поскольку все цепочки атомов, относящиеся к данному примитиву, функционально эквивалентны. Необходимо, следовательно, выбрать из цепочек атомов такую, которая обеспечивает выполнение примитивной функции наилучшим образом (быстрее, с наименьшими затратами ресурсов и т.п.). Данная задача будет решена, если определить критерий качества:  $G(p_1^\alpha, \dots, p_n^\alpha)$ , где  $p_i^\alpha, i = \overline{1, n}$  – параметры цепочки  $\alpha$ , и реализовать соответствующий алгоритм оптимизации этого критерия. Оптимальная цепочка  $\alpha$  доставляет максимум критерию качества:

$$G(p_1^{\bar{\alpha}}, \dots, p_n^{\bar{\alpha}}) = \max_{\{\alpha\}} G(p_1^\alpha, \dots, p_n^\alpha). \quad (15)$$

Для определения параметров цепочки  $p_i^\alpha$  необходимо знать, во-первых, соответствующие параметры отдельных атомов  $p_i^{L_j}$  (что на практике для систем управления вполне достижимо) и, во-вторых, отображения  $g_i$  алгебры цепочек  $A$  на алгебры соответствующих параметров  $V_i$ . Примеры построения отображений рассмотрены выше.

Выбор  $\bar{\alpha}$  на  $z_{j^k}^k$  рассматривается как оптимизационная задача на множестве строк символов и может решаться простым перебором (при достаточной мощности  $z_{j^k}^k$ ) или одним из методов направленного перебора.

Введенный общий показатель качества программ управления безопасностью конкретизирован в виде информационного критерия, достаточно общего для разнообразных приложений. На основе моделей и методов функционально-целевого подхода создан комплекс средств автоматизации многоуровневой распределенной системы управления региональной безопасностью Мурманской области – Центра исследований и обеспечения безопасности Арктики [10].

### **Заключение**

Созданные функционально-целевые модели анализа и синтеза многоуровневых распределенных систем обеспечения региональной безопасности базируются на принципе управления через целеполагание (формирование системы целей) и обеспечивают возможность синтеза систем обеспечения безопасности, действия которых покрывают цели управления региональной безопасностью. В моделях формализованы процедуры учета специфики решаемых задач управления региональной безопасностью, то есть особенностей структуры предметной области, реализована возможность использования неформализованных знаний разнотипных субъектов управления и организации решения сложных задач согласованными усилиями управляющих

элементов различных уровней распределенной системы обеспечения безопасности региона. Модели основаны на иерархической структуре целей/задач управления региональной безопасностью.

Новизна этих формальных рекуррентных моделей определяется следующим. Во-первых, при построении моделей целевого управления впервые использована иерархия двухоперационных алгебр цепочек целей и совершено аналогичных по структуре цепочек действий, обеспечивающих достижение этих целей. Во-вторых, иерархия целей в моделях непосредственно порождает модели иерархии действий, что обеспечивает использование иерархии целей не только в качестве средства описания задач управления, но и как средства проектирования адекватной этим задачам автоматизированной системы управления. Это обеспечило выполнение основных требований к системам управления региональной безопасностью, как гибкость по отношению к решаемым задачам и изменяющимся внешним условиям, возможность поэтапного создания и развития, настройку средств системы на конкретные группы пользователей – участников процессов обеспечения безопасности (лица, принимающие решения, системные аналитики, эксперты и др.).

Результаты исследования нашли применение при решении задач информационной поддержки управления региональной безопасностью Мурманской области, а также использованы при реализации основных направлений государственной политики России в Арктике на период до 2035 года в части разработки систем поддержки принятия решений для региональных ситуационных центров.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (тема НИР № 0226-2019-0035).

#### *Литература*

1. Офицеров А.И., Басов О.О., Бачурин С.С. Концептуальные основы обеспечения комплексной безопасности критически важных объектов // Экономика. Информатика. 2020. Т. 47. № 1. С. 154-163.
2. Маслобоев А.В., Путилов В.А., Сютин А.В. Многоуровневая рекуррентная модель иерархического управления комплексной безопасностью региона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6 (94). С. 163-170.
3. Кузьмин И.А., Путилов В.А., Фильчаков В.В. Распределенная обработка информации в научных исследованиях. Л.: Наука, 1991. 304 с.
4. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 343 с.
5. Юрков Н.К. Машинный интеллект и обучение человека. Пенза: ИИЦ ПензГУ, 2008. 226 с.
6. Цыгичко В.Н., Черешкин Д.С., Смолян Г.Л. Безопасность критических инфраструктур. М.: УРСС, 2019. 200 с.
7. Северцев Н.А., Бецков А.В. Системный анализ теории безопасности. М.: МГУ «ТЕИС», 2009. 457 с.

8. Игнатьев М.Б., Путилов В.А., Смольков Г.Я. Модели и системы управления комплексными экспериментальными исследованиями. М.: Наука, 1986. 232 с.
9. Маслобоев А.В. Система поддержки принятия решений в условиях региональных кризисных ситуаций // Информационные ресурсы России. 2017. № 4 (158). С. 25-32.
10. Маслобоев А.В. Концепция Центра перспективных исследований и обеспечения безопасности Арктики // Арктика: экология и экономика. 2019. № 2 (34). С. 129-143.

УДК 654.152

**Системный анализ эшелонной схемы формирования коммутационного поля узла централизованного видеонаблюдения офисных инфокоммуникационных систем**

**А.Б. Семенов**, доктор технических наук, профессор,  
**Д.А. Гончаров**, бакалавр,  
**А.В. Лёвкин**, бакалавр,  
Национальный исследовательский университет  
Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ), г. Москва

*Введено понятие эшелонной схемы построения коммутационного поля центрального узла систем IP-видеонаблюдения и выполнена соответствующая ей модернизация типовых принципов расположения образующего его оборудования. Обоснована возможность размещения оборудования центрального узла в 19-дюймовом шкафу шириной 600 мм при количестве телекамер вплоть до 480. Проведена оценка средней длины коммутационных шнуров и показано, что обращение к эшелонной схеме дает практически двукратное сокращение этого параметра, что улучшает условия администрирования системы.*

Видеонаблюдение, коммутационное поле, эшелонная схема, IP-видеокамера, коммутационный шнур.

**System analysis of the echelon scheme for the formation of the switching field of the centralized video surveillance node of office infocommunication systems**

**A.B. Semenov**, Doctor of Technical Sciences, professor,  
**D.A. Goncharov**, bachelor,  
**A.V. Lyovkin**, bachelor,  
National Research University Moscow State University of Civil Engineering  
(NRU MGSU), Moscow

*The concept of an echelon scheme for constructing the switching field of the central node of IP-video surveillance systems was introduced and the corresponding modernization of the standard principles of the arrangement of the equipment forming it was performed. The possibility of placing the equipment of the central unit in a 19-inch cabinet 600 mm wide with the number of cameras up to 480 was substantiated. The estimation of the average length of the patch cords was carried out and was shown that the use of the echelon scheme gave an almost double reduction of this parameter that improved the conditions for system administration.*

Surveillance video system, switching field, echelon scheme, IP-videocamera, patch cord.

Эффективная эксплуатация современного объекта недвижимости невозможна без привлечения информационных технологий. Практическое доведение предоставляемого ими сервиса до потребителя осуществляет инфокоммуникационная система. Средства вычислительной техники, лежащие в ее основе, за счет применения соответствующего программного обеспечения и обмена данными между различными узлами структуры обеспечивают гибкую реакцию на изменение условий окружающей среды. Кроме того, они берут на себя рутинные операции текущей эксплуатации отдельного здания и их комплекса, освобождая ресурсы обслуживающего персонала для решения нестандартных и нетиповых задач. Хорошо видимым результатом по внедрению этой разновидности техники в широкую инженерную практику становится то, что сама инфокоммуникационная система как некий интегральный объект становится таким же обязательным компонентом объектов гражданского и промышленного строительства наряду с традиционными водопроводом, канализацией, вентиляцией и другими.

Полноценную инфокоммуникационную систему из соображений удобства планирования и последующей эксплуатации выполняют в форме комплекса тесно взаимодействующих между собой на технологическом и идеологическом уровне отдельных составных частей, каждая из которых де-факто представляет самостоятельную сложную техническую систему и решает определенную укрупненную задачу. В рамках такого подхода в составе системы выделяют локальную вычислительную и телефонную сеть предприятия, систему контроля доступа и т.д. Одной из составных частей этого комплекса является система видеонаблюдения (СВН). Применение подобной системы обеспечивает оперативное выявление нештатных ситуации в реальном масштабе времени с фиксацией событий на цифровых регистраторах, минимизирует их вредные последствия, обеспечивает функции охранной сигнализации, ускоряет и упрощает расследование и раскрытие различных правонарушений и т.д.

### **Основные свойства систем IP-видеонаблюдения**

СВН как инфокоммуникационная система при ее реализации на базе IP-техники включает большое количество терминальных устройств и относится к крупным составным частям инфокоммуникационной системы. Так, согласно данным компании JLL сплошной контроль офиса площадью 3000 м<sup>2</sup>, который дополнен возможностью надежной идентификации личности людей, находящихся в контролируемой области, требует установки порядка 90 цифровых видеокамер.

Специфика задач, решаемых СВН, выдвигает повышенные требования в части защиты снимаемой, обрабатываемой и хранимой информации от несанкционированного доступа не уполномоченных на это лиц. Прямым следствием реализации соответствующих мероприятий становится то, что

- такие системы испытывают явно выраженное тяготение к централизованным схемам реализации;
- центральный узел формируется в техническом помещении по выделенной схеме, а его оборудование монтируется в отдельном конструктиве;



- за основу физического уровня СВН принимаются кабельные каналы связи.

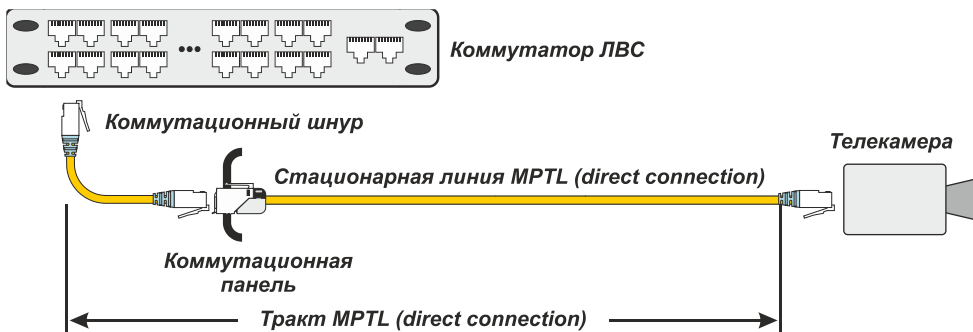
Физический уровень последних из соображений наращивания технико-экономической эффективности решения в целом формируется с максимально полным использованием элементной базы структурированных кабельных систем (СКС). С учетом относительно небольших скоростей и дальностей связи для этого в основной массе случаев привлекается электропроводная техника, в т.ч. специальной разработки [1, 2]. Сильная сторона ее использования – простота решения задачи дистанционного питания терминальной техники с привлечением технологии PoE в различных ее разновидностях [3]. Не исключается применение также технических средств волоконной оптики, но она изначально ориентирована те линии для подключения телекамер, длина которых составляет как минимум нескольких сотен метров [4], что редко встречается в проектах построения компьютерных систем управления объектов недвижимости.

Соображение о максимально полной унификации технических средств, применяемых для формирования разнородных частей единого инфокоммуникационного комплекса, можно распространить также на принципы формирования коммутационного поля центрального узла СВН, которое согласно известному подходу [5] представляет собой совокупность функциональных секций строго определенного назначения. В процессе формирования трактов соединяются друг с другом и активным сетевым оборудованием коммутационными шнурами. Применение для этой цели их аналогов в виде переключателей при всей внешней привлекательности соответствующих коммутационных панелей практикуется существенно реже из-за их ограниченных функциональных возможностей и неизбежного увеличения стоимости. Функциональные секции, в свою очередь, собираются из отдельных функциональных единиц (под этим далее понимается комбинация из панелей/коммутатора и горизонтального организатора) с привлечением принципов конструктивной неоднородности и непрерывности [6].

### **Особенности телекамер как терминального оборудования**

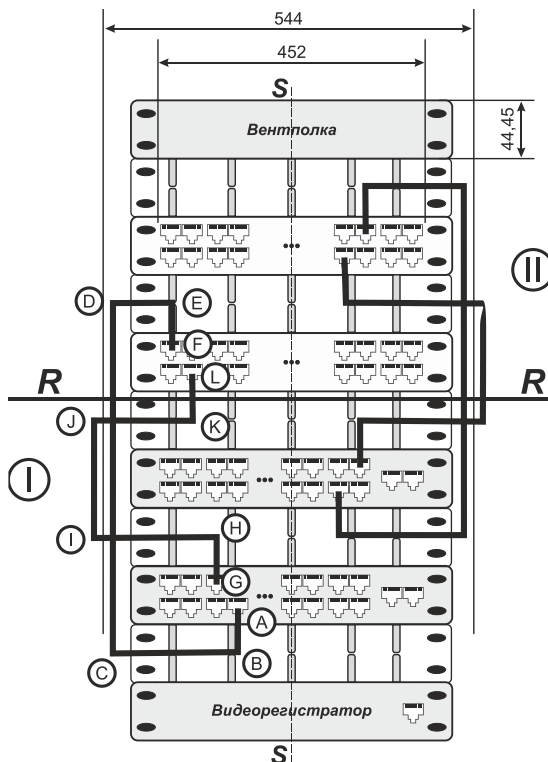
С системной точки зрения IP-телекамеры как терминальные устройства, в отличие от аналогичного оборудования ЛВС и телефонной сети предприятия, организационно относятся к т.н. «цифровому потолку» [7, 8]. Это определяет

- возможность прямого подключения телекамер к коммутатору без кроссконнекта с построением стационарной линии по схеме MPTL (от англ. Modular plug terminated link, ранее такие структуры были известны как direct connection), смотри рисунок 1;
- статичный характер СВН (ее конфигурация мало меняется в процессе эксплуатации);
- возможность исполнения функциональных единиц на оборудовании высокой плотности (48 портов/1U) в варианте с 2-юнитовой группировкой панели/коммутатора с горизонтальным организатором кольцевого типа [9];
- применение регулярной схемы соединения портов оборудования коммутационными шнурами.



**Рисунок 1 – Структура тракта MPTL для соединения отдельных узлов инфокоммуникационных систем и схема его использования для подключения телекамеры к активному сетевому оборудованию**

Пример коммутационного поля центрального узла, обслуживающего 95 телекамер, при его реализации по классическим подходам (в дальнейшем такая схема называется линейной), в настенном монтажном шкафу высотой 12U показан на рисунке 2. Считается, что через последний 96-й порт осуществляется подключение контрольного монитора.



**Рисунок 2 – Линейная схема построения коммутационного поля – случай регулярной укладки коммутационных шнуров**

### Предпосылки к изменению схемы формирования коммутационного поля

Физический уровень СВН, необходимая степень технической защиты от несанкционированного доступа к создаваемой информации, которая подтверждена предписанием на эксплуатацию, согласно требованиям СТР-К, должен быть выполнен на экранированных кабельных каналах связи. С учетом современных подходов к реализации информационной проводки на элементной базе категории не ниже 6, это сопровождается увеличением диаметра кабелей коммутационных шнуров, который даже в исполнении F/UTP часто превышает 7 мм.

Прокладка кабелей на вертикальном участке упорядочивается их укладкой в кольцевой организатор, часто практикуется дополнительная увязка в жгут. Последний обычно формируется с помощью популярных стяжек-липучек Velcro или их аналогов. При этом в плоскости R-R на рисунке 2 диаметр пакета из 48 шнуровых кабелей составляет 45 мм и более. Это как минимум на 10% превышает максимальную доступную величину  $(544-452)/2 - 2b = 41$  мм, где  $b = 2$  мм – толщина кольца вертикального организатора.

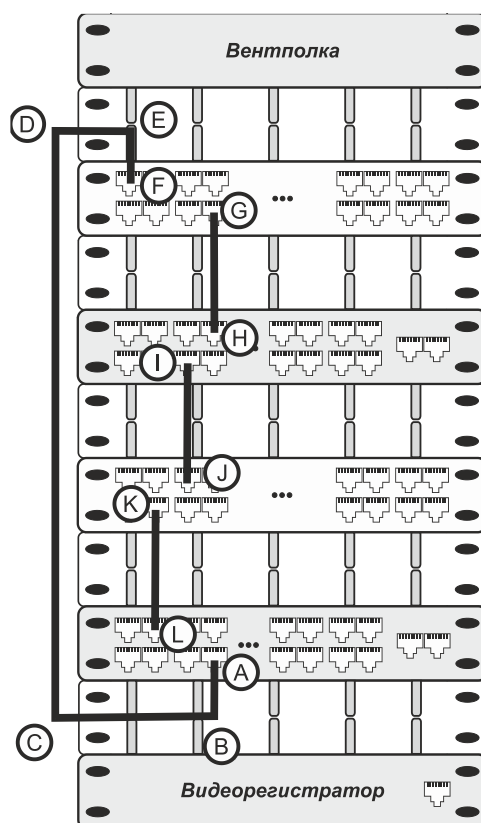


Рисунок 3 – Эшелонная схема построения коммутационного поля – случай регулярной укладки коммутационных шнуров

### **Идея эшелонной схемы**

Идея устранения недостатка нехватки емкости вертикального организатора в 600-миллиметровом монтажном конструктиве технических помещений основана на переходе к такой схеме формирования коммутационного поля, при которой резко сокращается количество кабелей коммутационных шнуров, укладываемых в этот требуемый стандартами вспомогательный компонент. Данная схема называется в дальнейшем эшелонной, а в ее основу положено чередование функциональных единиц активного оборудования и коммутационных панелей с разделением их горизонтальными организаторами. Это позволяет выполнять соединение большей части панелей и коммутаторов не обычными коммутационными шнурами, а короткими шнурами-перемычками [10] без вывода их кабеля которых в боковую область коммутационного поля на вертикальном участке. Обход колец горизонтального организатора при возникновении такой необходимости в случае применения этих изделий обеспечивается за счет имеющегося запаса по длине кабеля.

Физическая возможность реализации эшелонной схемы определяется тем, что в случае СВН, за счет размещения оборудования центрального узла в выделенном конструктиве, количество функциональных секций сокращается до двух: активного оборудования и коммутационных панелей.

Пример коммутационного поля, реализованного по эшелонной схеме, изображен на рисунке 3. Его анализ показывает, что от линейной схемы оно отличается фактически отказом от соблюдения принципа непрерывности. В основу допустимости такого подхода положен учет статического характера конфигурации СВН. Сильная сторона обращения к данной конфигурации заключается в том, что для формирования коммутационного поля в такой форме не требуется изменение исходного состава оборудования функциональных единиц за исключением перехода на другой тип коммутационных шнуров.

Отдельно укажем на то, что при создании СВН на небольших объектах линейная и эшелонная схема совпадают друг с другом. Критерием малости объекта недвижимости является применение на нем максимум 47 телекамер.

Из схемы, представленной на рисунке 3, непосредственно вытекает, что необходимость укладки в вертикальный организатор появляется только для тех IP-телекамер, линейные кабели которых выводятся на нижний ряд розеток нижней коммутационной панели функциональной секции горизонтальной подсистемы. С учетом применения для ее формирования 48-портовых панелей удвоенной плотности общее количество коммутационных шнуров не превысит 24.

При регулярном характере соединения портов отдельных функциональных секций в каждый вертикальный организатор при эшелонной схеме построения коммутационного поля вводится не более 12 кабелей коммутационных шнуров. С привлечением известной методикой определения диаметра кабельного жгута несложно получить следующее выражение связи диаметра  $d$  отдельного кабеля и жгута  $D$  из  $n$  таких кабелей при условии применения при его формировании популярных стяжек Velcro

$$D = d \sqrt{\frac{n}{k_i}} = 27,8 \text{ мм}, \quad (1)$$

где  $k_i = 0,68$  – коэффициент использования площади.

Расчет по (1) при  $d = 6,5$  мм для шнурового кабеля в исполнении S/FTP дает оценку диаметра жгута 27,3 мм, что с запасом соответствует размерам «в свету» кольца типового вертикального организатора.

### Оценка номенклатуры длин кабелей коммутационных шнуров для случая регулярной укладки

Дополнительное преимущество эшелонной схемы перед традиционной линейной – уменьшение средней длины шнура, что несколько снижает стоимость и улучшает условия текущего администрирования этой части инфокоммуникационной системы. Для оценки выигрыша по этому параметру воспользуемся схемами прокладки отдельных шнуров, которые показаны на рисунках 2 и 3. Там же дополнительно указаны необходимые размеры, знание которых требуется при выполнении конкретных расчетов.



Рисунок 4 – Задание физической длины коммутационного шнура

Расчетная длина  $L$  обычных шнуров находится как

$$L = \sum_X^Y kL_{XY},$$

где  $L_{AB}$  – геометрическое расстояние между точками  $X$  и  $Y$ , а  $k = 1,1$  – эмпирический коэффициент, учитывающий неровности укладки, необходимость соблюдения радиуса изгиба кабеля и иные аналогичные особенности.

По количеству подключаемых терминальных устройств СВН существенно уступает ЛВС и телефонной сети предприятия. С учетом этой особенности заказ шнуров с нетиповыми длинами, которые не востребованы за пределами этой системы, становится нецелесообразным и в составе системы имеет смысл применять стандартные для СКС изделия. Это означает, что вместо  $L$  в качестве физической длины  $L'$  задействуется ближайшее значение из нормированного ряда. На практике применяется как футовый, т.е.  $L' = 0,6, 0,9, 1,2 \dots$ , так и метрический  $L' = 0,5, 1,0, 1,5 \dots$ ) варианты такого ряда.

Опыт работы с информационными кабельными системами показал, что эмпирическое правило необходимости 10-процентного увеличения длины кабеля коммутационного шнура для компенсации изменения его ориентации в месте подключения, неизбежных неровностей укладки и аналогичных им обстоятельств не применимо в случае шнуров-перемычек. Причина необходимости изменения классического подхода определяется тем, что из-за небольших длин ка-

белого изделия обращение к нему дает большую ошибку. С учетом данной особенности для обоснования этого параметра привлекается метод непосредственного расчета с привлечением схемы рисунка 5. Из нее следует, что минимальная длина шнура-перемычки с 15-процентным положительным допуском составляет 19,8 см, т.е. его функции может выполнять стандартное для ряда производителей СКС 20-сантиметровое изделие. Имеющийся запас по длине при подключении направляется на увеличение радиуса изгиба шнура, что положительно сказывается на его параметрах в части возвратных потерь.

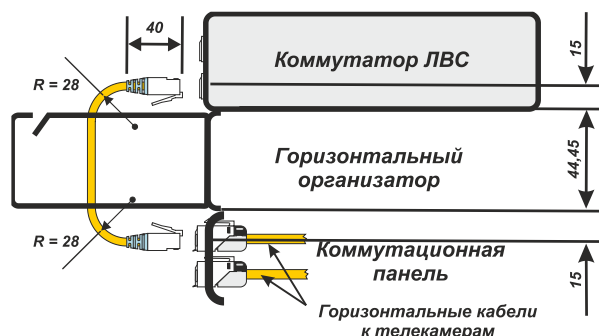


Рисунок 5 – К определению длины шнура-перемычки

Таблица 1 – Расчетные длины коммутационных шнуров при различных схемах формирования коммутационного поля (для систем видеонаблюдения с 95 телекамерами)

Участок	Длина, мм	Длина трассы, мм	L	L'	К-во	Всего
Линейная схема						
AB и EF	37	628	691	1,0/0,9	48	48/43,2
BC + DE	316					
CD	267					
GH и LK	37	450	495	0,5/0,6	48	24/27,6
IN + JK	316					
IJ	89					
Итого						72/70,8 м *
Эшелонная схема						
AB и EF	37	713	784	1,0/0,9	24	24/21,6
BC + DE	316					
CD	360					
GH, IJ и KL	См. рисунок 5			0,2	72	14,4
Итого						38,4/36 *

\* Примечание. Метровый/футовый дискрет длин шнуров

Результаты расчетов представлены в таблице 1. При выполнении соответствующих вычислений учитывалось, что

- из-за регулярного характера соединения отдельных портов  $BC + DE = IH + JK = const$ ;
- оборудование для формирования функциональных единиц имеет высокую плотность;
- коммутационное поле симметрично относительно вертикальной сети S-S на рисунке 2, т.е. расчеты для блоков I и II повторяют друг друга.

Полученные результаты свидетельствуют о почти 2-кратном преимуществе эшелонной схемы над линейной по общей и, соответственно, средней длине шнура.

Можно также утверждать, что по мере роста количества IP-телекамер в СВН при применении эшелонной схемы построения коммутационного поля площадь поперечного сечения вертикальной части жгута шнуровых кабелей не меняется. Это позволяет применять шкафы 600-миллиметровой ширины при построении центрального узла системы, включающей как минимум  $(42/4) \cdot 48 = 480$  телекамер в случае реализации центрального узла в 42-юнитовом 19-дюймовом напольном шкафу.

### Распределение длин шнуров при произвольном порядке подключения IP-телекамер к коммутатору

При подключении IP-телекамер может практиковаться произвольный порядок их подключения к портам коммутатора, что сказывается на их длинах. В качестве меры этого параметра используем функцию плотности вероятности, для определения которой используем модель, схема которой показана в левой части рисунка 6.

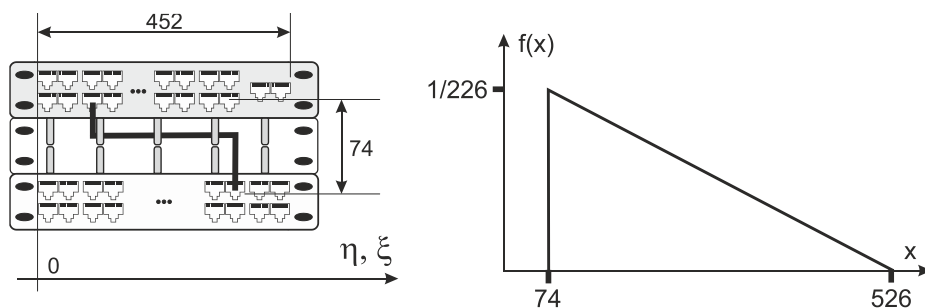


Рисунок 6 – Расчетная модель определения длин шнуров при эшелонной схеме формирования коммутационного поля (слева) и функция плотности вероятности длин (справа)

При условии равновероятного подключения вилок шнура к портам коммутационной панели и коммутатора можем записать

$$L = 1,1 \cdot (Ver + Hor) = 1,1 \cdot (74 + |\eta - \xi|), \quad (2)$$

где  $\eta, \xi$  – текущая координата портов коммутатора ЛВС и коммутационной панели СКС соответственно.

При задании  $\eta$  и  $\xi$  принимались во внимание нормированные стандарты ANSI/ EIA RS-310 D и МЭК 297 [11] размеры 19-дюймового монтажного поля.

Величина  $|\eta - \xi|$  вычислялась с привлечением известного из теории вероятности [12] подхода построения взаимно однозначного преобразования  $\eta$  и  $\xi$  с последующим определением функции распределения, на основании которой уже находилась плотность  $\varphi_{|\eta-\xi|}(x)$ . На заключительном этапе отображением в правую полуплоскость находящейся той части функции  $\varphi_{|\eta-\xi|}(x)$ , которая располагалась в левой полуплоскости (отмечена заливкой), находилась  $\varphi_{|\eta-\xi|}(x)$ . Процесс этих преобразований иллюстрирует рисунок 7.

В использованной системе обозначений справедливо  $f(x) = 74 + \varphi_{|\eta-\xi|}(x)$ .

Среднее значение  $\bar{L}$  определяем через математическое ожидание  $\varphi_{|\eta-\xi|}(x)$  следующим образом

$$\bar{L} = 1,1 \cdot \left( 74 + \int_0^{452} \varphi_{|\eta-\xi|}(x) dx \right) \quad (3)$$

Вычисление (3) дает  $\bar{L} = 247 \text{ мм} > 198 \text{ мм}$ , что на 20% превышает длину шнура-перемычки.

Последнее означает

- невозможность коммутации панелей соседних функциональных единиц исключительно 20-сантиметровыми шнурами и необходимость расширения номенклатуры шнуровых изделий;
- необходимость соблюдения жесткой дисциплины при формировании коммутационного поля

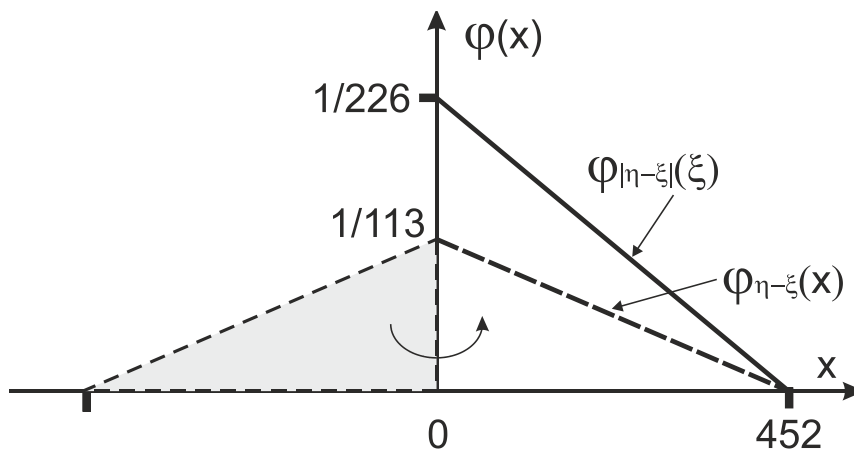


Рисунок 7 – Особенности расчета функции плотности вероятности случайной составляющей длины коммутационного шнура

### Выводы

Полученные результаты позволяют констатировать следующее



1. Коммутационное поле систем видеонаблюдения с количеством телекамер свыше 48 целесообразно строить по эшелонной схеме, основанной на регулярном чередовании отдельных функциональных единиц активного сетевого оборудования и коммутационных панелей СКС.

2. Эшелонная схема полностью решает проблему прокладки вертикального участка кабелей коммутационных шнуров в монтажных конструктивах широко распространенной на практике ширины 600 мм.

3. Для организации выделенного узла системы видеонаблюдения при количестве входящих в ее состав телекамер вплоть до по меньшей мере 480 в случае применения эшелонной схемы могут без ограничения привлекаться монтажные шкафы шириной 600 мм.

4. Текущее администрирование физического уровня системы видеонаблюдения при эшелонной схеме построения коммутационного поля ее центрального узла упрощается за счет практически 2-кратного сокращения средней длины шнуровых изделий.

5. Величина выигрыша по длинам слабо зависит от выбранной производителем СКС схемы формирования стандартного ряда значений (футовый или метровый дискрет длин).

6. При числе телекамер 96 и более эшелонная схема сокращает номенклатуру длин коммутационных шнуров до двух вне зависимости от обслуживаемого числа точек подключения терминального оборудования.

7. Возможность текущей эксплуатации с сокращенной до двух позиций номенклатурой коммутационных шнуров возможна только при тщательной проработке проекта и выполнении правила прямого отображения портов панели на порты коммутатора по схеме «один в один»; произвольная коммутация вида «любой порт на любой порт» приведет к быстрому исчерпанию запаса шнуровых изделий требуемой длины.

#### *Литература*

1. Семенов А.Б., Петраш В.Н. Симметричный двухпарный кабель связи для систем IP-видеонаблюдения // Патент на полезную модель RU 193174 U1, 16.10.2019. Заявка № 2019113803 от 07.05.2019.
2. Семенов А.Б., Былина М.С., Кандзюба Е.В. Структура симметричного кабеля «длинного» Ethernet // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 2. С. 25-30.
3. Семенов А.Б. Эволюция дистанционного питания // Журнал сетевых решений LAN. 2015. № 10. С. 51-55.
4. Семенов А.Б. Гибридные кабели для нижних уровней информационных систем // Первая миля. 2018. № 2 (71). С. 18-22.
5. Артюшенко В.М., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Проектирование и расчет мультисервисных кабельных систем // М.: Инфра-М. 2020. 174 с.
6. Семенов А.Б. Проектирование и расчет структурированных кабельных систем и их компонентов // М. ДМК-Пресс. 2010. 416 с.
7. Семенов А.Б. Системные изменения в перспективных СКС // Первая миля. 2020. № 3 (88). С. 16-21.

8. Семенов А.Б. Активная консолидационная точка для офисных информационных систем // Вестник связи. 2020. № 8. С. 20-24.
9. Семенов А.Б., Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Введение в структурированные кабельные системы // М. Научный консультант. 2018. 206 с.
10. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы // Саратов. Профобразование. 2017. 640 с.
11. Бердичевский М. Стандартные типоразмеры корпусов электронного оборудования // СТА. 1997. № 1. С. 96-106.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) // М.: Наука. 1974. 832 с.

УДК 004.03

## **Анализ возможностей интеграции программных продуктов BIM моделирования с офисным приложением**

**Л.Е. Суркова**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве»,  
**Д.В. Давыдов**, студент магистратуры кафедры «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве»,  
Национальный Исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва

*В работе дано понятие информационного моделирования зданий, рассмотрена программа Revit и ее возможности по формированию спецификаций и интеграции со сторонними офисными приложениями, например Excel. Особый интерес представляет оформление таких спецификаций по требованиям ГОСТ. Произведен обзор программного обеспечения, осуществляющего взаимодействие Revit с Excel зарубежных и отечественных разработчиков, выделены сильные и слабые стороны. Определены направления дальнейших разработок программ интеграции при использовании в отечественных проектных организациях – выгрузку в спецификации, соответствующие ГОСТ.*

BIM моделирование, плагин, спецификация, компьютерные программы.

## **Analysis of the possibilities of integrating BIM modeling software with an office application**

**L.E. Surkova**, Ph. D., associate Professor, associate Professor of the Department of Information systems, technologies and automation in construction,  
**D.V. Davydov**, master's student of Information systems, technologies and automation in construction Chair,  
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

*This paper introduces the concept of Building Information Modeling, examines the Revit program and its capabilities for specifications generation and integration with office applications, such as Excel. Of particular interest is the design of specifications in accordance with the requirements of GOST. There is a review of the software that interacts between Revit and Excel, strengths and weaknesses of which are highlighted. The directions for further development of integration programs when used in domestic design organizations are determined - exporting into generated specifications corresponding to GOST.*

BIM modeling, plugin, specification, computer programs.

## **Введение**

Информационное моделирование здания (BIM) – это процесс, основанный на создании 3D-модели, включающий цифровое представление физических и функциональных характеристик объекта. Результат этого процесса – информационная модель здания (Building Information Model), общий ресурс знаний об объекте, образующий основу для принятия решений в течение его жизненного цикла. Роль BIM – собрать всю информацию о проекте здания, и связать ее в одном файле с 3D-моделью. Autodesk Revit был создан для поддержки технологии BIM – чертежи и другие документы, созданные в Revit, являются частью информационной модели здания [4].

Autodesk Revit – это BIM-ориентированная CAD-система, разработанная компанией Autodesk в 2000 г. и поддерживаемая по сей день. Этот программный комплекс служит основной средой автоматизированного проектирования для многих архитекторов, конструкторов и инженеров-проектировщиков в строительной сфере, поскольку предоставляет возможности цикла разработки строительного объекта: от концепции до выпуска рабочих чертежей и спецификаций, включая трехмерное моделирование элементов зданий и плоское черчение. Это отличный инструмент для специалистов в области строительства – его компоненты подобраны под конкретные цели производства.

Важная функция Revit – создание ведомостей и спецификаций элементов строительного проекта, параметризированные версии которых занесены в информационную модель. При верном подходе к созданию модели с подробным указанием параметров семейств, на выходе получаются готовые спецификации, пригодные для использования в документации проекта строительного объекта.

Существуют решения по автоматизации создания спецификаций в Revit. Один из удобных вариантов – экспорт информации об элементах модели в MS Excel и последующая работа с данными в этой программе. Программное обеспечение для работы с электронными таблицами Microsoft Excel используется множеством бизнес-организаций по всему миру. Excel имеет сеточный интерфейс, который позволяет пользователю систематизировать любой тип информации, в том числе параметры компонентов информационной модели здания. Гибкость настройки внешнего вида таблиц позволит пользователю отредактировать полученные спецификации под любые требования. Все это делает актуальным исследование возможностей интеграции Revit с офисным табличным приложением MS Excel.

Для расширения базового функционала в Revit предусмотрена возможность установки сторонних «надстроек» (add-ins) или «плагинов» (plug-ins). Плагины – это программы, которые обеспечивают дополнительные функции для программного обеспечения Autodesk, отдельно встраиваемые в ПО Revit с возможностью их использования как обычного инструмента Revit, наряду с базовыми функциями – просто через вызов команды из ленточного меню сверху рабочего окна программы. Доступ к элементам модели и их характеристикам осуществляется с помощью интерфейса прикладного программирования Revit (Revit Application Programming Interface), позволяющего напрямую изменять элементы в информационной модели здания или получать доступ к данным для выполнения специализированных задач.

Таким образом, используя возможность самостоятельного дополнения

функционала Revit с помощью открытого API, автоматизация выгрузки параметров информационной модели здания в табличный формат представляется возможной и реализуемой. Суть концепции этой системы – быстрая и простая выгрузка параметров в один клик, без необходимости ручного формирования наполнения и внешнего вида спецификации – стандарт спецификации будет установлен заранее.

Целью работы является изучение имеющихся зарубежных и отечественных решений в области плагинов Revit, реализующих вышеописанную концепцию. Это позволит выявить сильные и слабые стороны программных решений и определить необходимость дальнейших шагов по разработкам в данном направлении, в частности интеграция с MS Excel и оформление спецификаций по требованиям ГОСТ.

### **Материалы и методы**

Системный анализ имеющегося программного обеспечения на основе открытых данных и сети интернет. В работе рассмотрены следующие программы и их возможности: «Export-Import Excel» (Virtual construction and technology BIM One Inc.), «Tables» (Planworks), «SheetLink | Excel Import/Export» (DiRoots), «Спецификация по ГОСТ в один клик» (Павел Рединов). Выделены их сильные и слабые стороны и возможность оформления спецификаций по ГОСТ.

### **Результаты**

Приведем результаты анализа возможностей имеющегося программного обеспечения по взаимодействию Revit с Excel в части подготовки спецификаций по требованиям ГОСТ.

*«Export-Import Excel»* (Virtual construction and technology BIM One Inc.) [1]. Плагин Import-Export Excel позволяет упростить управление данными в цифровых моделях, обрабатывая их вне Revit. Порядок работы надстройкой:

- спецификация из Revit экспортируется в файл Excel;
- данные можно изменить непосредственно в Excel (или других совместимых электронных таблицах);
- после изменения информации, файл Excel импортируется через надстройку, и спецификация Revit автоматически обновится с новыми данными.

Этот инструмент упрощает процесс управления данными, делегируя задачи, связанные с информационными моделями, всем участникам разработки проекта, у которых нет лицензии Revit или опыта работы с этим ПО.

Ограничения плагина:

- нет автоматической генерации спецификаций по имеющимся в модели компонентам, для экспорта, необходимо составлять спецификацию вручную;
- некоторые параметры модели помечены Revit как «только для чтения», их значения нельзя изменить где бы то ни было за пределами Revit;
- импорт работает только с файлами, которые были экспортированы в двунаправленном режиме с помощью этого плагина, поэтому не все спецификации можно импортировать;
- при добавлении строк или столбцов в файл, в Revit они не распознаются.

Данное решение дает начальное понятие о возможностях встраиваемого плагина для экспорта таблиц. Поскольку в Export-Import Excel нет автоматизации составления спецификаций этот вариант не удовлетворяет установленным требованиям, однако необходимо взять во внимание его возможности интерфейса

(рис. 1).

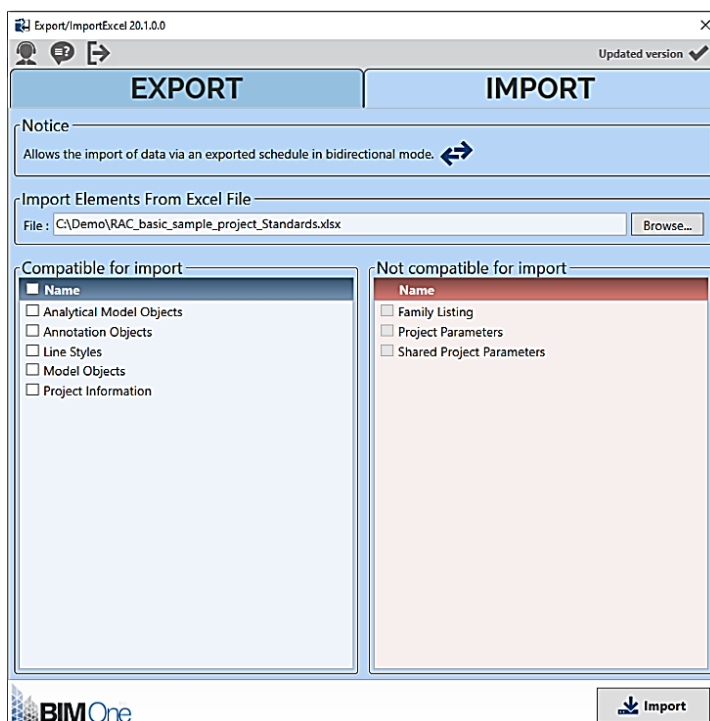


Рисунок 4 – Интерфейс Export-Import Excel

- отдельное окно с настройками текущей операции;
- вкладки экспорт/импорт;
- отображение совместимых/не совместимых к импорту параметров.

Есть возможность настройки форматирования выходной таблицы – форматирование копируется с исходной спецификации, уже настроенной в Revit. Результат экспорта представлен на рисунке 2.

	C	D	E	F	G	H	I
3	Family	Type	Length	Base Level	Base Offset	Top Level	Top Offset
4	ElementId	ElementId	Length	ElementId	Length	ElementId	Length
5			3100	Level 2	-100	Top of Parapet	0
6			3100	Level 2	-100	Top of Parapet	0
7			3100	Level 2	-100	Top of Parapet	0
8			3100	Level 2	-100	Top of Parapet	0
9			3561	Ref Beam system	0	Top of Parapet	0
10			7200	Foundation	0	Top of Parapet	0
11			3350	Level 1	-350	Level 2	0
12			2793	Level Lower	-44	Ref Beam system	-240
13			2793	Level Lower	-44	Ref Beam system	-240
14			2793	Level Lower	-44	Ref Beam system	-240
15			2793	Level Lower	-44	Ref Beam system	-240
16			2793	Level Lower	-44	Ref Beam system	-240
17			2793	Level Lower	-44	Ref Beam system	-240
18			2793	Level Lower	-44	Ref Beam system	-240

Рисунок 5 – Спецификация в Export-Import Excel

### «Tables» (Planworks) [3]

Tables – это приложение для работы с электронными таблицами, глубоко интегрированное в Revit. Tables совместим с Microsoft Excel, что делает его подходящим вариантом к рассмотрению в этом анализе.

Преимущества Tables:

- создание и форматирование таблиц Excel прямо из Revit;
- создание шаблонов, которые можно использовать для дальнейших проектов;
- имеется возможность редактировать, структурировать, управлять проектом Revit из табличного вида;
- работает двунаправленно – изменения, внесенные в таблицу, влияют на соответствующие значения в Revit.

Недостатки:

- нет автоматизации составления спецификаций;
- присутствует только автоматизация переноса существующих спецификаций в плагин.

Данный плагин интересен реализацией управления таблицей – прямо в окне плагина, в виде встроенного редактора таблиц, вроде Excel. Но в задаче автоматизации выгрузки параметров он решает только часть по переносу спецификации в свободно редактируемый табличный формат, а вопрос составления таблиц остается на пользователе, поэтому данный вариант не полностью соответствует поставленным условиям поиска плагина, интегрирующего Revit с Excel с полной автоматизацией процесса. Интерфейс плагина изображен на рисунке 3.

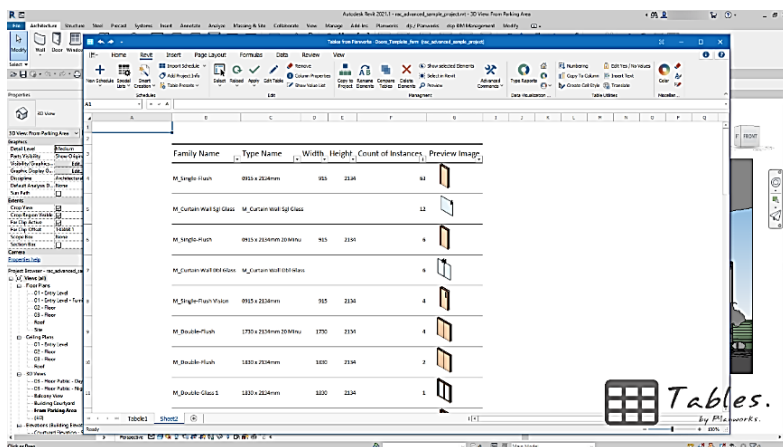


Рисунок 6 – Интерфейс Tables

### «SheetLink / Excel Import/Export» (DiRoots) [2]

SheetLink – это бесплатный плагин, позволяющий синхронизировать данные модели между Revit и электронными таблицами Excel. Данные модели экспортируются из Revit в Excel и импортируются обратно, при этом исходные элементы модели изменяются в соответствии с изменениями в таблице.

Возможности плагина:

- редактирование параметров экземпляров семейств в таблице и импорт изменений в Revit;
- предварительный просмотр/редактирование данных модели перед экспортом/импортом;

- экспорт и импорт с Google Drive.

Недостатки:

- невозможно выбрать стиль форматирования выходных таблиц, задать стандарт из вида;
- при изменении структуры выходной таблицы к стандартизированному виду, импорт будет невозможен.

SheetLink предлагает качественный интерфейс (рис. 4), но таблица, получаемая на выходе (рис. 5), удобна только как простое отображение данных, не отвечающее стандартам оформления документации. Правильно будет присмотреться к его дизайну и способу составления выборки экспортируемых элементов:

- выбор селекционной области: вся модель, активный вид, выделенные элементы;
- выбор по типу, фильтру, категории элемента;
- есть поиск по способу фильтрации;
- окно выбора параметра, заносимого в таблицу как столбец;
- возможно сохранить выбранные параметры как шаблон и использовать его в дальнейшем.

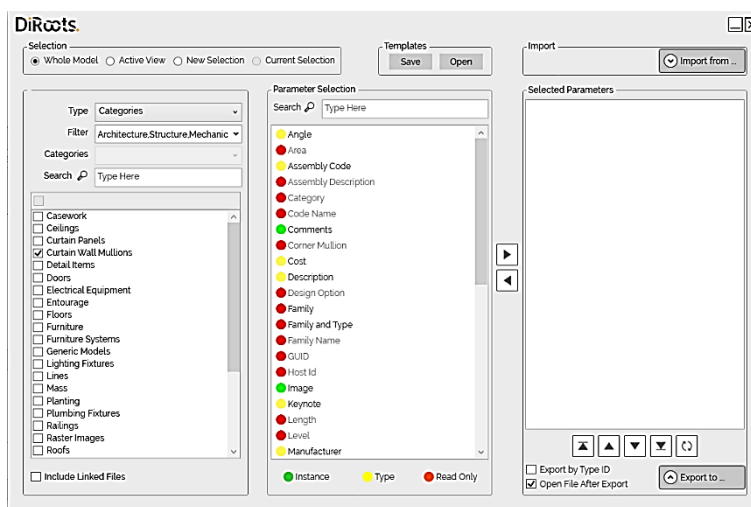


Рисунок 7 – Интерфейс SheetLink



Element ID	Description	Angle	Area	Assembly Code	Assembly Description	Category	Code Name	Comments
423134		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
423136		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
423138		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
423139		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
423148		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
423149		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
424777		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
424778		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
424779		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
424786		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
424787		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
485456		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
485458		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		
485492		0.00°	0 m²			Curtain Wall Mullions		

Рисунок 8 – Спецификация в SheetLink

### «Спецификация по ГОСТ в один клик» (Павел Рединов) [6]

Отечественный вариант, реализующий автоматическое создание спецификации для BIM-модели с разбиением ее на листы в соответствии с ГОСТ 21.110-2013. В любой столбец таблицы можно добавлять данные из модели:

- параметры семейства;
- параметры типоразмера;
- общие параметры;
- размеры соединителей;
- длины линейных элементов (трубы и воздуховоды);
- все остальные параметры, которые есть у элементов.

Преимущества по сравнению со штатными спецификациями Revit:

- элементы группируются по системам и сортируются по категориям (рис. 6);
- все категории в одной таблице (оборудование, воздухораспределители, трубы, воздуховоды, арматура и др.) (рис. 7);
- объединения в одном столбце разных параметров (можно в «Наименовании» вставить имя семейства, размер соединителя, общий параметр и любой другой параметр);
- количество штучных элементов и длина линейных в одной колонке;
- автоматическая разбивка таблицы на пронумерованные листы с заданными основными надписями – на первом листе с «большим» штампом, на остальных с «маленьким»;
- вид таблицы полностью соответствует требованиям ГОСТ 21.110-2013; [5];
- в один клик экспорт в Excel.

Недостатки данного решения:

- получаемые таблицы не интегрированы со встроенными спецификациями Revit – это листы из линий аннотаций и однострочных текстов;
- нет возможности, до экспорта в Excel, вставить новую строку в таблицу;
- нет фильтрации по параметру, например, элементов, которые не должны быть включены в спецификацию;
- нет сортировки объектов, например, по параметру секции, уровня и т.д.;
- поддержка только одного ГОСТ;
- созданная спецификация статична и не меняется при изменении модели – для обновления спецификации необходимо удалить ее и создать заново.

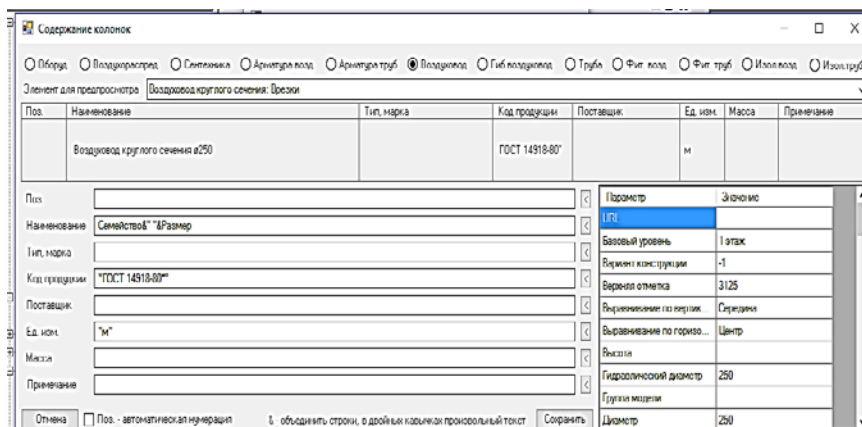


Рисунок 9 – Интерфейс «Спецификация по ГОСТ в один клик»

Поз.	Наименование и техническая характеристика	Тип, марка, обозначение документа экранный текст	Код продукция	Поставщик	Ед. изме- рений	Кол.	Масса 1 ед., г	Примечание
Монтажные материалы и оборудование на стадии Проект								
К1 К1.2.32 К1.1								
1	канальный кондиционер	LSF-6000(2)E			шт	1		
К1								
1	АМР(0)	АМР		"Артис"	шт	3		
2	Воздуховод круглого сечения ø125		ГОСТ 14918-80*		м	24,9		
3	Воздуховод прямоугольного сечения 300x100		ГОСТ 14918-80*		м	0,1		
4	Врезка прямоугольного сечения 300x100				шт	3		
5	Защита круглая ø125				шт	1		
6	Отпад круглого сечения 90 Ø1" ø125				шт	3		
К1								
1	Труба полипропиленовая ø25 мм				м	8,2		
К1								
1	АМР(0)	АМР(0)		"Артис"	шт	3		
2	ДПУ(Мв)	Д100			шт	1		
3	Воздуховод круглого сечения ø125		ГОСТ 14918-80*		м	19,0		
4	Воздуховод прямоугольного сечения 300x100		ГОСТ 14918-80*		м	0,1		
5	Гибкий воздуховод круглого сечения ø100 мм				м	2,8		
6	Врезка прямоугольного сечения 300x100				шт	3		
7	Отпад круглого сечения 45 Ø1" ø125				шт	2		
8	Отпад круглого сечения 90 Ø1" ø125				шт	4		
9	Переход круглого сечения - Угол 45 Ø1" ø125-ø100				шт	1		
К1.1								
1	ДПУ(Мв)	Д250			шт	3		
2	Воздуховод прямоугольного сечения 1000x200		ГОСТ 14918-80*		м	0,1		
3	Гибкий воздуховод круглого сечения ø200 мм				м	11,3		
4	Камера сечения 1000x200-ø200-ø200				шт	1		
5	Переход круглого сечения - Угол 45 Ø2" ø250-ø200				шт	3		
К1.2								
1	ДПУ(Мв)	ДПУ-Мв 250			шт	3		
2	Воздуховод прямоугольного сечения 1000x200		ГОСТ 14918-80*		м	0,1		
3	Гибкий воздуховод круглого сечения ø200 мм				м	11,9		
4	Камера сечения 1000x200-ø200-ø200				шт	1		

Рисунок 10 – Спецификация в «Спецификация по ГОСТ в один клик»

Резюмируя, этот плагин больше ориентирован на использование непосредственно в Revit, а экспорт в Excel скорее дополнительная функция. Тем не менее связь между элементами модели и наполнением таблиц отсутствует, что ставит данное решение в один ряд с теми, которые не предоставляют вид на таблицы в Revit, а только производят файл с таблицами. Данный плагин распространяется на коммерческой основе, есть демоверсия с ограничением по числу экспортируемых в таблицу строк. Поддержка ГОСТ выделяет это решение, но ГОСТ используется только один.

### **Выводы**

Среди опубликованных решений отсутствуют варианты плагинов автоматизации заполнения штатных спецификаций, предположительно, в силу ограничений API. Тем не менее, проработка варианта автоматизации выгрузки BIM в стороннюю таблицу остается актуальной, потому что в ходе анализа не было обнаружено плагина, объединяющего сильные стороны всех перечисленных выше аналогов, и имеющего в себе преимущество при использовании в отечественных проектных организациях – выгрузку в спецификации, соответствующие ГОСТ.

### *Литература*

1. Export-Import Excel / Autodesk App Store [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://apps.autodesk.com/RVT/ru/Detail/Index?id=6290726048826015851&appLang=en&os=Win64> (дата обращения: 07.02.2021).
2. SheetLink | Excel Import/Export / Autodesk App Store [Электронный ресурс]. Режим доступа:
3. <https://apps.autodesk.com/RVT/ru/Detail/Index?id=4089038677237188183&appLang=en&os=Win64> (дата обращения: 07.02.2021).
4. Tables / Autodesk App Store [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://apps.autodesk.com/RVT/ru/Detail/Index?id=2349381363455444680&appLang=en&os=Win64> (дата обращения: 07.02.2021).
5. Zolotova J., Vatin N. Autodesk Revit - Key to successful training of highly qualified civil engineers // Applied mechanics and materials. Т. 725-726. 2015. С. 1617-1625.
6. ГОСТ 21.110-2013. Система проектной документации для строительства (СПДС). Спецификация оборудования, изделий и материалов М. 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200107995> (дата обращения: 07.02.2021).
7. Спецификация по ГОСТ в один клик / Autodesk App Store [Электронный ресурс]. Режим доступа:
8. <https://apps.autodesk.com/RVT/ru/Detail/Index?id=515154252762362011&appLang=ru&os=Win64> (дата обращения: 07.02.2021).

УДК 674.815

## Особенности механической обработки древесных композитов

**В.В. Абразумов**, доктор технических наук,  
профессор кафедры механики и инженерной графики,  
**Б.Л. Спирин**, старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики,  
Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение  
Высшего образования «Академия ГПС МЧС России», г. Москва

*В работе рассмотрены особенности резания древесных композиционных материалов в сравнении с обработкой металлических сплавов. Рассмотрены вопросы влияния режимов резания на температуру передней и задней поверхностей инструмента при цилиндрическом фрезеровании цементно-стружечных плит. Представлены графические зависимости распределения температур на контактных поверхностях реза.*

Древесные композиционные материалы, качество поверхности, износостойкость инструмента, поликристаллические алмазы, стойкость.

## Features of mechanical processing of wood composites

**V.V. Abrazumov**, Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,  
**B.L. Spirin**, Senior Lecturer of the Department of Mechanics  
and Engineering Graphics,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia»,  
Moscow

*The paper considers the features of cutting wood composite materials in comparison with the processing of metal alloys. The questions of the influence of cutting modes on the temperature of the front and back surfaces of the tool during cylindrical milling of cement-chipboard are considered. Graphical dependences of the temperature distribution on the contact surfaces of the cutter are presented.*

Wood composite materials, surface quality, tool wear resistance, polycrystalline diamonds, durability.

### Введение

Широкое применение древесных композиционных материалов в строительстве и мебельном производстве вызвало необходимость высокой производительности и качества обработки этих материалов. Многообразие видов этих материалов, которые различаются составом, структурой, свойствами и относятся к труднообрабатываемым материалам, по сравнению с натуральной древесиной, требуют использования инструментов высокой твердости и стойкости. В промышленности используются различные виды обработки этих материалов, но

наиболее распространенными являются пиление заготовок, осуществляемое на форматно-обрезных станках, и фрезерование кромки и пласти плитных материалов цилиндрическими и концевыми фрезами.

С развитием современной технологии обработки, направленной на использование дорогостоящих высокопроизводительных станков с ЧПУ и обрабатывающих центров, коренным образом изменились требования к качеству режущего инструмента. Получение высоких стойких характеристик дереворежущего инструмента требует грамотного выбора режимов резания, а также улучшения свойств инструментальных материалов, отвечающих возрастающим требованиям по качеству и точности обработки.

#### **Основная часть**

Механическая обработка резанием древесных композиционных материалов имеет ряд специфических особенностей, что связано с особенностью их строения и свойств, которые необходимо учитывать при выборе инструментального материала и режимов резания для конкретного обрабатываемого материала.

В отличие от металлических материалов они обладают анизотропными свойствами, которые оказывают влияние на процесс стружкообразования при обработке по кромке и пласти плитных материалов [1]. Из-за невысоких прочностных характеристик и низкой адгезионной связи древесного наполнителя со связующим их обработку следует производить острозаточенным инструментом. При затуплении режущей кромки инструмента и при увеличении сил резания происходит разрыв адгезионных связей и образование трещин на границе фаз, разрушение частиц древесного наполнителя и ухудшение качества обработанной поверхности.

Существенное влияние на изнашивание режущей кромки инструмента оказывает высокая микротвердость абразивосодержащей составляющей связки, в качестве которой используются синтетические смолы (ДСтП, МДФ) и цемент (ЦСП) [2], а также полимерные покрытия плитных древесных материалов, обладающие высокой твердостью и износостойкостью (ламинированные древесностружечные плиты – ЛДСтП). Например, твердость абразивных частиц цементного камня соизмерима с микротвердостью структурных составляющих инструментального материала. Поэтому для обработки таких материалов используются материалы высокой твердости (твердый сплав, поликристаллические алмазы).

Существенной особенностью древесных композитов является наличие в связке абразивных частиц высокой твердости, которые в условиях размягчения поверхностных слоев под действием тепла, вызывает абразивный износ рабочих поверхностей инструмента. При резании композитов с полимерным связующим – древесно-полимерный композит (ДПК) – при ее нагреве не исключена деструкция связующего, который также оказывает химическое воздействие на дефекты поверхности и вызывает механохимический износ [3].

Отличительной особенностью древесных композитов является высокая упругость древесного наполнителя и способность его к упругому восстановлению деформированного слоя. Следствием этого является увеличение площади контакта на задней поверхности режущего клина и ее износ. Основным критерием, определяющим износ инструмента, является длина фаски износа на задней поверхности, от площади которой зависят силы трения и величина теплового потока, поступающего в режущий клин и создающего теплонапряженность в его

микроповерхностных слоях [4].

Как известно, изнашивание инструмента при резании материалов носит комплексный характер, т.е. происходят различные виды износа: абразивный, диффузионный, химический и др. [5,6]. При резании древесных композитов превалирующим является ударно-абразивный износ, в результате которого происходит пластическая деформация, сопровождающаяся отрывом частиц, микрорезание абразивными частицами и хрупкое разрушение твердой оставляющей инструментального материала.

Большая величина упругого последствия, характерная для композиционных материалов, оказывает влияние на шероховатость и точность обработки, которая очень важна для получения плотного соединения, например, «паз-гребень» ламинированных панелей для полов и паркетной доски. Немаловажная роль в получении точности обработки принадлежит жесткости системы инструмент-заготовка/б. Возникающие в процессе резания вибрации вызывают не только снижение качества обработанной поверхности и точности, но и активируют механизм хрупкого разрушения острозаточенной кромки инструмента, происходящий на начальном пути резания.

Критерием износа инструмента является длина фаски износа по задней поверхности, от величины которой зависят напряжения в прикромочной области обрабатываемой плиты. Недопустимая величина этих напряжений может вызывать дефекты поверхности в виде расслоений, «разломачиваний» и повышение в целом шероховатости.

Основным критерием качества обработанной поверхности древесных плиточных материалов является величина сколов на пласти в ламинированном покрытии несмотря на то, что обработанная поверхность кромки подлежит финишной отделке с помощью кромочного пластика.

При обработке композитов процесс стружкообразования существенно отличается от металлов и заключается в интенсивном разрушении стружки с образованием пылеобразной составляющей, которая оказывает негативное воздействие на элементы корпуса инструмента, детали станочного оборудования, окружающую среду и обслуживающий персонал [1]. Поэтому техническим вопросам отвода стружки уделяется серьезное внимание.

Важнейшей особенностью древесных композитов является их низкая теплопроводность (0,1...0,40 Вт/(мК), которая оказывает огромное влияние на распределение тепловых потоков в зоне резания. Вследствие слабого отвода тепла со стружкой и в обрабатываемый материал основная доля тепла отводится в режущий инструмент (более 90%). Кроме того, в условиях прерывистого высокоскоростного резания происходит термоциклирование микронных по толщине слоев инструментального материала, носящего характер «температурных вспышек». Следствием этих процессов являются циклические температурные напряжения, вызывающие деформацию и разрушение межфазных границ структурных составляющих материала инструмента и вызывающих его износ. Поэтому одним из главных требований к инструментальному материалу – это способность интенсивно отводить выделяющуюся в зоне резания теплоту.

Древесные композиционные материалы по типу связующего можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся древесные композиты, в которых в качестве связующего используются органические связующие:

синтетические полимеры. Наибольшее применение нашли термореактивные связующие. К таким композициям относятся, древесно-стружечные плиты (ДСтП), ламинированные древесно-стружечные плиты (ЛДСтП), древесноволокнистые плиты средней плотности (MDF) и высокой плотности (HDF). Эти древесные композиты нашли наиболее широкое применение в мебельной промышленности.

Во второй группе используются минеральные вяжущие – клинкерные цементы, гипс и другие. К таким композициям относится цементно-стружечная плита (ЦСП), фибролит. Древесные композиты на основе минеральных вяжущих обладают высокой стойкостью к воспламенению и поэтому нашли широкое применение в строительстве.

Древесные композиционные материалы изготавливают в виде плит методом плоского прессования, широко применяются в мебельном производстве и в процессе производства изделий подвергаются различным видам механической обработки (пилению, фрезерованию, сверлению).

Для обработки этих материалов используются твердые сплавы, а в последние десятилетия инструмент, оснащенный лезвиями из поликристаллического синтетического алмаза (ПКА) или монокристаллического синтетического алмаза (МКА).

Алмазный инструмент состоит из подложки твердого сплава с синтезированным на нем тонкого слоя (1,2мм) поликристаллического алмаза.

Инструмент из ПКА применяется для обработки твердых пород древесины и композиционных материалов ЛДСтП, MDF и HDF, а инструмент из МКА для обработки кромок ламинированного паркета.

Одним из основных видов механической обработки композиционных материалов является цилиндрическое и концевое фрезерование.

В основе механизмов изнашивания режущего клина инструмента лежат тепловые процессы, поэтому представляет интерес оценка этого влияния. Существующий метод экспериментального определения температуры на резце (метод перерезаемой термодпары) не позволяет измерить мгновенную температуру на микроконтактных площадках, поэтому решение этой задачи возможно только аналитическим путем.

В работах [7,8] на основе решения уравнения теплового баланса с учетом особенностей древесных композитов получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать температуру на контактных поверхностях режущего инструмента при обработке плитных древесных композиционных материалов на минеральном вяжущем (цементно-стружечных плит).

Для расчета распределения температуры на контактных поверхностях инструмента рассмотрим процесс цилиндрического фрезерования кромки плиты из ЦСП [9].

Теплофизические характеристики обрабатываемого материала: коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , коэффициент температуропроводности

$\omega = 1,553 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Материал режущей части инструмента – твердый сплав ВК8 ( $\lambda = 54,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ). Режимы резания: подача –  $S_z$ , мм/зуб; скорость резания –  $V$ , м/с; глубина резания –  $t$ , мм.

Расчетная схема цилиндрического фрезерования представлена на рисунке 1.

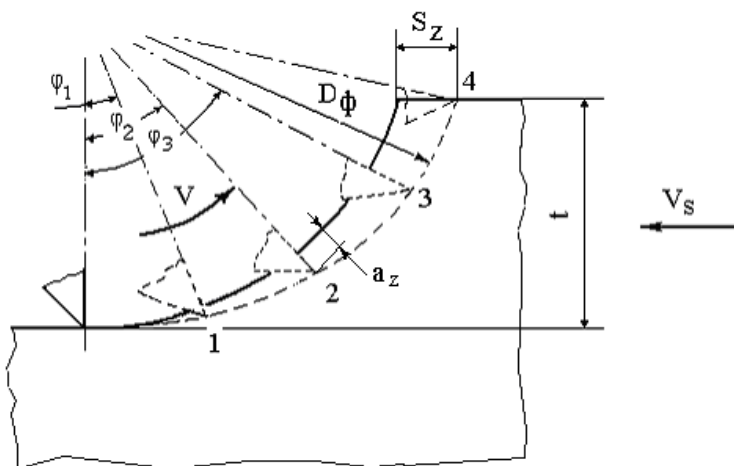


Рисунок 1 – Расчетная схема цилиндрического фрезерования

Положение зуба фрезы на длине дуги резания (точки 1...4) определяется углами поворота резца  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и т.д., отсчитываемыми от вертикальной оси окружности резания.

При резании образуется стружка переменного сечения, толщина которой зависит от подачи и угла поворота зуба фрезы и определяется по формуле:

$$a_z = S_z \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

По мере поворота зуба инструмента и увеличения толщины срезаемого слоя происходит изменение длины контакта стружки с передней поверхностью резца, возрастание касательной  $F_x$  и нормальной  $F_z$  составляющих сил резания и повышение температуры на рабочих поверхностях резца.

Расчет мгновенных значений составляющих сил резания для каждого положения зуба фрезы производился по эмпирическим зависимостям [9].

$$F_z = 310.2 - 113.24 \cdot S_z + 12.4 \cdot L_f - 4.108 \cdot \gamma + 18.872 \cdot S_z^2 + 0.04 \cdot S_z \cdot L_f + 0.872 L_f^2 - 0.494 L_f \cdot \gamma + 0.096 \gamma^2;$$

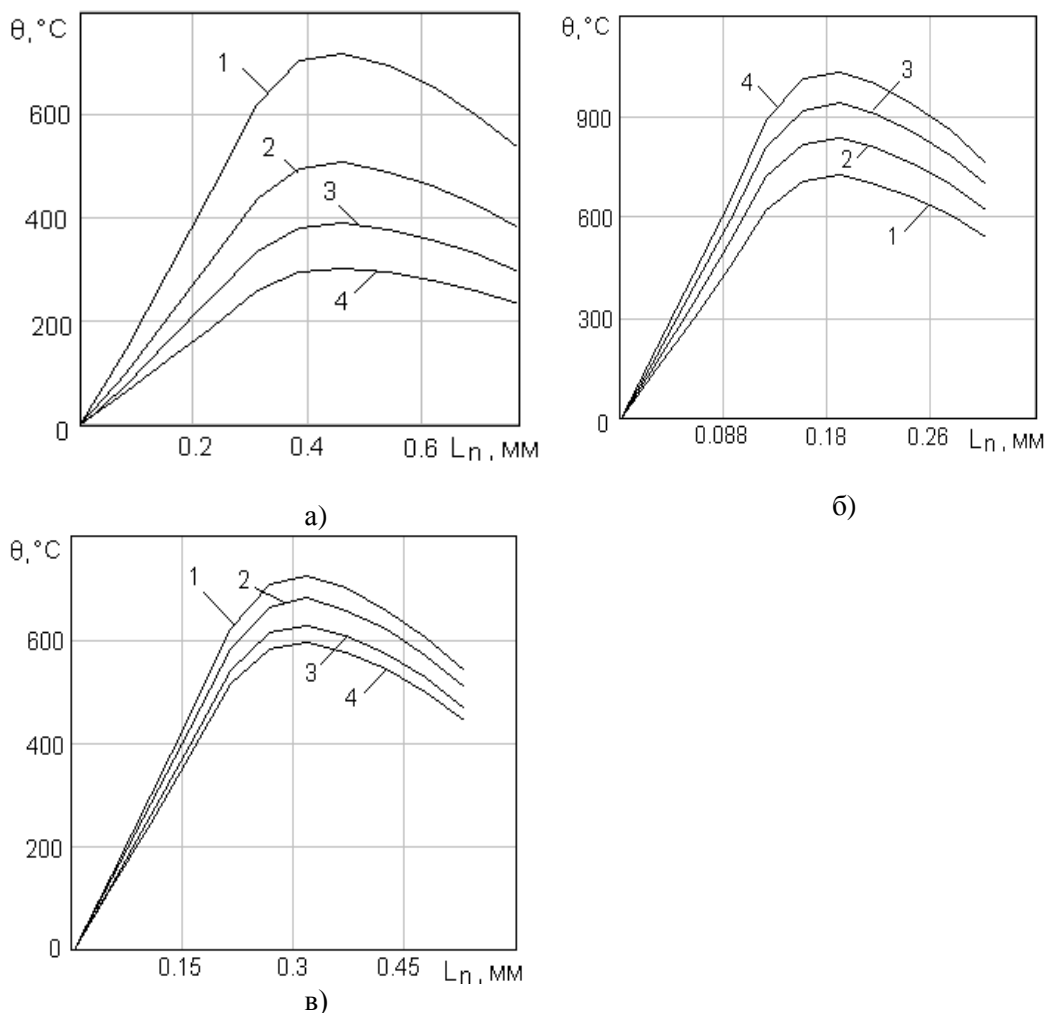
$$F_x = 215.704 - 37.252 \cdot S_z + 18.276 \cdot L_f - 10,396 \cdot \gamma - 3,2 \cdot S_z^2 - 1.82 \cdot S_z \cdot L_f + 1.108 \cdot S_z \cdot \gamma - 0.3748 \cdot L_f^2 + 0.179 \cdot \gamma^2$$

где  $L_f$  – длина пути резания, км;

$\gamma$  – передний угол, рад.

Для каждого положения зуба фрезы рассчитывалось распределение температуры на задней и передней поверхностях. Результаты расчетов представлены на рисунках 2, 3.





**Рисунок 2** Влияние режимов резания на распределение температуры на передней поверхности резца:

а – подача на зуб фрезы  $S_z$ , мм: 1 –  $SZ1=0,8$ ; 2 –  $SZ2=1,4$ ; 3 –  $SZ3=1,9$ ; 4 –  $SZ4=2,4$ ;

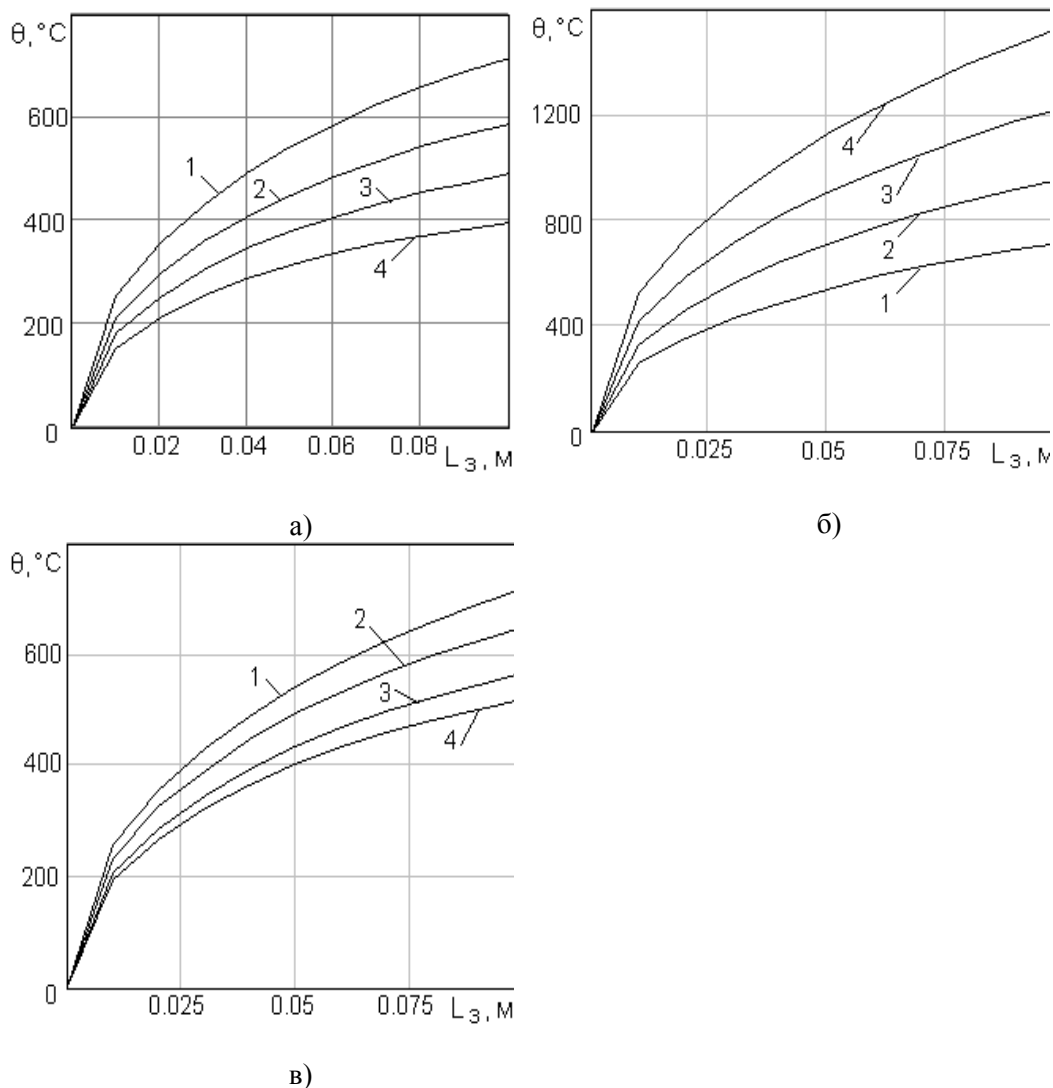
б – скорость резания –  $V$ , м/с: 1 –  $V1=20$ ; 2 –  $V2=25$ ; 3 –  $V3=30$ ; 4 –  $V4=35$ ;

в – глубина резания –  $t$ , мм: 1 –  $t1=4$ ; 2 –  $t2=6$ ; 3 –  $t3=8$ ; 4 –  $t4=10$

Распределение температуры на передней поверхности режущего клина характеризуется наличием максимума на некотором расстоянии от режущей кромки, что обусловлено влиянием сил трения на площадке контакта стружки с поверхностью резца. С увеличением подачи и глубины резания длина площадки контакта стружки с передней поверхностью возрастает, а мощность теплового потока, распределенная по площади контакта, уменьшается, что вызывает снижение температуры. Теплота деформации стружки вследствие низкой теплопроводности ЦСП практически полностью остается в стружке и не оказывает влияния на распределение температуры на поверхности резца. При увеличении ско-

рости резания возрастает механическая работа, затраченная на срезание слоя обрабатываемого материала, что приводит к увеличению мощности теплового источника и увеличению температуры на передней поверхности резца.

Основным источником теплоты на задней поверхности резца является трение его контактной поверхности с обрабатываемым материалом.



**Рисунок 3 – Влияние режимов резания на распределение температуры на задней поверхности резца:**

**а – подача на зуб фрезы  $S_z$ , мм: 1 –  $SZ1=0,8$ ; 2 –  $SZ2=1,4$ ; 3 –  $SZ3=1,9$ ; 4 –  $SZ4=2,4$**

**б – скорость резания  $V$ , м/с: 1 –  $V1=20$ ; 2 –  $V2=25$ ; 3 –  $V3=30$ ; 4 –  $V4=35$ ;**

**в – глубина резания  $t$ , мм: 1 –  $t1=4$ ; 2 –  $t2=6$ ; 3 –  $t3=8$ ; 4 –  $t4=10$**

Уровень температур на задней поверхности несколько выше по сравне-

нию с передней поверхностью, а диапазон изменения температуры ниже, что объясняется влиянием инерционности процесса перераспределения тепловых потоков.

Увеличение скорости резания приводит к значительному росту температуры на задней поверхности, что является следствием повышения как мощности теплового источника, так и температуры на передней поверхности резца, результатом которой является снижение оттока тепла со стороны задней поверхности. Температура на задней поверхности зависит от скорости резания в большей степени, чем на передней.

#### Заключение

1. При выборе марки инструментального материала и назначении режимов обработки необходимо принимать во внимание особенности обрабатываемого материала

2. Уровень температуры на контактных площадках резца существенным образом зависит от режимов резания, что необходимо учитывать при их выборе для инструментальных материалов с разными теплофизическими свойствами.

3. На износостойкость резца оказывают влияние не только абсолютные значения температуры в поверхностных слоях, но и градиент температур, который определяет развитие того или иного механизма изнашивания инструментального материала.

#### Литература

1. Суханов В.Г. Стружкообразование при резании цементно-стружечных плит. В сб. «Автоматизация и комплексная механизация процессов деревообработки». Научные труды, вып.228. М.: МЛТИ, 1990. С. 5.
2. Шпынова Л.Г. Физико-химические основы формирования цементного камня. Львов, 1981. 160 с.
3. Морозов В.Г. Исследование влияния некоторых факторов режимов резания на затупление инструментов (продольное фрезерование) Дисс... канд. техн. наук. М., 1966. 144 с.
4. Талантов Н.Ф. Основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. 240.
5. Памфилов Е.А., Петренко Н.А. К вопросу о механизме изнашивания дереворежущего инструмента // Изв. вузов. Лесн. журн. 1978. № 3. С. 148.
6. Разуваев С.П. Прогнозирование стойкости дереворежущего фрезерного инструмента: Дисс...канд. техн. Наук. М., 1987. 161 с.
7. Резников А.В. Теплофизика резания. М., «Машиностроение», 1969. 288с.
8. Абразумов В.В., Котенко В.Д. Моделирование процесса резания древесных композитов на минеральных вяжущих // Лесной вестник, № 6 (42). 2005. с. 58-62.
9. Квачадзе Т.Д. Оптимизация процесса фрезерования цементно-стружечных плит.

УДК 67.03

## **Новый композиционный материал с нейтрализованным красным шламом**

**А.А. Баринкова**, аспирант I года обучения кафедры «Материаловедения и технологии художественных изделий»,  
**В.Ю. Пирайнен**, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедения и технологии художественных изделий»,  
**В.М. Баринков**, магистр II года обучения кафедры «Материаловедения и технологии художественных изделий»,  
Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург

*В статье предложено решение по утилизации красного шлама в больших количествах с перспективой создания цикла его полной переработки. Для определения области работы были проведены аналитические исследования по уже известным технологиям переработки, описаны их основные преимущества и недостатки. В процессе анализа была определена наиболее перспективная область – непосредственное использование отхода, а именно производство строительных материалов. Были проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях, которые показали конкурентоспособность полученного композита относительно традиционных бетонов на основе портландцемента и выявлены возможные области применения нового материала.*

Красный шлам, композиционный материал, строительные материалы, утилизация, переработка.

## **New composite material, with neutralized red mud**

**A.A. Barinkova**, Ph.D. student of the department «Material Science and Technology»,  
**V.Y. Piirainen**, doctor of Engineering Science, professor of the department «Material Science and Technology»,  
**V.M. Barinkov**, master of the department «Material Science and Technology»,  
Saint-Petersburg Mining University, г. Saint-Petersburg

*This paper proposes a solution for utilization of red mud in large amounts with the prospect of creating a complete recycling cycle. In order to determine the area of work, theoretical studies of already known recycling technologies were conducted, their main advantages and disadvantages were described. In the process of analysis, the most promising area was determined – the direct use of waste, namely the production of building materials. Experimental studies have been conducted in laboratory conditions, which showed the competitiveness of the resulting composite relative to the traditional Portland cement and identified possible applications of the new material.*

Red mud, composite material, construction materials, utilization, recycling.

**Введение.** Как известно XXI век является веком информационных технологий. Это то время, когда люди научились расширять свои познания в разных отраслях и использовать их для своего развития. Именно в этом веке мировое сообщество выделило экологию, как одну из самых острых проблем человечества. Одна из причин, это – негативные последствия промышленного развития как результат перехода общества от аграрной экономики к индустриальному производству. Предыдущие два века стали периодом, когда было построено наибольшее количество заводов и предприятий, отрицательные результаты, от деятельности которых мир наблюдает сегодня. К настоящему времени количество не утилизированных или не переработанных отходов достигло критических значений. Решение экологических проблем промышленности лежит в выпуске экологически безопасной продукции или создание технологий позволяющих перерабатывать или утилизировать отходы производственного цикла.

О производстве металлов и их последующей обработке человечеству известно с древних времен. Металлическим изделиям люди всегда находили широкое применение, поэтому со временем качество металла постоянно улучшалось, а соответственно менялись и технологии его получения. Основной прорыв в металлургии пришелся на XIX-XX века в процессе перехода к индустриальному обществу и появления большого количества промышленных предприятий. Именно на этот период пришелся расцвет цветной металлургии. Одним из самых востребованных цветных металлов является алюминий, производство которого по своим масштабам уступает лишь производству стали. Широкое применение алюминий получил благодаря своей пластичности, легкости, устойчивости к коррозии и сверхнизким температурам, малой температуре плавления (660 °С) а так же низкой себестоимости. Он используется в виде сплавов в области производства конструкционных материалов, материалов для пищевой промышленности, военной промышленности и даже авиационной. Не смотря на востребованность этого металла его получение нельзя назвать экологически безопасным. В начальный период развития металлургической промышленности мало уделялось внимания вопросам утилизации или переработке отходов, поэтому большая часть из них сбрасывалась или в реки, озера, моря и иные водохранилища, или производилось их захоронение в почву, или иные рукотворные сооружения для их складирования. То же самое касалось и алюминиевых заводов, для отходов производства которых, возводились специальные шламохранилища для их последующего складирования.

**Материалы и методы.** Целью исследования является создание композиционного материала, где в качестве одного из компонентов будет выступать обработанный до нейтрального состояния красный шлам. Таким образом, удастся решить проблему, связанную с утилизацией красного шлама, и наладить выпуск товарной продукции для получения дополнительной прибыли компаниям-производителям металла.

Для достижения поставленной цели необходимо выделить следующие задачи:

1. Анализ известных решений переработки и утилизации красных шламов;
2. Выявление недостатков существующих решений;
3. Анализ возможных путей решения применения красного шлама;
4. Разработка концепции масштабной утилизации красного шлама;
5. Разработка методики и проведение экспериментальных исследований;
6. Выявление возможных областей применения нового материала.

До выполнения экспериментальных исследований был проведен поиск уже известных решений по переработке и утилизации красных шламов, а так же выявлены их основные преимущества и недостатки. Была предложена концепция, позволяющая нейтрализовать шлак для его дальнейшего использования. В качестве исходных для создания композиционного материала будут использованы красный шлак, измельченный до пылевидной фракции (0,005-0,002 мм) и магнезиальное вяжущее, изготовленное по ГОСТу 4526-75. Для предварительной обработки красного шлама, использовались жидкое стекло и этилен карбонат, а в качестве затворителя, необходимого для получения твердого вещества при смешении обработанного красного шлама и магнезиального вяжущего – бишофит.

**Обсуждение.** Среди большого количества и разнообразия отходов в процессе получения алюминия из глинозема самым вредным и опасным считается «красный» шлак. «Красный» шлак – твердый остаток боксита, полученный способом Байера [1]. Из-за высокой щелочности (10-13 рН), о которой говорит наличие в химическом составе натриевой каустической щелочи (табл. 1), и мелкой дисперсности (от 100 нм до 200 мкм) шлак является трудноутилизируемым отходом и представляет угрозу для окружающей среды (табл. 2).

**Таблица 1 – Химический состав «красного» шлама на содержание основных оксидов, %**

п.п.п.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	прочие
5,7	14,0	9,4	42,2	12,1	3,9	4,1	8,6

**Таблица 2 – Гранулометрический состав и удельная поверхность «красных» шламов**

Содержание фракций, % (по массе), в интервале с граничными радиусами, мм							Удельная поверхность м <sup>2</sup> /г
Гравий		Песок		Пыль крупная и мелкодисперсная	Пыль иловая	Глина	
+20	10-2	2-1	1-0,05				
-	-	-	1-2	0,05-0,005	0,005-0,002	<0,002	Не определена
-	-	-	1-2	89-95	3-5	1-3	

Возникновение в шламе высоких значений рН происходит за счет того, что боксит выщелачивается едким натром в автоклаве. А на получение таких по величине частиц, как указано в таблице 2, влияет тонкость помола боксита, а так же химическое диспергирование его частиц, размера образующихся фаз и агре-

гации отхода в процессе его промывки [2].

Из-за наличия этих двух характеристик красного шлама его утилизация или переработка приобретает сложный характер, так как процесс становится трудоемким, энергоемким и экономически затратным. В качестве оптимального решения было принято создание специальных шламохранилища, находящихся рядом с глиноземными заводами с целью транспортировки туда отходов в жидком или пастообразном состоянии. Этот метод складирования и хранения отходов является в мире основным допустимым до возникновения первой крупной аварии произошедшей на отстойнике в Венгрии в 2010 году. В результате было затопление многочисленной территории, проникновение в близлежащие водохранилища, уничтожение флоры и фауны и получение химических ожогов рядом проживающего населения (рис. 1). Причиной аварией стало многолетнее воздействие щелочи накопленного шлама на бетонные стены, а так же нарастающее напряжение в стыках из-за увеличения объема отхода. Подобная ситуация повторилась в 2019 году в Бразилии на другом шламохранилище, где причинами катастрофы и соответственно следствиями выступали такие же факторы, как и при возникновении венгерской аварии (рис. 2).



**Рисунок 1 – Авария в Венгрии, 2010 г. [18]**

Очевидно, что вероятность повторения прорыва очередного отстойника и проникновения красного шлама в окружающую среду от года в год только возрастает, поэтому необходимо срочно искать другие способы решения этой проблемы. Стоит отметить, что красного шлама в процессе производства первичного алюминия образуется в два раза больше, чем получаемого металла, а его количество с момента развития глиноземных и алюминиевых заводов и до сегодняшнего дня уже приближается к 4 млрд тонн [3, 4]. Шлам так же оказывает негативное влияние на человека, вызывая при длительном контакте химические ожоги, го-

ловные боли, повышение давление, поражение внутренних органов и пр. [5].



Рисунок 2 – Прорыв дамбы в Бразилии, 2019 г. [19]

Перечисленные факторы подчеркивают значимость поиска решения по переработке или утилизации красного шлама, а описанные аварии сообщают о том, что нынешний метод складирования является лишь временным способом.

**Теоретические исследования.** Метод складирования является не единственным методом работы со шламом после его выщелачивания. Технологии условно разделяются на пирометаллургические, гидromеталлургические, на способы непосредственного использования шламов [6].

Суть пирометаллургического метода – это восстановление металла, в нашем случае это алюминия и железа, при помощи высоких температур и из различных соединений, например: восстановление более активными металлами, кремнием, водородом, гидридами металлов и пр. Существуют методы, когда составляющие отхода разделяют при помощи магнитной сепарации и в дальнейшем производят классификацию по крупности частиц. Главный недостаток этого способа это то, что невозможно производить масштабно отделение одного соединения от другого. Так же проведено много работ по восстановлению железа из отхода. В качестве примера выступает исследование, при котором было произведено полное восстановление части железа из оксидов на первой стадии при 1000 °С в процессе обжига красного шлама с известью и коксом и почти полное восстановление железа на второй стадии уже из FeO с получением в последствии чугуна из саморассыпающегося шлака, которые в свою очередь в будущем является материалом для извлечения глинозема путем выщелачивания [7]. Недостатками этих методов является то, что железо переходит в чугун на стадии выплавки, что требует дополнительных затрат на металлургическое оборудование для передела чугуна в сталь. Так же не происходит этими способами извлечение других имеющихся металлов как отдельных продуктов. Стоит отметить, что присутствие этих элементов в чугуне является положительным моментом, но до тех пор, пока он не отправляется на переработку в сталь, так как при осуществлении



этого процесса происходит окисление чугуна, а вместе с ним и титана с кремнием, что является нежелательным эффектом, так как в последующем эти металлы уходят в шлаковую фазу. Существует способ, при котором осуществляется поэтапно восстановление железа, кремния и титана путем подготовки шихты и подбора температурных режимов для каждого отделяемого элемента. Но основным недостатком выступает вновь переход оксидов кремния и титана в чугун, который из-за наличия в нем примесей в виде вышеуказанных составляющих становится менее ценным [8]. Из этого можно сделать выводы, что пирометаллургические методы являются возможным решением для переработки красного шлама в процессе производства глинозема, но для достижения положительных результатов требуется увеличить эффективность извлечения металлов, а так же улучшить их качество в ходе выполнения процедуры и по ее окончанию.

Гидрометаллургический метод включает в себя процедуру выделения всех компонентов из руд, концентратов и отходов производства благодаря водным растворам определенных химических реагентов. Суть способа заключается в том, что измельчаются зерна минералов до состояния, при котором возможно извлечь металл. Далее изменяется химический состав руды или концентрата, чтобы в дальнейшем вещество можно было выщелачивать, например, с помощью хлорирования, окисления, сульфатизирования или спекания (восстановительный обжиг). На следующем этапе происходит само выщелачивание в раствор с последующей промывкой на фильтрах. Затем металл осаждается и перерабатывается осадок для того, чтобы выделить возможные оставшиеся соединения или черновой металл. Осаждение осуществляется несколькими способами на выбор: электролиз, цементация, сорбция, ионный обмен. Далее будет приведено несколько исследований посвященных гидрометаллургическому методу переработки красных шламов. Существует способ, при котором извлекается скандий в процессе кислотной обработки красного шлама. Его основным недостатком является то, что при извлечении Sc происходит сильное загрязнение кислотного раствора основными компонентами, которые содержатся в шламе ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $CaCO_3$  и др.), как следствие это низкая концентрация извлекаемого элемента и большой расход кислоты [9]. Так же существует способ, при котором выщелачивание производится серной кислотой с концентрацией 74-100 г/л при температуре 64 °С и выше, а ценные компоненты переводятся в раствор [10]. В качестве отрицательного фактора выступает то, что не происходит извлечения необходимой степени скандия из раствора (менее 50%). Так же побочным моментом является и то, что в ходе выполнения работы пульпа приобрела формат густой вязкой массы, что тоже осложняет процедуру извлечения Sc. Известен так же способ извлечения из отходов байеровского процесса кальция и редкоземельных металлов при помощи выщелачивания кислотой и последующей фильтрацией с разделением извлеченных компонентов [11]. В данном исследовании выщелачивающими реагентами выступали разные концентрации водного раствора муравьиной кислоты  $HCOOH$  и водного раствора уксусной кислоты  $CH_3COOH$ . Самым главным недостатком является невозможность контролировать уровень pH, из-за чего проверка щелочности приобретает характер сложной многокомпонентной системы, что значительно затрудняет весь процесс [12]. Использование гидроме-

таллургического метода позволяет извлекать редкоземельные металлы из красного шлама, но основным его недостатком является большой расход кислот и сложности при определении щелочности [13]. В рассмотренных исследованиях авторами работ выступает общая рекомендация – это применение вышеуказанного метода в комплексе с пирометаллургическими способами переработки красных шламов, что в свою очередь делает процесс более сложным и многоступенчатым.

К способам непосредственного использования красных шламов можно отнести, например его применение или в качестве катализатора, или в очистке от загрязняющих веществ, или как строительный материал [6]. На тему возможности переработки отхода глиноземного производства для получения катализатора турецкими учеными было проведено исследование [14]. В работе описывалось взаимодействие при смешении красного шлама с отработанными минеральным маслом и пластиковым отходом и промышленными катализаторами гидрокрекинга и гидроочистки. Результаты показали, что байровский отход обладает активностью по отношению к гидрогенизации или крекингу при гидроочистке отработанного минерального масла. Недостатками выступает увеличение выхода газов при выполнении данной процедуры, а так же увеличение выделения парафиновых соединений. Применение красного шлама, как продукта, позволяющего произвести очистку от загрязняющих веществ, было изучено австралийскими исследователями [15, 16]. Согласно результатам работы была выявлена возможность вышеуказанного применения отхода, как сравнительно недорогого адсорбента для удаления из воды токсичных тяжелых металлов, неорганических анионов, ионов металлоидов и органических веществ. Недостатком является то, что перед тем, как использовать красный шлам для очистки сточных вод его необходимо активировать, что требует дополнительных затрат. Еще одним направлением для работы с красным шламом является производство строительных материалов. Исследование заключалось в изучении возможности использования отхода в качестве наполнителя и последующие испытания образцов на физико-механические свойства. Результатом работы выступало производство цемента с содержанием в составе «красного» шлама и его испытания на свойства, а так же исследование микроструктур в затворенном состоянии. По окончании работы была выявлена возможность применения отхода в качестве добавки в сырую муку, так как ухудшения влияния на процесс спекания и процесс гидратации не было обнаружено, структурная ориентация имела преимущественно равномерный характер и была однородна, итоговое схватывание цемента после затворения и значение прочности на сжатие были аналогичны эталонным значениям портландцемента [17]. Недостатком этого исследования является добавление не большого количества «красного» шлама в цемент (около 1%), что не решает глобально проблему уменьшения количества отхода в шламохранилищах. Тем не менее, это направление является перспективным, так как результаты показали осуществимость использовать шламы в производстве бетона без ухудшения физико-механических показателей.

Для подтверждения непосредственного использования красного шлама были проведены исследования, результаты, которых показали возможность при-

менять его как наполнитель для композиционного материала. Например, наблюдается увеличение пластической прочности (рис. 3) и прочности на сжатие (рис. 4) с уменьшением влажности в отходе. Рост прочности можно объяснить тем, что происходит разрыв сплошности жидкой среды и образования капиллярных менисков, которые ведут к упрочнению высокоцентрированных дисперсных систем [21].

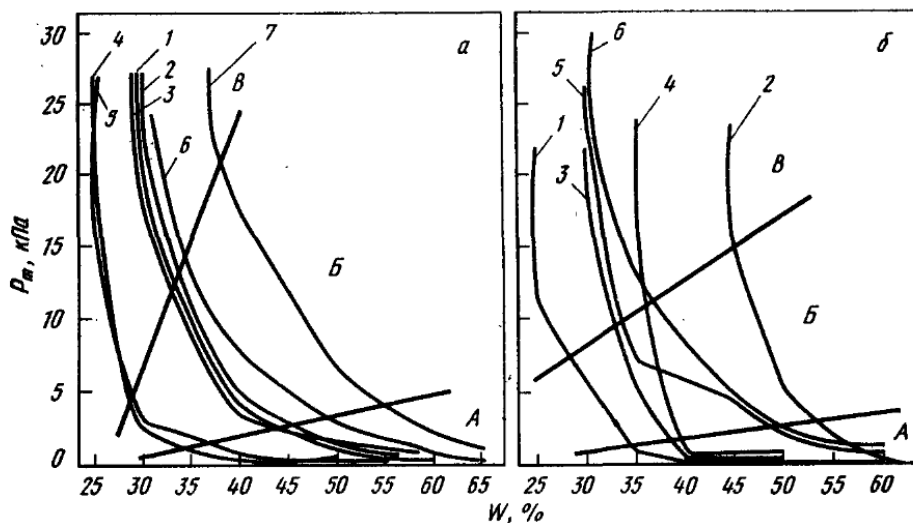


Рисунок 3 – Зависимость пластической прочности ( $P_m$ ) шламов от влажности ( $W$ ):  
 А – зона пульпообразного состояния шлама; Б – зона коагуляционных структур;  
 В – зона конденсированного состояния шлама;  
 а: 1, 2, 3, - байеровские шламы; 4 – отвальный свежий шлам у шламовыпуска; 5 – старый шлам у шламовыпуска; 6 – свежий шлам с уреза пруда;  
 б: 1 – свежий байеровский шлам; 2 тоже, спекательный; 3 – свежий шлам у шламовыпуска; 4 – старый шлам с бровки дамбы; 5 – свежий шлам с уреза пруда; 6 – шлам из прудовой зоны у колодца [2]

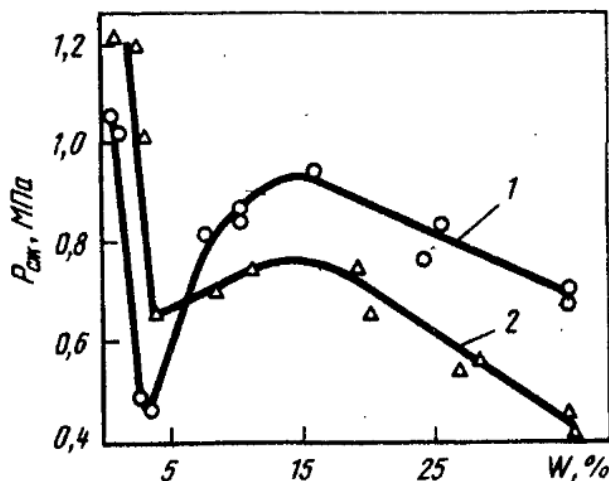


Рисунок 4 – Зависимость прочности ( $P_{ск}$ ) байеровских шламов от влажности ( $W$ ) [2]

Из данных графика можно наблюдать, что в диапазоне 35-36% прочность красного шлама имеет достаточно низкие значения прочности, но в диапазоне 10-15% влажности наблюдается значительное увеличение, что позволяет его использовать в последующем, как наполнитель.

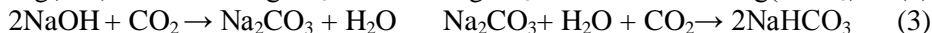
В качестве матрицы для композиционного материала, наполнителем которого является «красный» шлам предлагается использовать магнезиальное вяжущее. Его преимущество перед портландцементом это отсутствие усадки при твердении; высокая твердость, ударная прочность, износостойкость; беспыльность; хорошая полируемость; фунгидность, бактерицидность и биоцидность; радиационная стойкость [22]. Но самыми главными его сторонами являются это получение беспористой поверхности, высокой химической стойкости к агрессивным средам и низкая щелочность самого вяжущего, что является важным при работе с «красным шламом».

Материал, который будет получен в результате смешения магнезиального вяжущего и предварительно обработанного углекислым газом «красного» шлама предполагает следующие свойства:

1. Монолитность образца, результат достигнут за счет отсутствия пор в магнезиальном вяжущем;
2. Высокая механическая прочность, достигнутая за счет больших значений прочности и твердости магнезиального вяжущего;
3. Высокая влагостойкость и водонепроницаемость, достигается за счет беспористости материала;
4. Высокая химическая стойкость и термическая устойчивость, на которую влияет беспористость и прочность композита.
5. Малый коэффициент теплового расширения, достигается за счет прочности материала и высокой термической устойчивости;
6. Устранение вредного влияния «красного» шлама (высокая щелочность) тем, что он помещается в виде наполнителя в магнезиальное вяжущее с низким значением щелочности, что позволяет нейтрализовать его пагубное влияние. Так же, в дальнейшем, шлам не имеет возможности проникнуть за пределы образца в окружающую среду, так как полученный материал не имеет пор, а значит, становится более химически стойким;
7. Долговечность, достигается за счет беспористости, высокой механической стойкости, влагостойкости, водонепроницаемости, химической стойкости, термической устойчивости.

**Методика. Экспериментальные исследования.** Как было описано выше непосредственное использование красного шлама является перспективным направлением. В данной работе предлагается изготовление строительного материала или иными словами композита, в состав которого будет входить красный шлам. Так как основная проблема шламов это высокая щелочность, из-за которой ввод его в исходном состоянии в бетонную смесь приводит в дальнейшем к «разъеданию» отходом поверхности и проникновению наружу, то первым этапом в разработке экспериментального исследования будет выступать нейтрализация красного шлама. Нейтрализацию предлагается проводить в два шага. С помощью первого шага будет уменьшена щелочность шлама. С помощью второго шага бу-

дет произведено ускорение затвердевания шлама, так как отход находится в пастообразном состоянии. Получение нейтрального состояния красного шлама в промышленных масштабах предполагается получать при помощи ввода углекислого газа, так как он является кислотным оксидом и хорошо вступает в реакцию с щелочами, а в данном отходе элементом, отвечающим за его высокую щелочность, является натриевая каустическая щелочь (формула 1,2,3). В лабораторных условиях углекислый газ получался из реакции введения жидкого в красный шлам.



Следующий этап – смешение нейтрального шлама с магниезальным вяжущим и выдерживание в течение месяца (28 суток) согласно ГОСТу 18105-2018 [17]. Далее проводятся исследования на прочность и влагостойкость и формируются возможные области применения полученного композиционного материала.

**Апробация.** Для того чтобы подтвердить ранее выведенную методику был проведен эксперимент в лабораторных условиях. В качестве составляющего композиционного материала был использован красный шлам Богославского алюминиевого завода, предварительно измельченный до фракции 0,005-0,002 мм.

Шлам подвергался деактивации при помощи ввода жидкого стекла и этиленкарбоната, в рамках лабораторных исследований. Далее вводился отвердитель для ускорения проводимого эксперимента. Время визуального отверждения заняло несколько минут, но для получения окончательного твердого состояния, образцы выдерживались еще сутки при комнатной температуре в формах (рис. 5).

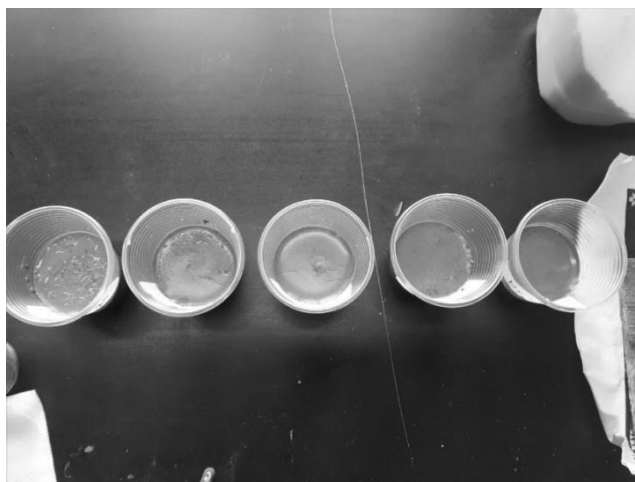


Рисунок 5 – Отвержденные образцы через несколько минут после ввода жидкого стекла и этиленкарбоната

Далее, через сутки, образцы помещались в печь, предварительно нагрее-

тую до 200 °С на несколько часов, для дополнительной сушки (рис. 6).



Рисунок 6 – Образцы после сушки в печи

Следующим шагом выступает измельчение нейтрализованного шлама с целью его дальнейшего введения и перемешивания с магниезальным вяжущим. Полученный сухой состав, состоящий из деактивированного красного шлама и магниезального вяжущего, затворяется бишофитом. Далее смесь разливается по формам и ставится в лабораторный шкаф на 28 суток для отверждения при комнатной температуре, согласно ГОСТу 18105-2018. Для выявления лучшего соотношения магниезального вяжущего и обработанного красного шлама были изготовлены разные концентрации смеси. По истечению установленного срока отверждения, образцы были извлечены из лабораторного шкафа, и был проведен их визуальный осмотр. Все образцы имели на поверхности образование белого налета, что свидетельствует о выделении избыточной воды из полученного материала (рис. 7).

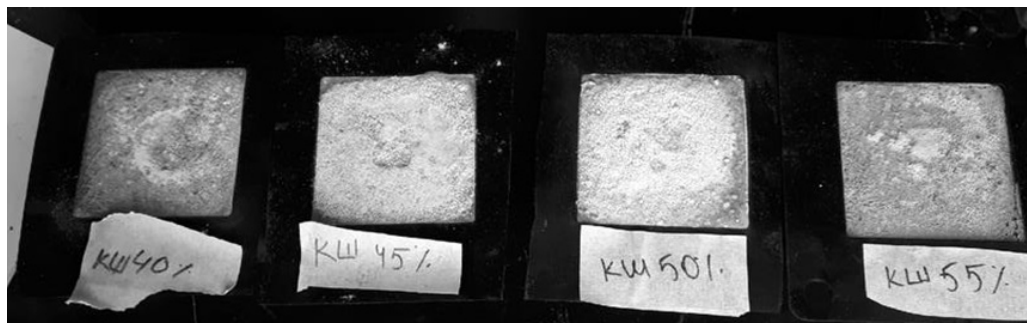


Рисунок 7 – Затвердевшие бетонные образцы с включением в состав красного шлама в разных пропорциях

На текущий момент данные образцы подвергаются испытанию на влагостойкость и прочность, поэтому ниже будут приведены результаты ранее проведенных исследований на предмет актуальности использования бетона, включающего в свой состав магнезиальное вяжущее и красный шлак (табл. 3 и 4).

**Таблица 3 – Результаты прочностных испытаний**

№	Состав испытанных образцов	Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа
1	Бетон на основе магнезиального цемента	45,0
2	Бетон на основе портландцемента	39,2
3	Бетон на основе магнезиального цемента с заполнителем из красного шлама	40,5
4	Портландцементный бетон с заполнителем из красного шлама	30,5

**Таблица 4 – Результаты испытаний на водопоглощение**

№	Состав испытанных образцов	Водопоглощение, %
1	Бетон на основе магнезиального цемента	20,6
2	Бетон на основе портландцемента	0,3
3	Бетон на основе магнезиального цемента с заполнителем из красного шлама	0,3
4	Бетон на основе портландцемента с заполнителем из красного шлама	7,5

Согласно результатам ранее выполненных исследований бетон, включающий в свой состав красный шлак, имеет хорошие прочностные значения, а так же обладает хорошей водостойкостью, что позволяет его использовать в качестве строительного материала для промышленного строительства.

**Возможные области применения.** Сегодня, горная промышленность добывает сырье в рамках его полной переработки. При этом в процессе извлечения полезных материалов, образуются отходы в виде шламов, которые техногенные заводы впоследствии отправляют в шламохранилище. Выше представленная технология, позволяющая получать строительный материал, с включенным красным шлаком в его состав, может найти свое применение в строительстве дорог для горных машин в качестве одного из её слоев. О возможности применения шлама в качестве компонента для строительства дорог описано зарубежными коллегами в статье, посвященной применению красного шлама в строительной промышленности, а так же в патентах приведены возможные рецепты приготовления бетонной смеси. Так же полученный композиционный материал возможно использовать в качестве кирпичей, блоков или плит для строительства промышленных зданий.

**Закключение.** Таким образом, проведенные теоретические исследования показали, что наиболее перспективным направлением использования красного шлама выступает его непосредственное применение, а именно в рамках данной

работы это создание композиционного материала. Подобранный технология нейтрализации отхода с помощью углекислого газа так же позволяет еще решить проблему с выбросами на предприятии помимо выполнения задачи по уменьшению его щелочности. А испытания на прочность и влагостойкость показали возможность использовать предварительно обработанный красный шлам в качестве наполнителя для композиционного материала и создавать прочные и влагостойкие материалы с удовлетворительными показателями. Исследования в этом направлении будут продолжаться с целью дальнейшего выявления оптимального состава композита, включающего в свой состав максимально возможное количество шлама без потери физико-механических свойств материала.

#### *Литература*

1. Трушко, В.Л., Утков В.А., Бажин В.Ю. Актуальность и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства // Записки Горного университета. Санкт-Петербург: 2017. Т. 227. С. 547-553.
2. Корнеев В.И., Сусс А.Г., Цеховой А.И. Красные шламы. Свойства, складирование, применение. М.: Metallurgia, 1991. 144 с.
3. Огородникова Е.Н., Николаева С.К. Красный шлам вопрос хранения и использования // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения: мат-лы науч. практич. конф. Москва, 2017. с. 284-288.
4. Kaussen F., Friedrich B. Reductive smelting of red mud for iron recovery // Chemie Ingenieur Technik. 2015. vol. 87. № 11. pp. 1535-1542.
5. Машенцева И.А., Власова О.С. Анализ негативного воздействия на окружающую среду предприятий по производству алюминия // Инженерный вестник Дона. Волгоград. 2017. № 1. С. 1-13.
6. Зиновьев Д.В., Грудинский П.И., Дюбанов В.Г., Коваленко Л.В., Леонтьев Л.И. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. Волгоград. 2018. Том 61. № 11. С. 843-858.
7. Матяш В.Г. Леонтьев Л.И., Кудинов Б.З. О восстановлении окислов железа в красных шламах // Труды Института металлургии. Свердловск. 1970. № 22. С. 46-49.
8. Пат. 2245371С2 Российская Федерация, МПК С 21 В 3/04, С 22 В 34/12, 59/00. Способ переработки красного шлама глиноземного производства / Коршунов Е.А., Буркин С.П., Логинов Ю.Н., Логинова И.В., Андрюкова Е.А., Третьяков В.С.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Фирма «ДАТА-ЦЕНТР». № 2003103262/02; заявл. 03.02.03; опубл. 21.01.05. 5 с.
9. Пат. 2147623С1 Российская Федерация, МПК С 22 В 59/00, 7/00, В 03 С 1/00. Способ извлечения редкоземельных металлов, скандия и иттрия из красных шламов глиноземного производства / Орлов С.Л., Энтелис И.Ю., Смирнов Б.Н.; заявитель и патентообладатель Орлов С.Л., Энтелис И.Ю., Смирнов Б.Н. № 99120766/02; заявл. 06.10.99; опубл. 20.04.00. 4 с.
10. Патент РФ 2140998 С1, МПК С22В7/00, С22В59/00. Способ переработки красного шлама / Линников О.Д., Яценко С.П., Сабирзянов Н.А. Заявитель и



- патентообладатель Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН. № 98122283/02; заявл. 07.12.1998; опубл. 10.11.1999. 5 с.
11. Патент РФ 2048556 С1, МПК С22В 21/00, С22В 26/20, С22В 59/00, С01F 7/00. Способ извлечения алюминия, кальция и редкоземельных металлов из красных шламов / Комаров П.В., Поляков М.С., Шильников А.Ю. Патентообладатель: Производственно-коммерческая фирма «ТНП-Индастри». №92010984/02; заявл. 01.12.1992; опубл. 20.11.1995. 7 с.
  12. Патент РФ 2544725 С1, МПК С22В 7/00, С22В 21/00, С22В 59/00, С01F 7/20, С22В 3/16. Способ кислотной переработки красных шламов / Богомазов А.В., Сенюта А.С. Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». №2013151918/02; заявл. 20.03.12; опубл. 20.03.15. 5 с.
  13. Патент РФ 2494965 С1, МПК С01F 7/06, С22F 7/14. Способ переработки бокситов на глинозем / Логинова И.В., Логинов Ю.Н., Кырчиков А.В. Патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». № 2012107941/02; заявл. 01.03.12; опубл. 01.03.13. 6 с.
  14. Cakici A.I., Yanik J., Karayildirim S.U.T., Anil H. Utilization of red mud as catalyst in conversion of waste oil and waste plastics to fuel // Journal of material cycles and waste management. 2004. Vol. 6. No. 1. P. 20-26.
  15. Liu Y., Naidu R., Ming H. Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases // Geoderma. 2011. Vol. 163. No. 1-2. P. 1-12.
  16. Rychkov V.N., Kirillov E.V., Kirillov S.V., Bunkov G.M., Titova S.M. Scandium Recovery from Red Mud by Carbonate Assist. KnE Materials Science. 2017. Vol. 2. No 2. Pp.
  17. Tsakiridis P.E., Agatzini-Leonardou S., Oustadakis P. Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker // Journal of Hazardous Materials. 2004. Vol. 116. No 1-2. P. 103-110.
  18. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2019. 20 с.
  19. BigPicture.ru: новости в фотографиях, 2009-2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bigpicture.ru/kрупnaya-texnogenная-katastrofa-v-vengrii/> (Дата обращения: 18.05.2021).
  20. Eric Marmor [Википедия]: IDF aid mission lands in Brazil, 2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IDF\\_aid\\_mission\\_lands\\_in\\_Brazil\\_%2832182656707%29.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IDF_aid_mission_lands_in_Brazil_%2832182656707%29.jpg) (Дата обращения: 18.05.2021).
  21. Урьев Н.Б. Высокосконцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 320 с.
  22. Вардан Г.А., Аверюшкин А.С., Калугин М.М., Карамян Г.Г., Мартоян Г.А. Современные подходы к решению проблем, связанных с утилизацией красного шлама. М.: Российская академия наук, 2017. 16 с.

УДК 661.665.1

### **Разработка способа силицирования высокоплотного графита марки МПГ**

**В.Д. Ерошенко**, кандидат технических наук,  
начальник технологического отдела,

ООО «ГрафитЭл-Московский электродный завод», г. Москва,

**А.Н. Овчинников**, ст. преподаватель кафедры «Технология машиностроения,  
технологические машины и оборудование»,

**А.Н. Васильев**, аспирант кафедры «Технология машиностроения, технологиче-  
ские машины и оборудование»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) имени М.И. Платова», ЮРГПУ (НПИ),  
г. Новочеркасск, Ростовская область

*Рассмотрен способ силицирования высокоплотного графита марки МПГ; показано, что процесс силицирования протекает на всю глубину заготовки и кремний равномерно распределяется по объему поры, при этом карбид кремния распределяется по поверхности, в то время как кремний остается в остальном объеме поры; исследованы физико-механические характеристики и фазовый состав графита после силицирования; показано, что такой силицированный графит возможно использовать в качестве нагревателей вакуумных печей, а также в химических источников тока.*

Силицированный графит, высокоплотный графит, графит марки МПГ, химический источник тока, нагреватели для вакуумных печей.

### **Development of a method for siliconizing high-density graphite of the MPG grade**

**V.D. Eroshenko**, Candidate of Technical Sciences,

Head of the Technological Department of LLC

«Graphite-Moscow Electrode Plant», Moscow,

**A.N. Ovchinnikov**, Art. Lecturer at the Department of Engineering Technology,  
Technological Machines and Equipment,

**A.N. Vasiliev**, graduate student of the department Engineering Technology, Techno-  
logical Machines and Equipment,

«Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)»,

SRSPU (NPI), Novocherkassk, Rostov Region

*A method of siliconizing high-density graphite of the MPG grade is considered; it is shown that the siliconizing process proceeds to the entire depth of the workpiece and silicon is evenly distributed over the pore volume, while silicon carbide*

*is distributed over the surface, while silicon remains in the rest of the pore volume; investigated the physical and mechanical characteristics and phase composition of graphite after siliconizing; it is shown that such siliconized graphite can be used as heaters for vacuum furnaces, as well as in chemical current sources.*

Siliconized graphite, high-density graphite, MPG graphite, chemical current source, heaters for vacuum furnaces.

### **Введение**

Одной из разновидностей искусственного графита является высокоплотный мелкозернистый графит марки МПГ. Графиты типа МПГ (МПГ-6,7,8) изготавливаются методом «холодного» прессования коксо-пековой композиции в матрицу. В качестве кокса в настоящее время используются смоляные изотропные (ТУ ЕЕ 10528765 TS 28:2011) и пековые коксы (ГОСТ 3213), в качестве пека используют среднетемпературные каменноугольные электродные марки «А» и «Б» (ГОСТ 10200) и высокотемпературный (ГОСТ 1038). В зависимости от сочетаний кокса с пеком и способов смешения материал делится по маркам МПГ-6, 7 или 8 [1, 2].

Графит МПГ – это высокопрочный термически стойкий материал с плотностью от 1,65 до 1,85 г/см<sup>3</sup>, общая пористость которого находится в пределах 10-15%; предел прочности на изгиб 35-50 МПа; предел прочности на сжатие 70-110 МПа; удельное электрическое сопротивление 14-18 мкОм·м (ТУ 48-20-51-84, ТУ 1915-051-54755093-2008). Теплопроводность (при 20 °С) всех марок МПГ графитированных при 2500 °С составляет 68-78 Вт/(м·К), а при 3000 °С составляет 103-110 Вт/(м·К), преобладают поры с радиусом от 2 до 8 мкм.

Данный вид графита применяется при электроэрозионной обработке металлов; изготовлении деталей полупроводниковой техники; при разливке цветных металлов и их сплавов в качестве катализатора; в качестве электродов и во многих других областях техники с применением высоких температур. Так же из МПГ-7 изготавливают детали для электронной и смежной с ней отраслей техники, тигли, пластины, диски, нагреватели вакуумных и высокочастотных печей, нагреватели, экраны и многое другое.

Наибольшее применение высокоплотные графиты нашли в качестве нагревательных элементах [3], а также в химических источниках тока, в качестве анода или противоэлектродов [4], в том числе для применения в композиционных порошковых материалах Рb-С с возможностью применения в сетках свинцово-кислотных аккумуляторах [5, 6] и других видах электротехники работающей в окислительной среде. Актуальным вопросом остается повышение стойкости графита к окислению, сопровождаемые химическими или электрохимическими процессами [7-11]. Поскольку процессы окисления в основном происходят по дефектам кристаллической решетки или концевым атомам, содержащим гетероатомы [12-14], то актуальным является разработка технологии позволяющей блокировать доступ окислителя в глубины пор. Для этого используются пропитки фурфуроловыми и фенольными смолами [15], солями фосфатов и фосфорной кислотой [16, 17], процессы пироуплотнения [8], а также силицирования, позволяющие покрывать поверхность поры карбидом кремния и заполнять сами поры свободным кремнием [18-20]. У последнего способа существует определенный

недостаток – в качестве основы используются низкоплотные марки графитов или графиты полученные способом перепрессовывания из мелкодисперсной фракции порошка [21]. В свою очередь, силицирование высокоплотных материалов классическими методами (дождеванием, окунанием) [18, 22] приводят к растрескиванию матрицы основы, а высожжение карбида кремния на поверхности и в порах из газовой фазы сильно осложнено аппаратурно и экономически дорого [23-24].

Поэтому в данной работе будет произведен поиск способа силицирования высокоплотного материала МПГ-7 и влияющих на него факторов, а также исследование свойств и структуры.

### **Методика проведения эксперимента**

Силицирование высокоплотного графита марки МПГ-7 проводилось в индукционной печи при температуре 1750 °С со скоростью нагрева от 400 °С /час до 600 °С /час. Силицирование проводилось при взаимодействии расплавленного кремния с графитом двумя способами: проливанием расплава кремния из тигля на поверхность графитовой заготовки (дождеванием); предварительное нанесение кремний содержащей массы на поверхность графитовой заготовки с последующим нагревом в индукционной печи.

Первый способ (дождевание) является традиционным способом, при котором из заготовок через прокладки собирается этажерка одной графитовой заготовки над другой, после чего на верхнюю заготовку устанавливается тигель с кремнием. При нагреве до 1420 °С кремний начинает плавиться и протекать через тигель на графитовые заготовки. При контакте кремния с графитом происходит образование карбида кремния, происходит насыщение зоны контакта (пересилицирование) и в дальнейшем в зависимости от реакционной способности графита к карбидообразованию [18, 25], пористости графита [26] и скорости истечения расплава из тигля кремний протекает через заготовку насквозь или обтекает по краям.

Второй способ требует перед загрузкой предварительной подготовки графитовых заготовок. Для этого куски кремния измельчают на щековой дробилке до фракции не более 5 мм, смешивают с органическим полимером, наносят на поверхность равномерным слоем по всей площади рабочей поверхности и полимеризуют. Количество кремния подбирается под каждую марку графита индивидуально. После высыхания заготовки закладываются в печь через прокладки и греются до заданной температуры.

После окончания процесса силицирования в обоих случаях заготовки вытаскиваются из печи, сбиваются прокладки и поверхность очищается от напылов или других прилипших частиц рашпилем по металлу. В качестве графитовых заготовок использовались кольца с внешним диаметром 150 мм, внутренним диаметром 110 мм, толщиной 22 мм и стержни размером 10x10x70 мм.

Удельное электрическое сопротивление определялось на стрелках методом падения напряжения на заданном участке по ГОСТ 23776-79. Использовался ток величиной 2 А; расстояние между щупами 50 мм.

Микроструктура резольной ФФС изучалась на оптическом металлографическом микроскопе Carl Zeiss Jena NEOPHOT 24 с увеличением в 125 раз.

Стойкость материала к окислению кислородом воздуха проверялась в сравнении с исходным графитом МПГ-7 по следующей методике: в нагреты до заданной температуры муфель (500, 600 и 700 °С) закладывались предварительно

взвешенные образцы исходного и силицированного графита марки МПГ-7; выдерживались образцы при температуре 10 часов, после чего охлаждались вместе с муфелем до температуры не выше 100 °С; после остывания образцы повторно взвешивались.

Кажущаяся плотность силицированных образцов определялась гидростатическим методом.

Массовая доля свободного кремния определялась водородным методом. Сущность метода заключается во взаимодействии свободного кремния с сорока процентным раствором гидроксида натрия с выделением водорода. Количество выделившегося водорода соответствует определенному содержанию свободного кремния.

Массовая доля карбида кремния определялась гравиметрическим методом по ГОСТ 26564.1-85. Сущность метода заключается на отжиге свободного углерода при температуре 800-850 °С, обработке остатка смесью концентрированных кислот (азотной, фтористоводородной и серной) для удаления свободного кремния и двуокиси кремния в виде летучих соединений фторида кремния, обработке остатка раствором соляной кислоты для удаления минеральных примесей и прокаливании остатка карбида кремния до постоянной массы. Массовая доля карбида кремния определялась по разности масс до и после прокаливания.

#### **Обсуждение результатов**

Проведение процессов силицирования методом «дождевания» показало, что главным влияющим фактором на получение качественных заготовок влияет плотность и структура материала. Поскольку графит марки МПГ является мелкозернистым, то протекание кремния осложнено возможным закупориванием транспортных каналов, а также созданием расклинивающих внутренних напряжений, которые приводят к растрескиванию заготовок. При этом наблюдается два вида растрескивания: до окончания полного проливания кремния через заготовку (что подтверждается залитой поверхностью торца слом) и после полного проливания (на изломе видны зерна графита и карбида кремния без наплывов кремния).

По результатам проведенных процессов было установлено, что по первому варианту растрескивание характерно для плотных мелкозернистых графитов с плотностью выше 1,75 г/см<sup>3</sup> с ярко выраженными наплывами кремния на изломе (рис. 1), в то время как мелкозернистые графиты с плотностью 1,6 г/см<sup>3</sup> и графиты с зернистостью 90-160 мкм больше разламываются по второму виду. Это явление можно объяснить механизмом протекания кремния по поверхности графита, реакцией взаимодействия кремния с графитом, процессом образования карбида кремния и усадочных явлений [25-27].

При использовании способа силицирования с предварительным нанесением кремния на поверхность с органическим связующим показал, что графит с высокой плотностью не подвергается растрескиванию, как описано ранее при втором варианте. Можно предположить, что органическое связующее при нагревании образует коксовый остаток, который при температуре плавления кремния [1415 °С. 18] первой подвергается силицированию и служит дополнительным буфером, концентрируя основную часть кремния на поверхности, позволяя до-

зировано протекать вглубь пор на всю глубину.

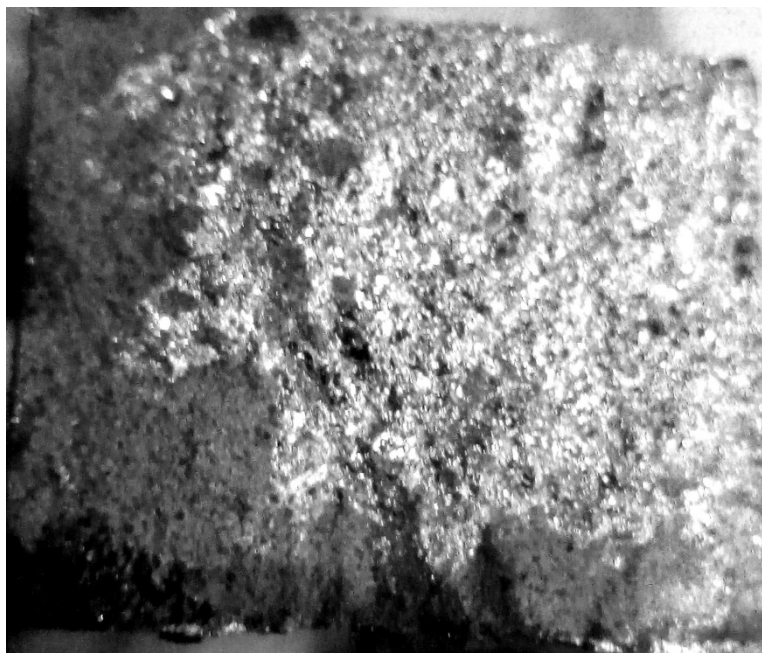


Рисунок 1 – Поверхность разлома при силицировании графита с плотностью выше 1,75 г/см<sup>3</sup>

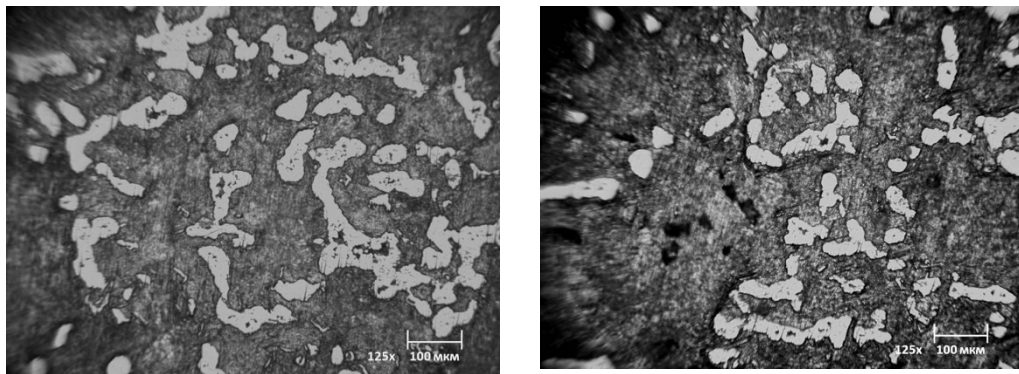
Физико-химический анализ графита до и после процесса силицирования показан в таблице 1. Из полученных данных видно, что высокоплотный графит прошел силицирование на всю доступную пористость, а свободный кремний говорит о том, что в материале были достаточно большие поры, которые по краям покрылись карбидом кремния, а в центре остались заполнены чистым кремнием. Из этого следует, что силицирование прошло только по поверхности пор, без глубокого процесса растворения графита в кремнии с последующей его кристаллизацией [28]. Поэтому удельное электрическое сопротивление материала почти не претерпело изменений (графитовый каркас остался целостным), только могло быть увеличено переходное сопротивление в месте контактов токоподводов.

Таблица 1 – Физико-химические характеристики высокоплотного графита до и после процесса силицирования

Графит	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание карбида кремния, %	Содержание свободного кремния, %	УЭС, мкОм·м
до	1,78	-	-	14
после	2,08	16,8	6,7	15

Данное предположение подтверждается исследованием микроструктуры на шлифе. На рисунке 2 показаны снимки поверхности силицированного высоко-

коплотного графита. Из полученных данных видно, что пористость графита полностью заполнена карбидом кремния и свободным кремнием. Из этого следует, что предлагаемый способ силицирования с использованием органического связующего позволяет обеспечить равномерное протекание кремния по материалу. Также из рисунков наглядно видно подтверждение предположения о силицировании только поверхности поры графита.



**Рисунок 2 – Микроструктура поверхности силицированного высокоплотного графита**

Процесс силицирования по поверхности поры также подтверждается проверкой на окислительную стойкость материала при нагреве. На рисунке 3 показаны результаты окисления силицированного и чистого графита при разных температурах. Следует отметить, что потеря массы силицированного высокоплотного графита в среднем на 20% меньше, чем чистого. Поскольку окисление графита кислородом воздуха происходит в первую очередь на дефектах структуры [12], в нашем случае в пористой структуре, то герметизация пор карбидом кремния позволяет снизить дефектность структуры и повысить стойкость. На рис.4 показаны внешний вид силицированного высокоплотного графита после окисления при 600 и 700 °С. Из фотографий видно, что силицированный высокоплотный графит, окисляемый при 700 °С, «выгорает» изнутри, при этом внешний слой остается без изменений. Это можно объяснить тем, что поверхность первичного соприкосновения графита с кремнием пересилицируется больше, чем в остальном объеме, а поскольку для исследования на стойкость к окислению использовались механически разломанные сегменты кольца, а не цельные изделия, то образуется доступная для кислорода дефектная структура графита, которая сгорает, после чего происходит выкрашивание карбидных частиц.

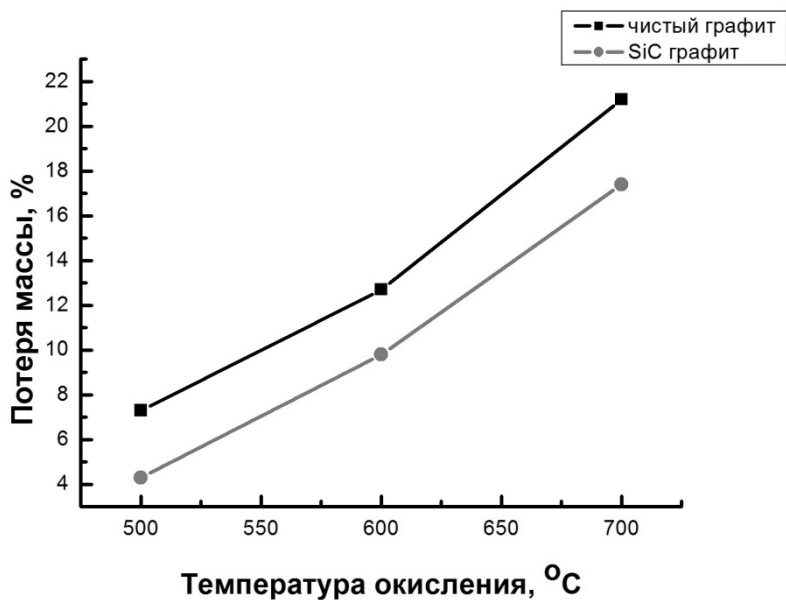
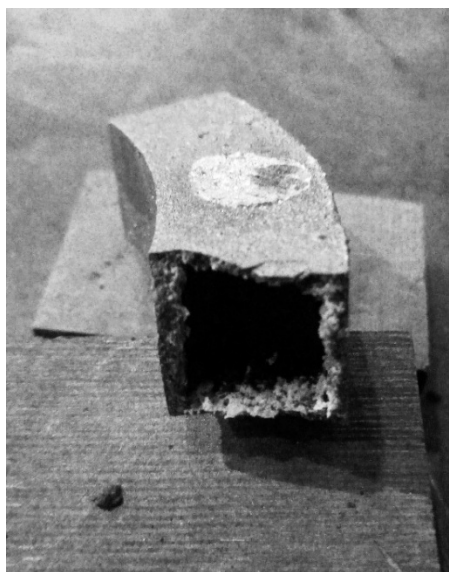
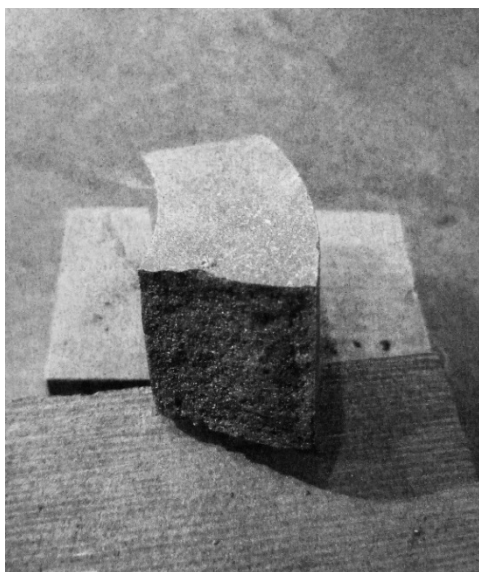


Рисунок 3 – Потеря массы чистого и силицированного графита при разных температурах окисления



*a*

*б*

Рисунок 4 – Потеря массы чистого и силицированного графита при температурах окисления *a*) 600 °C и *б*) 700 °C



**Вывод**

Предварительное нанесение кремния на поверхность графита при помощи органического связующего позволяет силицировать основу равномерно на всю глубину без механического разрушения. При этом пора графита покрывается карбидной пленкой, а внутри остается свободный кремний. При этом времени процесса силицирования недостаточно, чтобы графит смог диффундировать через карбидный слой к свободному кремнию и полностью прореагировать. Из этого следует, что увеличением времени выдержки при температуре 1450-1650 °С можно достичь полной карбидизации пористости и монолитности структуры.

Полученный результат имеет большой интерес в получении силицированного материала для графитовых нагревателей, которые обладают таким же удельным электрическим сопротивлением, как у исходного графита, но большей стойкостью за счет уменьшения поверхностной дефектности.

*Литература*

1. Графит марок МПГ-6 и МПГ-7 в заготовках и деталях. Технические условия. ТУ 48-20-51-84. М.: НИИграфит, 1984.
2. Самойлов В.М. Получение тонкодисперсных углеродных наполнителей и разработка технологии производства тонкозернистых графитов на их основе // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: 2006.
3. Мармер Э.Н. Материалы для высокотемпературных вакуумных установок. М., ФИЗМАТЛИТ, 2007. 152 с.
4. Huanhuan Hao, Kailun Chen, Hao Liu, Hao Wang, Jingbing Liu. A Review of the Positive Electrode Additives in Lead-Acid Batteries // International Journal of Electrochemical Science. 2018. № 13. P. 2329-2340.
5. Сергеенко С.Н., Васильев А.Н., Яценко А.Н., Мараховский М.А. Многокритериальная оптимизация получения горячекомпактированных композиционных материалов Pb-C на основе стружки утилизированных электродов аккумуляторных батарей // Цветные металлы. 2020. № 11. PP. 63-69.
6. Сергеенко С.Н., Васильев А.Н., Василенко Д.В. Многокритериальная оптимизация технологических параметров получения композиционного материала Pb-C и углеродного покрытия // Информационно-технологический вестник. 2020. № 3 (25). С. 166-174.
7. Wan Mohd Ashri Wan Daud, Amir Hossein Houshamnd. Textural characteristics, sursace chemistry and oxidation of activated carbon // Journal of Natural Gas Chemistry. 2010. № 19. P. 267-279.
8. Щурик А.Г. Искусственные углеродные материалы // Пермь. 2009. 342 с.
9. Giordano N., Antonucci P.L., Passalacqua E., Pino L., Arico A.S. and Kinoshita K. Relatijnship between Physicochemical properties and electrooxidation behavior of carbon materials // Electrochimica Acta. Vol. 36. No. 13. PP. 1931-1935.
10. Довгаль А.Н., Костиков А.А., Кузнецов А.А., Черномаз В.Н. Слоистые соединения графита // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. 6/5 (60). С. 32-39.
11. Тарасевич М.Р. Электрохимия углеродных материалов. М.: Наука, 1984. 253 с.

12. Васильев Ю.Н., Котосонов А.С., Емельянова В.М. Влияние дефектов структуры углерода на скорость окисления // Неорганические материалы. 1974. т. 10. № 11. С. 2082-2085.
13. Забудьков С.Л. Катодные и анодные процессы при электрохимическом окислении дисперсного графита в нитросодержащих электролитах // Диссертация на соискание ученой степени кандидат химических наук. Саратов: 2006.
14. Зеленский В.Ф., Одейчук Н.П., Петельгузов И.А., Рыжов В.П., Яковлев В.К. Исследование коррозионной стойкости графитов в среде кислорода // Вопросы атомной науки и техники. 2011. № 2. С. 116-122.
15. Кноп А., Шейб В. Фенольные смолы и материалы на их основе // пер. с англ. А.М. Василенко, Г.М. Восканянца // М.: Химия. 1983. 280 с.
16. Щеголев В.И. Электролитическое получение магния // М.: Изд. дом «Руда и Металлы». 2002. 366 с.
17. Pat. 102268697 CN. Graphite anode for magnesium electrolysis and preparation method thereof. Publ. 27.11.2013.
18. Тарабанов А.С., Костиков В.И. Силицированный графит // М.: «Металлургия». 1977. 208 с.
19. Бубненко И.А., Кошелев Ю.И., Сорокин О.Ю. и др. Исследование взаимодействия кремния с углеродными материалами // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. № 5. С. 12-18.
20. Сапронов Р.Л., Мех В.А., Румянцев В.И. Исследование процесса взаимодействия волокнистых и порошкообразных углеродных материалов с расплавом кремния // Физика и химия стекла. 2011. № 5. С. 770-788.
21. Породинский И.А. Высокоплотные карбидкремниевые материалы с регулируемым фазовым составом // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 2015.
22. Бубненко И.А., Кошелев Ю.И., Степанова Н.Н., Швецов А.А., Бардин Н.Г., Полушкин Н.И., Сорокин М.Н. К вопросу о механизме образования карбида кремния при жидкофазном силицировании углеродных материалов // Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедения, технология: сб. тезисов докладов, 10 международная конференция, Москва, г. Троицк. 2016. С. 94-96.
23. Абызов А.М., Смирнов Е.П. Кинетика химического осаждения карбида кремния из газовой фазы метилсилана // Неорганические материалы. 2000. Том 36, № 9. С. 1059-1066.
24. Лахин А.В., Богачев А.Е. Газофазное осаждение карбида кремния из метилсилана при относительно низких температурах и давлениях // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2006. № 1. С. 55-58.
25. Бубненко И.А., Кошелев Ю.И., Сорокин О.Ю., Орехов Т.В., Полушин Н.И., Н.Н. Степарева Исследование взаимодействие кремния с углеродными материалами // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2013. Том 56. № 5. С. 12-18.
26. Сорокин О.Ю., Бубненко И.А., Кошелев Ю.И., Орехов Т.В. Разработка мелкозернистого силицированного графита с улучшенными свойствами // Известия

- тия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2012. Том 55. № 5. С. 12-16.
27. Кошелев Ю.И., Бубненко И.А., Швецов А.А., Бардин Н.Г., Сорокин О.Ю., Орехов Т.В., Макаров Н.А. Влияние структурных характеристик углеродного материала на его взаимодействие с расплавом кремния в процессе силицирования // Успехи в химии и химической технологии. 2015. Том 29. № 7. С.44-46.
28. Шевцов А.А. Исследование взаимодействия углерода с расплавом кремния в процессе получения силицированного графита. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 2018.

УДК 674.815

**Модель оптимального управления формированием прочностных показателей насыпных структур**

**Б.Л. Спирин**, старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики,  
**С.В. Фролов**, кандидат физико-математических наук,  
заведующий кафедрой механики и инженерной графики,  
**В.В. Абразумов**, доктор технических наук,  
профессор кафедры механики и инженерной графики,  
Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение  
Высшего образования «Академия ГПС МЧС России», г. Москва

*В данной статье рассматривается метод построения модели прочностных свойств композиционного материала. Особое внимание уделено установлению функциональных зависимостей рассматриваемых в статье параметров, оказывающих существенное влияние на получение композита с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Показано как влияют различные характеристики композиционного материала на процесс получения изделия с требуемыми прочностными свойствами.*

Композиты, композиционные материалы, прессование, кондиционирование.

**Optimal control model for the formation of strength indicators of bulk structures**

**B.L. Spirin**, Senior Lecturer of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,  
**S.V. Frolov**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,  
**V.V. Abrazumov**, Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia», Moscow

*This article discusses a method for constructing a model of the strength properties of a composite material. Particular attention is paid to the establishment of functional dependencies of the parameters considered in the article, which have a significant impact on obtaining a composite with the required performance characteristics. It is shown how different characteristics of a composite material influence the process of obtaining a product with the required strength properties.*

Composites, composite materials, pressing, conditioning.

Основная особенность данного объекта управления заключается в том,

что исследуемые процессы протекают в структуре, имеющей пространственную протяженность, и характеризуются несколькими величинами, зависящими не только от времени, но и области физического пространства, которую занимает эта структура, т.е. объектом исследования является «система с распределенными в пространстве и времени параметрами», занимающая объём

$$D = \{0 \leq X_1 \leq a; 0 \leq X_2 \leq b; 0 \leq X_3 \leq c\} \quad (1)$$

где  $a, b, h$  – геометрические размеры плиты.

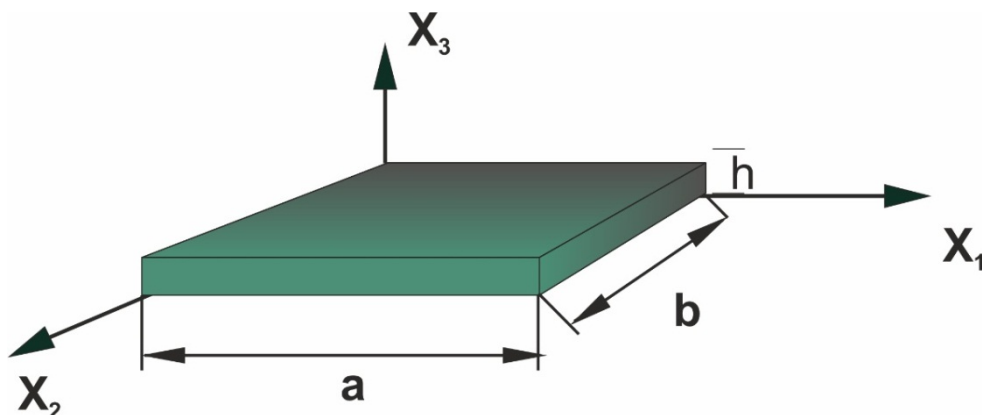


Рисунок 1 – Обозначение осей плиты композита

Для моделирования прочностных свойств плиты необходима следующая информация:

1) Совокупность переменных (вектор), описывающая состояние плиты на этапе прессования, и имеющая в своём составе:

- профиль (распределение) плотности плиты  $\rho(X_{ijk}, \tau)$ ;
- поля давления пара в порах композита;  $P(X_{ijk}, \tau)$
- поля температуры  $T(X_{ijk}, \tau)$ ;
- поля влагосодержания  $U(X_{ijk}, \tau)$  в плите;
- поля степени отверждения связующего  $\vartheta(X_{ijk}, \tau)$ .

Данную совокупность переменных (вектор состояния) обозначим как  $H_p = \{\rho, P, T, U, \vartheta, \tau\}$ .

2) Определим совокупность переменных, которые можно изменять в процессе прессования и которые влияют на динамику поведения системы, а, значит, и на свойства готового изделия, т.е. *компоненты вектора управления*.

а) **Управляющие функции:**

В качестве *первой управляющей переменной* (функции) можно принять внешнее давление прессования (диаграмму прессования), являющуюся функцией времени  $\sigma(\tau)$ .

Второй управляющей переменной (функцией) является температура плит пресса  $T_n(\tau)$ . Данными функциями можно существенно влиять на прочностные свойства готовых изделий.

б) **Управляющие параметры**, т.е. величины, которые влияют на ход процесса, подлежат оптимизации, но не являются функциями времени.

Управляющими параметрами являются:

- фракционный послойный состав наполнителя  $G$ ;
- начальная концентрация связующего  $C_{C_0}$ ;
- расход связующего, выражающий массу связующего, приходящуюся на единицу площади  $M_f$ .

в) **Постановочные параметры**, т.е. величины, значения которых не оптимизируются или не поддаются оптимизации, т.е. мы не можем непосредственно влиять на их значение, но которые участвуют в вычислениях:

- $C_c$  – удельная теплоёмкость плитного композита [ $Дж/(кг \cdot K)$ ];
- $\lambda$  – теплопроводность плитного композита [ $Вт/(кг \cdot K)$ ];
- $\beta$  – массообменный коэффициент влаги плитного композита участвующий непосредственно в процессе изготовления материала [ $м/сек$ ];
- $\alpha$  – вязкостной коэффициент сопротивления материала;
- $\mu$  – динамический коэффициент вязкости.

Таким образом, внешнее давление со стороны плит пресса  $\sigma_\tau$ , температура плит пресса  $T_n$ , фракционный состав  $G$  композиционного материала, начальная концентрация связующего материала  $C_{C_0}$ , массовый расход применяемого связующего вещества  $M_f$ , составляют вектор управления:

$$Y_p(\tau) = \{ \sigma_\tau(\tau), T_n(\tau), G, C_{C_0}, M_f \}.$$

Чтобы иметь возможность количественной и качественной, а также ценовой оценки физико-механических свойств готовых изделий дополним вектор переменных состояния следующими компонентами: модуль упругости при растяжении (сжатии)  $E_p$ , модуль упругости при изгибе  $E_u$ , предел прочности плиты на растяжение  $\sigma_p$ , предел прочности плитного композиционного материала на изгиб  $\sigma_u$ . С помощью этих переменных легко формализовать показатели эффективности, которые будут характеризовать прочностные свойства плитного композита, которые были заданы в процессе проектирования изделия.

Прочностные свойства плитных композитов, формируемые в процессе прессования, неравномерны по всем пространственным координатам, плитный композит имеет ярко выраженную анизотропность структуры и эта неравномерность в наибольшей степени проявляется в направлении, перпендикулярном плоскости прессования. Следовательно, в самом слабом месте плиты значения соответствующих показателей будут минимальны. Значит, среди всех технологий надо выбирать такую, при которой это самое слабое место будет наименее выражено. Следовательно, в качестве оптимального будет выбран тот технологический процесс, при котором соответствующий минимум показателя будет максимальным.

Данные модели дают возможность формировать послойную структуру композита и определять значение максимального усилия прессования, которое

является одним из основных параметров диаграммы прессования.

При построении модели будем исходить, в первую очередь, из того факта, что синтезируемый композиционный материал должен иметь заданную (заранее рассчитанную) плотность по толщине, например, как это показано на рисунке 2.

Опираясь на этот факт логично формулировать показатели эффективности моделирования, целевая направленность которых будет приводить к назначению в соответствующие внутренние слои пакета дисперсных частиц определенной плотности и размеров, в переменных, принимающих значения 0 либо 1 [11].

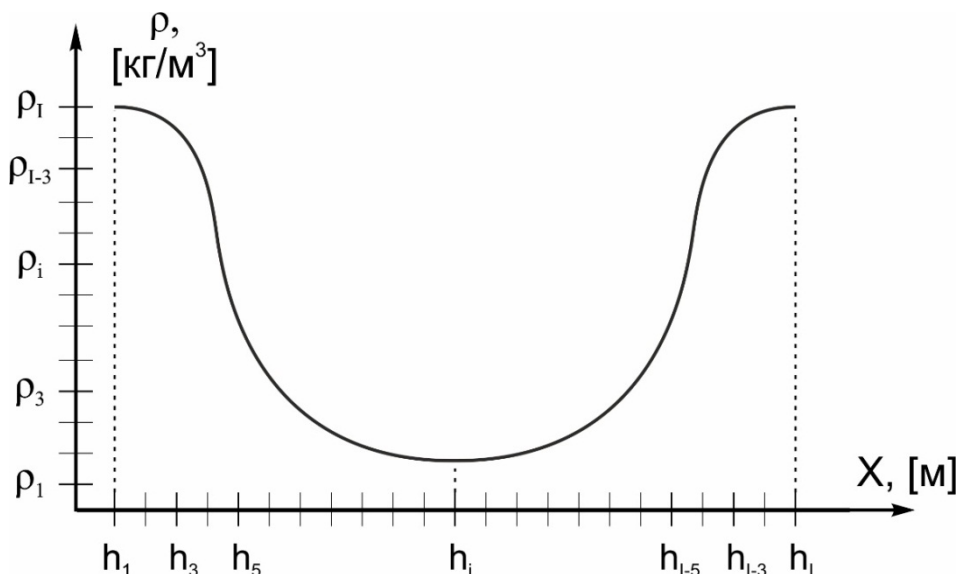


Рисунок 2 – Распределение плотности композита по высоте

В модели обязательно нужно учесть следующие величины

- фракционный состав частиц композита;
- распределение плотности композита по его высоте (рисунок 2);
- компрессионные параметры данной фракции (зависимость плотности от усилия, развиваемого прессом) (рисунок 3).

Данный порядок поиска оптимального значения показателя эффективности относится, в первую очередь, к показателю, характеризующему прочность плитного композиционного материала на изгиб:

$$\max_{s \in S} \min_{x \in D} \sigma_p(H_p, Y_p, X, \tau) \quad (2)$$

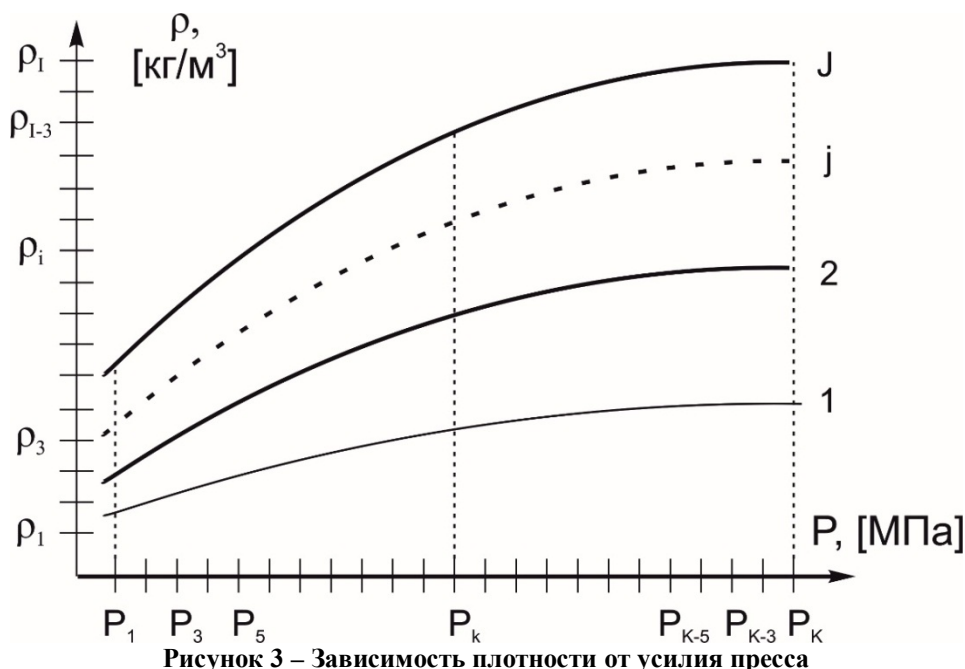


Рисунок 3 – Зависимость плотности от усилия пресса

Поиск оптимальной технологии изготовления среди всех возможных вариантов, когда в качестве показателя эффективности рассматривается прочность плиты на изгиб, следует проводить по критерию:

$$\max_{s \in S} \max_{x \in D} \sigma_u (H_p, Y_p, X, \tau) \quad (3)$$

где  $s$  – индекс варианта технологии;

$x$  – индекс координаты плиты;

$S$  – множество вариантов технологий;

$D = \{0 \leq X_1 \leq a; 0 \leq X_2 \leq b; 0 \leq X_3 \leq c\}$  – геометрические размеры плоского плитного композиционного материала;

$H_p = \{\rho, P, T, U, \vartheta, \tau\}$  – совокупность переменных состояния композита и окружающей среды, а также технологического оборудования;

$Y_p(\tau) = \{\sigma_\tau(\tau), T_n(\tau), G, C_{c_0}, M_f\}$  – совокупность переменных управления значения которых могут изменяться с течением времени по установленному закону, который задается исходя из возможностей производственного оборудования;

$X$  – произвольная точка области  $D$ ;

$\tau$  – время процесса.

Значения переменных состояния  $H_p = \{\rho, P, T, U, \vartheta, \tau\}$ , кроме плотностей плитных композиционных материалов, (последние формируются на основе экспериментальных данных исследования профилей плотности, а также зависимостей профиля плотности от требуемой прочности изделия, определяются при проведении расчетов по следующим дифференциальным моделям.

а) В силу того, что процесс прессования композитов идет при высоких



температурах, нелинейно распределенных по толщине композита, то самой существенной составляющей давления паровоздушной смеси будет паровая компонента, величина которой зависит от температуры плит пресса, а также от характеристик материала и, следовательно, закона изменения температурных полей по высоте композиционного материала

При оценке паровой составляющей давления следует исходить из определения величины давления насыщенного пара, являющегося наибольшим давлением, которое может иметь пар при данной температуре. Следовательно, для температур порядка 450 К максимальное давление внутри пакета может быть порядка 1.5 Мпа.

Соотношение, характеризующее состояние пара в единице объема, записывается следующим образом:

$$\rho = \frac{M \cdot P}{R \cdot T}, \quad (4)$$

где  $M$  – молярная масса пара (кг/Моль),

$R$  – газовая постоянная (дж/(кг·К)).

б) Поля температуры  $T$  и поля влагосодержания  $U$  в плите могут быть определены из решения следующих дифференциальных уравнений:

$$C(U, T) \cdot \rho_o(\sigma, T) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(U, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \Delta H \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + \Delta H_\phi \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (5)$$

$$\rho_o \frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\alpha \cdot \mu} \cdot \rho_o \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right). \quad (6)$$

где  $C(U, T)$  – удельная теплоемкость каркаса плитного композиционного материала;

$\rho_o(\sigma, T)$  – плотность каркаса пакета;

$\lambda(U, T)$  – теплопроводность плиты;

$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau}$  – кинетика реакции отверждения связующего;

$\frac{\partial U}{\partial \tau}$  – изменение влагосодержания плиты;

$\Delta H$  – тепловой эффект химической реакции отверждения;

$\Delta H_\phi$  – тепловой эффект фазового перехода;

$\alpha$  – вязкостной коэффициент сопротивления материала;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости.

Выражение

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(U, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right]$$

определяет нагрев насыпной структуры плитами пресса.

В данной оптимизационной модели выражениями  $\Delta H \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau}$  и  $\Delta H_\phi \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}$  можно пренебречь в силу их малости.

с) Завершенность процесса отверждения связующего можно найти, например, пользуясь дифференциальным уравнением кинетики отверждения

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \tau} = (\mathcal{G}_k - \mathcal{G})^\nu \cdot M_0^{\nu-1} \cdot K_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (7)$$

где  $M_0$  – начальная концентрация реагирующего вещества;

$\nu$  – показатель порядка реакции по реагенту;

$\mathcal{G}_k$  – конечная степень отверждения;

$E$  – энергия активации (Дж/моль).

Поскольку переменные состояния  $H_p = \{\rho, P, T, U, \mathcal{G}, \tau\}$  определяются в результате решения дифференциальных уравнений, то ограничения, накладываемые на эти переменные, задаются в форме начальных и граничных условий.

В реальных условиях прессования, особенно в момент касания плитами пресса насыпного пакета плитного композиционного материала и на начальном этапе их сближения, не может быть идеального контакта между греющей поверхностью и поверхностью пакета. Следовательно, на границе касания будет иметь место некоторое контактное тепловое сопротивление, что можно учесть следующими граничными условиями на внешних поверхностях пакета:

$$T(x, 0, \tau) = T_n(x, 0, \tau) - R_k(\tau) \cdot \lambda(U, T) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (8)$$

$$T(x, h, \tau) = T_n(x, h, \tau) - R_k(\tau) \cdot \lambda(U, T) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (9)$$

где  $R_k$  – контактное тепловое сопротивление;

$(x, 0), (x, h)$  – координаты внешних поверхностей пакета;

$T_n(x, 0), T_n(x, h)$  – температура плит пресса.

В качестве контактного теплового сопротивления можно принять коэффициент теплоотдачи на поверхности пакета.

В случае прессования на проницаемых поддонах граничные условия для парогазового давления на поверхностях соприкосновения плит пресса и пакета можно сформулировать в виде уравнений

$$-K_p \cdot \frac{\partial P(x, h, \tau)}{\partial x} + \beta_p (P_a - P(x, h, \tau)) = 0, \quad (10)$$

$$-K_p \cdot \frac{\partial P(x, 0, \tau)}{\partial x} + \beta_p (P_a - P(x, 0, \tau)) = 0, \quad (11)$$

$$K_p = \frac{K}{\eta}. \quad (12)$$

где  $P$  – коэффициент влагообмена, отнесенный к разности парциальных давлений;

$K_p$  – коэффициент молярного переноса пара;

$K$  – коэффициент проницаемости изделия;

$P_a$  – барометрическое давление.

$\eta$  – коэффициент вязкости.

Коэффициенты молярного переноса пара  $K_p$  определяется фильтрационными характеристиками проницаемых плит пресса.

Коэффициенты массообмена  $\beta_p$  являются функциями внешних условий (температуры внешней среды и равновесного влагосодержания), в которых ведется прессование.

Начальные условия относительно определяемых переменных (функций) вполне естественны и сводятся к заданию равномерного распределения по толщине плиты плоского композиционного материала температурного, влажностного полей, парогазового давления, начальной пористости плиты:

$$P(x, \tau)|_{\tau=0} = P_a, \quad (13)$$

$$T(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0, \quad (14)$$

$$U(x, \tau)|_{\tau=0} = U_0, \quad (15)$$

$$P(x, \tau)|_{\tau=0} = P_0(x, 0). \quad (16)$$

В реальных процессах прессования возможности управления всегда ограничены, т.е. значения переменных управления  $Yp(\tau) = \{\sigma_\tau(\tau), T_n(\tau), G, C_{c_0}, M_f\}$  принадлежат некоторому заранее заданному диапазону значений этих величин, который определяется возможностями оборудования и характеристиками используемых материалов.

Смысл ограничений, накладываемых на переменные управления  $Yp(\tau) = \{\sigma_\tau(\tau), T_n(\tau), G, C_{c_0}, M_f\}$  вытекает из физических свойств этих переменных. Это, в частности, относится к давлению  $\sigma_\tau(\tau)$ , оказываемому на пакет композита со стороны плит пресса, к температуре плит пресса  $T_n(\tau)$  на этапе горячего прессования:

$$0 \leq \sigma_\tau(\tau) \leq \sigma_{\tau \max}, \quad (17)$$

$$0 \leq T_n(\tau) \leq T_{\max} \quad (18)$$

$$C_{\min} \leq C_{c_0} \leq 1 \quad (19)$$

$$M_{f \min} \leq M_f \leq 1 \quad (20)$$

где  $T_{\max}$ ,  $\sigma_{\tau \max}$  определяются возможностями оборудования прессования.

Естественным является установление диапазона изменения значений для начальной концентрации связующего  $C_{c_0}$  и для расхода связующего  $M_f$ . В силу относительной размерности этих величин их максимальные значения не могут превышать 1.

Представим модель (1)-(20) в развернутом виде согласно [1]. Прочность плиты на растяжение в критерии (1) может быть представлена следующем выра-

жением:

$$\sigma_P = (f_1 + f_2) \cdot (f_3 + f_4 + f_5) \quad (21)$$

Где

$$\begin{aligned} f_1 &= (\alpha_{11} \cdot \sigma_{\tau_{омв}}^2 + \alpha_{12} \cdot \sigma_{\tau_{омв}} + \alpha_{13}) \cdot M_F^2; \\ f_2 &= (\alpha_{21} \cdot \sigma_{\tau_{омв}}^2 + \alpha_{22} \cdot \sigma_{\tau_{омв}} + \alpha_{23}) \cdot M_F; \\ f_3 &= (\beta_{11} \cdot \exp(\beta_{12} \cdot \ln(\rho)) + \beta_{13}) \cdot G^2; \\ f_4 &= (\beta_{21} \cdot \exp(\beta_{22} \cdot \ln(\rho)) + \beta_{23}) \cdot G; \\ f_5 &= (\beta_{31} \cdot \exp(\beta_{32} \cdot \ln(\rho)) + \beta_{33}). \end{aligned}$$

Здесь  $\alpha_{ij}$ , а также  $\beta_{ij}$  – экспериментальные коэффициенты;

$G$  – фракционный послынный состав наполнителя композиционного материала;

$M_f$  – расход связующего;

$\sigma_{\tau_{омв}}$  – давление со стороны плит пресса при отверждении;

$\rho$  – плотность плиты.

Прочность плиты на изгиб в критерии (2) может быть представлена следующим выражением:

$$\sigma_u = (\varphi_1 + \varphi_2) \cdot (\varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5) \cdot \varphi_6, \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= (\gamma_{11} \cdot \sigma_{\tau_{омв}}^2 - \gamma_{12} \cdot \sigma_{\tau_{омв}} - \gamma_{13}) \cdot M_F^2; \\ \varphi_2 &= (\gamma_{21} \cdot \sigma_{\tau_{омв}}^2 + \gamma_{22} \cdot \sigma_{\tau_{омв}} + \gamma_{23}) \cdot M_F; \\ \varphi_3 &= (\lambda_{11} \cdot \rho^2 + \lambda_{12} \cdot \rho + \lambda_{13}) \cdot G^2; \\ \varphi_4 &= (\lambda_{21} \cdot \rho^2 + \lambda_{22} \cdot \rho + \lambda_{23}) \cdot G; \\ \varphi_5 &= (\lambda_{31} \cdot \rho^2 + \lambda_{32} \cdot \rho + \lambda_{33}); \\ \varphi_6 &= (\lambda_{41} \cdot G^2 + \lambda_{42} \cdot G + \lambda_{43}). \end{aligned}$$

Здесь  $\gamma_{ij}$ , а также  $\lambda_{ij}$  – экспериментальные коэффициенты,  $\varphi_6$  – поправочная функция.

Таким образом, данная модель может использоваться для выбора наиболее оптимального режима процесса изготовления композитного материала, когда задается требуемое значение его прочности (например, на растяжение – сжатие, изгиб) и выбираются соответствующие параметры работы оборудования так, чтобы минимизировать стоимость получения данного материала. Также возможен выбор процесса, при котором будут минимизированы факторы, негативно влияющие на окружающую среду.

*Литература*

1. Григорьев Б.А., Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: Учеб. пособие 2-е изд. // М: МЭИ. 2005.
2. Лыков А.В. Теория сушки // М.: Энергия. 1968. 471 с.
3. Котляр Я.М., Совершенный В.Д., Стриженов Д.С. Методы и задачи тепломассообмена // М.: Машиностроение. 1987. 320 с.
4. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы // М.: Мир. 1973. 302 с.
5. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория переноса энергии и вещества. Минск. АН БССР, 1959. 330 с.
6. Ягов В.В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. Учебное пособие // М. МЭИ. 2014. 544 с.
7. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса Учебное пособие // Томск: СТТ, 2016. 92 с.
8. Сергиенко И.В., Лебедева Т.Г., Рощин В.А. Приближенные методы решения дискретных задач оптимизации. Киев: Наукова Думка, 1980. 275 с.
9. Сивухин Д.В. Общий курс физики: термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит, 2006. 345 с
10. Александров А.В. и др. Сопротивление материалов: Учебник для ст-тов вузов/ А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин; под ред. А.В. Александрова. – 2-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2009. 559 с.
11. Степин П.А Сопротивление материалов: Учебник / СПб.: Лань, 2012. 320 с.

УДК 669.017.3

**Обоснование признаков превращения в железе  
и углеродистых сталях при ~ 450 °С**

**К.Ю. Шахназаров**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедения и технологии художественных изделий»,

**А.В. Михайлов**, аспирант кафедры «Материаловедения и технологии художественных изделий»

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург,

**Д.В. Цуканов**, инженер 1-й категории НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург

*Вокруг интервала температур 400-500 °С сложилась любопытная ситуация. М.В. Белоус с соавторами в своей монографии «Превращение при отпуске стали» его просто не замечают в классификации четырех превращений при отпуске, хотя еще в 1925 г. П. Обергоффер, основываясь на минимуме при 400-500 °С термоЭДС пары железо-платина, писал: «Имеем ли мы здесь дело с дальнейшим превращением в чистом железе, должны показать новые подробные исследования».*

*В настоящей работе на основании анализа многочисленных литературных данных, а также собственных экспериментальных (металлографического исследования, рентгеноструктурного анализа, сопротивления «горячей» осадке на образцах из практически чистого железа (0,008% С)) сделана попытка обосновать превращение в железе при ~ 450 °С.*

*Признание превращения при данной температуре дает возможность прогнозирования аномалий свойств сталей (производного железа) на том или ином этапе термической обработки.*

Железо, сталь, чугун, ударная вязкость, относительное удлинение, относительное сужение, предел прочности, предел текучести.

**Transition in iron and carbon steels at ~ 450 °С**

**K.Yu. Shakhnazarov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science,

**A.V. Mikhailov**, post-graduate student of the Department of Materials Science, St. Petersburg Mining University, St. Petersburg,

**D.V. Tsukanov**, 1-st category engineer, Research Center «Kurchatov Institute» – CRISM «Prometey», St. Petersburg

*There is a curious situation around the temperature interval of 400-500 °С. M.V. Belous and co-authors in their monograph «Transformation during tempering of*

steel» simply do not notice it in the classification of the four transformations during tempering, although back in 1925. P. Oberhoffer, based on a minimum at 400-500 °C of the thermo-EDC of iron-platinum pair, wrote: «Whether we are dealing here with further transformations in pure iron, should show new detailed research».

In the present work based on the analysis of numerous literature data and our own experimental data (metallographic research, X-ray analysis, resistance of «hot» precipitation on practically pure iron samples (0.008% C)) we have made an attempt to prove the iron transformation at ~ 450 °C.

The recognition of transformation at this temperature makes it possible to predict anomalies of steel properties (iron derivatives) at a certain stage of heat treatment.

Iron, steel, cast iron, impact toughness, relative elongation, relative contraction.

Тепловой эффект, абсолютный максимум твердости, минимум термоЭДС, статическая и динамическая хрупкость, растворение в феррите не менее 5 ат. % С и другие аномалии свойств как следствие превращения в железе при ~ 450 °C.

Интерес к происходящему в железе при ~ 450 °C вызван максимумами  $\delta$  и  $\psi$  при росте  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  продуктов изотермического превращения аустенита [21], хрупкостью продуктов отпуска закаленной и наклепанной стали, полным растворением карбида железа при отпуске [10], хрупкостью после субкритической закалки от 680 °C [10].

Интересна реакция на происходящее в железе при 450 °C: Б.Г. Лившиц в учебнике 1980 г. [14] опустил кривую термоЭДС – t с отчетливыми эффектами при ~ 450 °C,  $A_2$  и  $A_3$  (рис. 1, кр. 15; на рис. 1 качественно однотипные кривые изображены одной кривой). Е.М. Савицкий [18] скрыл минимум  $\delta$  (рис. 1, кр. 4) при снижении  $\sigma_B$  (рис. 1, кр. 5) при 400 °C, проведя кривую мимо экспериментальной точки. Диаграмма Fe – С Робертса-Аустена фундаментальна, но тепловые эффекты при ~ 420 и ~ 470 °C (на разных сортах железа) забыты. Б.М. Могутнов и др. [25] показывают отчетливые максимум и минимум теплоемкости вблизи ~ 450 °C (рис. 1, кр. 10), но без единой ссылки объявляют их ошибкой эксперимента, проводя кривую теплоемкости мимо экспериментальных точек. Карл Бенедикс поддержал идею Феликса Робина о превращении в железе «между 400 – 450 °C», но это забыто. Забыто также суждение П. Обергоффера: «Имеем ли мы здесь (при ~ 450 °C) дело с дальнейшими превращениями в чистом железе, должны показать дальнейшие исследования» [18].

Признаком превращения по Г. Тамману и Э. Гудремону являются экстремумы или изгибы на кривых свойств. Приведем их при ~ 450 °C на температурных зависимостях.

1, 2. Железо имеет минимум ударной вязкости (независимо от содержания примесей) (рис. 1, кр. 18) [23] и относительного удлинения (рис. 1, кр. 4) [18], что исключает версию о синеломкости [24]; минимум вязкости и при  $A_3$ .

3. У Fe абсолютный максимум твердости при 440 °C (рис. 1, кр. 1), а у  $\beta$ -

марганца – при полиморфном превращении [26]. Почему-то свой вывод о возможности детектирования превращений по температурным зависимостям твердости М.Г. Лозинский не распространил на Fe, хотя для марганца это очевидно.

4. Предел текучести очень чистого железа при 400 °С выше, чем при 200 °С (рис. 1, кр. 17) [4], хотя металлам свойственно разупрочняться при нагреве.

5. Пары Fe – Ni и Fe – Pt имеют изгиб и минимум термоЭДС при 360 °С (точка Кюри никеля) и ~ 450 °С (рис. 1, кр. 15) соответственно. Тогда, при ~ 450 °С в Fe тоже должно быть магнитное превращение, поскольку, согласно Б.Г. Лившицу [5], никель «навязывает» изгиб кривой термоЭДС паре Fe – Ni в точке Кюри никеля.

6. Изгибы при ~ 450 °С кривых термоЭДС – t пары Fe – Pt безгистерезисны (рис. 1, кр. 14) (данные Берлинера из учебника Н.Т. Гудцова) [12]. Безгистерезисность изгибов при нагреве и охлаждении является признаком магнитного превращения.

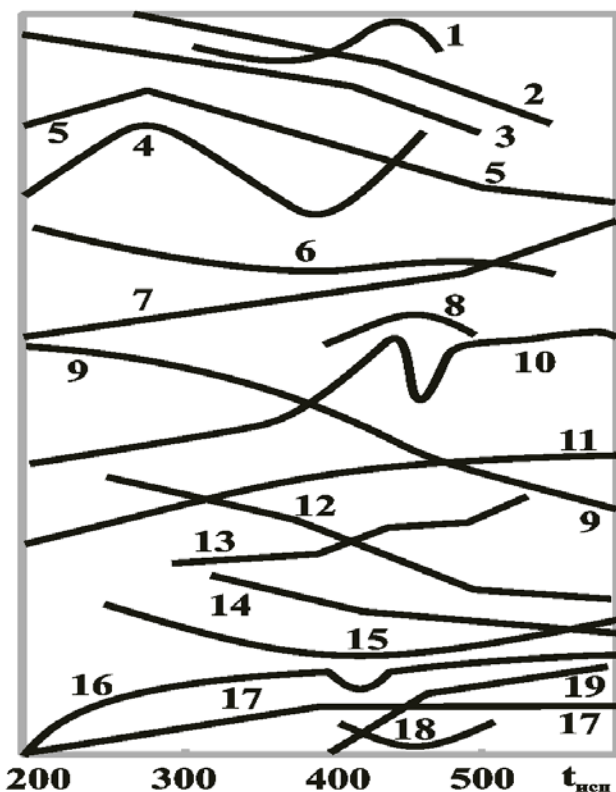


Рисунок 1 – Температурная зависимость свойств железа (см. пояснения в тексте)

7. Изгиб кривой электросопротивления при ~450 °С (рис. 1, кр. 7) [11] очевиден, если кривую проводить по усредненным значениям семи исследований.

8. Коэффициент линейного расширения (Э. Гудремон, данные Дорси) [11]



имеет максимальные значения при  $\sim 450$  °С (рис. 1, кр. 8), а вблизи точки Кюри – минимальные с максимумом при  $A_3$ . Таким образом, объемные изменения – важнейший признак любого превращения – качественно одинаково влияют на  $A_3$ ,  $A_2$  и  $\sim 450$  °С.

9. Выше  $\sim 450$  °С дилатограмма становится выпуклой (рис. 1, кр. 6) [14].

10. Выше 400 °С на кривых растяжения исчезает зубчатость [24].

11. На температурной зависимости числа Лоренца при 420 °С явный минимум (рис. 1, кр. 16) [2], который скрыт проведением кривой мимо экспериментальной точки.

12. Теплопроводность имеет малый, но заметный изгиб при  $\sim 450$  °С (рис. 1, кр. 9) [25]. (Отметим: это свойство остро реагирует на точку Кюри никеля).

13. У максимальной магнитной проницаемости замедляется рост выше  $\sim 450$  °С (рис. 9, кр. 11), а коэрцитивная сила ускоренно снижается в интервале 400 – 500 °С (рис. 1, кр. 12) [8].

14. Растворимость углерода в феррите резко возрастает при  $\sim 400$  °С (рис. 1, кр. 13) [25], что не соответствует привычному плавному ходу кривой PQ диаграммы Fe – C.

15. Растворимость водорода в Fe резко возрастает выше  $\sim 470$  °С, повышаясь скачком при  $A_3$  (рис. 1, кр. 19) [25].

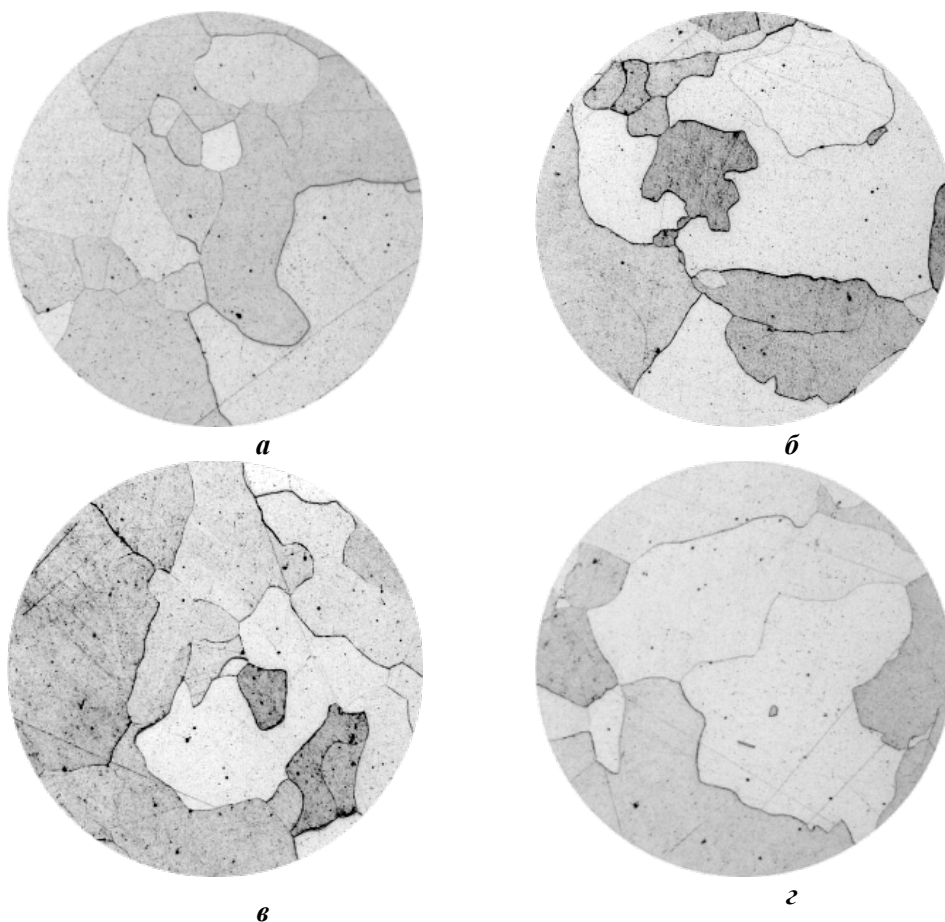
16. При  $\sim 470$  °С очень резко меняется ход кривых  $I_g - t$  шести сталей с 0,32 – 0,4 % C (рис. 1, кр. 2) [24]. Поскольку характер зависимости у всех сталей одинаков, то можно предположить, что это обусловлено матрицей – ферритом (железом).

17, 18. При 400 или 430 °С резко ускоряется падение твердости «железа зонной плавки» [25] (рис. 1, кр. 3), (рис. 1, кр. 2) [9].

19. При сверхвысоких скоростях охлаждения наблюдается 4 ступени  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. «Температура 4-й ступени (420 °С) слабо зависит от степени и чистоты железа» [25].

20. «При отпуске мартенситной структуры состояние максимальной растворимости в кислотах (и максимальной травимости) достигается примерно при 400 °С; такую структуру иногда раньше называли осмондитом» [11]. Повышенную травимость связывают с «критической степенью дисперсности карбидов» [11], вызванную «максимальным количеством работающих гальванических микропар» [22].

21. Проведение металлографического исследования после закалки от 1050 °С в воду и отпуска от 360 до 500 °С (2 ч) через каждые 20 ° (рис. 2) шлифов железа (0,008% C) показало, что в интервале температур 400 – 440 °С (рис. 2 б, в) наблюдается повышенная травимость (выдержка для всех образцов в 4%  $HNO_3$  в спирте составляла 20 сек).



**Рисунок 2 – Микроструктура чистого железа (0,008% С) после закалки от 1050 °С (вода) и отпуска при 360 (а), 420 (б), 440 (в), 460 С (г), х 200**

«Карбидной версией» дать объяснение различной травимости в образцах, содержащих 0,008% С, вряд ли уместно. Остается только Fe. Сделаем предположение, что максимальная травимость («структура осмондита») в интервале температур 400-440 °С может быть связана с изменениями во взаимодействии между атомами железа, т.е. с превращением в нем.

22. Проведено рентгеновское исследование (по двум сериям эксперимента) характеристик тонкой структуры (параметр решетки, ширина линий (110) и (220)) железа (0,008% С), подвергнутого отпуску от 350 до 600 °С через каждые 40 °С после закалки от 1050 °С в воду (рис. 3).

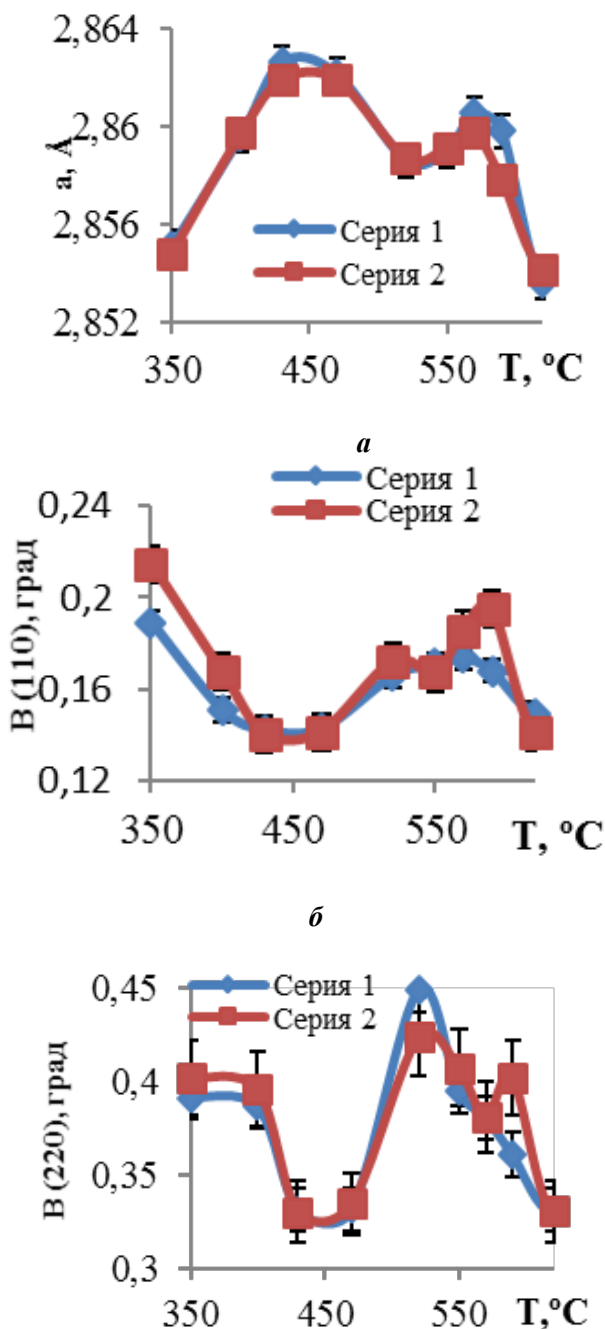


Рисунок 3 – Зависимость усредненного по двум замерам параметра решетки (а), уширения дифракционных максимумов линии 110(B<sub>110</sub>) (б), 220(B<sub>220</sub>) (в), от температуры отпуска (1 ч) чистого железа (0,008 % С). Серия эксперимента 1 и 2

При  $\sim 450^\circ\text{C}$  наблюдается максимум параметра решетки (рис. 3 а) и минимумы (рис. 3 б, в) на кривых уширения дифракционных максимумов линий В(110) и В(220). Экстремумы свидетельствуют о значительных изменениях в тонкой структуре железа при  $\sim 450^\circ\text{C}$ .

Отсутствие корреляции между твердостью и шириной линии следует из обработки данных Г.В. Курдюмова и Н. Ослона [13]: при отпуске  $\sim 430^\circ\text{C}$  отчетливый изгиб кривой В – HRC у закаленных сталей с  $\sim 0,1$ ,  $\sim 0,4$  и  $\sim 1,0\%$  С [25]. Отсутствие корреляции между В и НВ после отжига холодотянутой железной проволоки ниже  $380^\circ\text{C}$  отмечается в [24]. То же – для продуктов изотермического превращения аустенита сталей У10 и У15 при  $420^\circ\text{C}$  [21].

Изгиб кривых – нарушение корреляции между В и твердостью – свидетельствует о существенном изменении в тонком строении железа и сталей не только после отжига после наклепа, изотермического превращения аустенита, но и отпуска после закалки. Полагаем, такое может быть при превращении в железе вблизи  $400\text{--}450^\circ\text{C}$ . Отметим, что такая корреляция есть у никеля, латуни и меди по Я.С. Уманскому и др. [25].

Аномалии свойств сталей и чугунов после отпуска при  $\sim 450^\circ\text{C}$  наклепанных, закаленных из аустенитной области и от субкритической температуры, а также продуктов изотермического при  $\sim 450^\circ\text{C}$  превращения аустенита.

В работе М.В. Белоуса и др. «Превращения при отпуске сталей» [6] рассматривается 4 превращения мартенсита при отпуске, но интервалу  $400\text{--}500^\circ\text{C}$  не нашлось места. То ли все ясно, то ли ничего.

В работе, представленной Г.В. Курдюмовым, К.Ф. Стародубов [19] показал для углеродистой эвтектоидной стали эффект типа дисперсионного твердения – максимумы  $\sigma_{\text{В}}$  (и  $\sigma_{0,2}$ ) (рис. 4, кр. 1; на рисунке 13 качественно однотипные кривые изображены одной кривой), минимумы  $\delta$  (и  $\psi$ ) (рис. 4, кр. 2) после закалки и отпуска при  $450^\circ\text{C}$ . Этот результат выявлен, на наш взгляд, поскольку отпуск проводился через каждые  $25^\circ$ . Если исследования вести через  $100^\circ\text{C}$ , то будут плавные зависимости, как в учебниках. Никакого отношения хрупкость сталей с  $0,16\text{--}0,50\%$  С после отпуска при  $\sim 450^\circ\text{C}$  к структуре – мартенситу – не имеет, т. к. наблюдается после субкритической закалки от  $680^\circ\text{C}$ ; после режима  $920 \rightarrow 20 \rightarrow 640 \rightarrow \text{вода} \rightarrow 550^\circ\text{C} \rightarrow \text{вода}$  [10].

К.Ф. Стародубов [20] отказался от «карбидной» версии отпускной хрупкости при  $\sim 450^\circ\text{C}$ , поскольку дробление блоков при  $450^\circ\text{C}$  [17] имеет место как у закаленной, так и наклепанной стали. То же – для максимумов коэрцитивной силы (рис. 4, кр. 1). Более того, он отметил, что аномальные изменения свойств после отпуска при  $450^\circ\text{C}$ , наблюдающиеся у закаленной или наклепанной стали, аналогичны у наклепанного железа. Таким образом, К.Ф. Стародубов [20] доказал превращение в нем, но не написал об этом, по-видимому, «абсолютная величина этих аномальных изменений невелика», но аномалии он не отрицает – углерод лишь усиливает их.

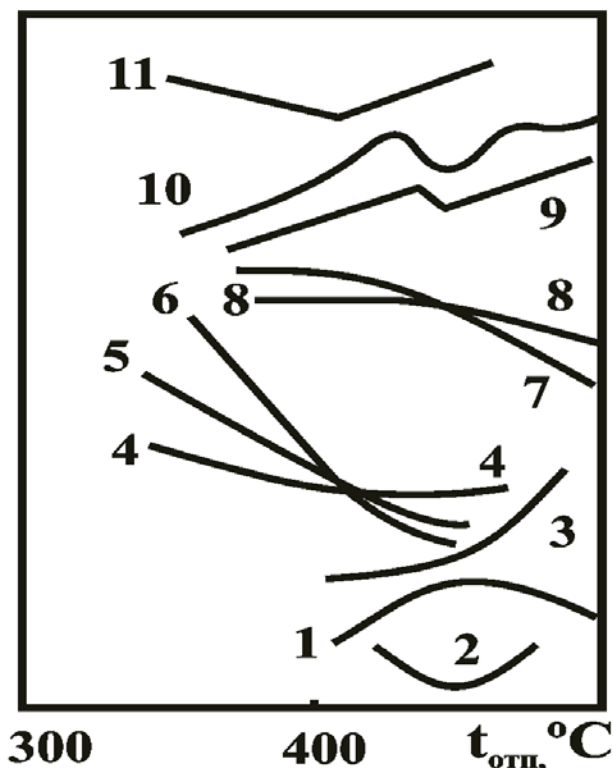


Рисунок 4 – Схематизированная зависимость свойств после отпуска закаленной или наклепанной стали; изотермического превращения аустенита; во время нагрева (пояснения в тексте)

Экстремумам  $\sigma_B$  (и  $\sigma_{0,2}$ ),  $\delta$  (и  $\psi$ ) после отпуска при 450 °C отвечает полное растворение или уменьшение размеров карбида железа [24] в сталях У12 и 50 (рис. 4, кр. 2). Отметим, что после отпуска при ~ 450 °C (рис. 3а) наблюдается максимум параметра решетки железа (0,008 % C). Следовательно, растворение цементита может быть обусловлено спецификой поведения железа при данной температуре. Размер карбидов по Эггеру после закалки и отпуска при ~ 450 °C становится минимальным (рис. 4, кр. 2). По М.П. Арбузову, размер карбидов в углеродистых сталях почти неизменен до ~ 400 °C, а затем начинается их бурный рост (рис. 4, кр. 3). Для резкого роста необходимо резкое изменение скорости диффузии углерода. Такое ускорение возможно при превращениях, например, вблизи точки Кюри железа.

Отпуск при ~ 450 °C охрупчивает не только закаленную, но и наклепанную на 90% феррито-цементитную патентированную сталь 50 [25] (рис. 4, кр. 2), что исключает какое-либо значение металлографической структуры. Этот вывод подтверждают:

1. Начало интенсивного роста внутреннего трения стали У8 после закалки

с отпуском 500 °С [21].

2. Начало интенсивного увеличения внутреннего трения отожженной стали У8 (рис. 4, кр. 3) [21].

3. Максимальная скорость коррозии 4 чугунов с разной формой графита и разной металлической основой (от ферритной до перлитной) после закалки с отпуском при ~ 450 °С или изотермического превращения аустенита при ~ 450 °С [22] (рис. 4, кр. 1).

4. Максимум коэрцитивной силы наклепанной и закаленной стали после отпуска при ~ 450 °С [19] (рис. 4, кр. 1).

5. Минимум размеров блоков наклепанной и закаленной стали (рис. 4, кр. 2) [20].

6. Пересечение после отпуска при ~ 425 °С кривых микроискажений  $\Delta a/a$  закаленной (Рисунок 4, кр. 6), наклепанной на 25% (рис. 4, кр. 4) и 90% (рис. 4, кр. 5) стали 70 [20].

7. Пересечение при ~ 450 °С кривых калориметрического эффекта сталей У9 (рис. 4, кр. 7) и 50 (Рисунок 4, кр. 8), что исключает влияние углерода (цементита) [25].

8. На фундаментальной дилатограмме Ганеманна и Трегера закаленной стали при 430 °С отчетливый изгиб [21] (рис. 4, кр. 9), который в доступной нам литературе не обсуждался.

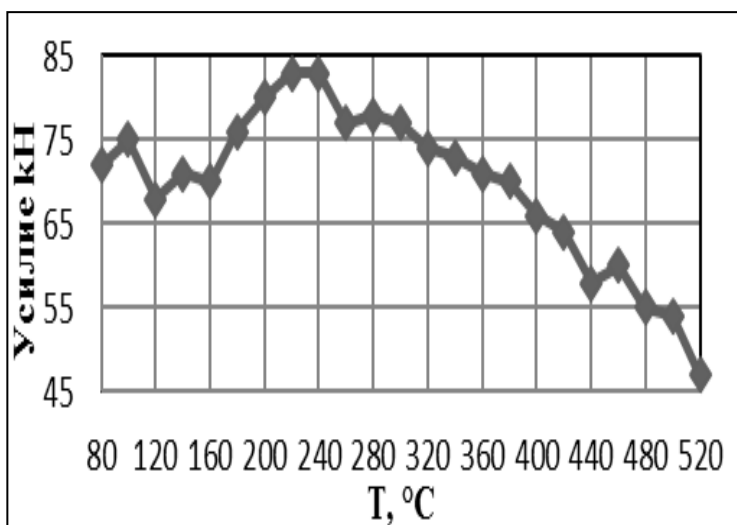
9. На кривой теплоемкости закаленной стали при отпуске ~ 430 °С – минимум и максимум теплоемкости (рис. 4, кр. 10), который Г.В. Курдюмов отметил в 1940 г., но опустил в монографии «Превращения в железе и стали» (1977 г.) [13].

10. Минимум удельного веса, т.е. максимум объема, что возможно при растворении карбидов в феррите [14].

11. У закаленной стали минимум коррозионной стойкости [11] (рис. 4, кр. 11).

12. Максимальная разница в удельном весе и остаточном магнетизме по сравнению с мартенситом [25] (рис. 4, кр. 1).

Подтверждением превращения в тонкой структуре железа было проведение в данной работе горячей осадки (80-520 °С, через 20 °С, установка Gleeble-3800). Максимум при ~ 450 °С (рис. 5) усилия осадки подобен максимуму горячей твердости железа М.Г. Лозинского [16]. Природа этого «максимума» М.Г. Лозинским не раскрывается, но приводится в следующих выражениях: «На использовании зависимости твердости от температуры может быть основан метод определения температур фазовых превращений». Таким образом, максимум усилия осадки при ~ 450 °С может свидетельствовать о превращении в железе.



**Рисунок 5 – Зависимость усилия при деформации на половину высоты образца железа (0,008 % С) при температуре от 80 до 520 °С**

Проведенный в настоящей работе анализ многочисленных литературных данных по свойствам железа и сталей, а также результаты собственных экспериментов свидетельствуют о существенных изменениях в структуре железа при ~ 450 °С, что может быть следствием предполагаемого превращения.

#### *Литература*

1. Maksarov V.V. The formation of surface roughness of piston rings for the purpose of improving the adhesion of wear-resistant coatings / V.V.Maksarov, V.A.Krasnyy // Key Engineering Materials. 2017. No 736. P.73-78.
2. Powell R.W. Further measurments of the thermal and electrical conductivity of iron at high temperatures // The proceedings of the physical society. 1939. V. 51. Part 3. № 285. P. 407-418.
3. Pryakhin E.I. Understanding the structure and properties of the heat affected zone in welds and model specimens of high-strength low-alloy steels after simulated heat cycles / E.I. Pryakhin, D.M. Sharapova // CIS Iron and Steel Review. 2020. 19. С. 60-65.
4. Takeuchi T. Workhardening of iron single crisals between 25° and 900 °C // Jap. jorn. applied physics. 1970. V. 9. № 4. P. 391-400.
5. Безъязычный В.Ф. Развитие исследований тепловых процессов в технологии машиностроения // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С.395-400. DOI:10.31897/PMI.2018.4.395.
6. Белоус М.В., Черепин В.Т., Васильев М.А. Превращения при отпуске стали. М.: Металлургия. 1973. 232 с.
7. Богданов В.И. Особенности роста зерен аустенита в металле поковки из крупного слитка конструкционной стали // Письма о материалах. 2019. Т. 9. № 3. С. 304-309. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-3-304-309.

8. Бозорт Р. Ферромагнетизм // М.: Изд. иностр. лит-ры. 1956. 784 с.
9. Григорович В.К. Электронное строение и термодинамика сплавов железа // М.: Наука. 1970. 292 с.
10. Гриднев В.Н. Вопросы физики металлов и металловедения // Киев. Изд-во АН УССР. 1960. № 10. С.14-19.
11. Гудремон Э. Специальные стали – В 2-х т. Т.1. М.: Metallurgizdat, 1959. 952 с.
12. Гудцов Н.Т. Металловедение и термическая обработка. Справочник под ред. Гудцова Н.Т. М.: Metallurgizdat, 1957. 1204 с.
13. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращение в железе и стали. М.: Наука, 1970. 236 с.
14. Лившиц Б.Г. Физические свойства сплавов. М.: Metallurgizdat, 1980. 280 с.
15. Лившиц Б.Г. Физические свойства сплавов. М.: Metallurgizdat, 1946. 320 с.
16. Лозинский М.Г. Высокотемпературная металлография. М.: Машгиз, 1956. 312 с.
17. Лысак Л.И. Изменение тонкой кристаллической структуры закаленной стали при отпуске // Вопросы физики металлов и металловедения. АН УССР. 1952. № 3. С. 28-40.
18. Савицкий Е.М. Влияние температуры на механические свойства металлов и сплавов. М.: Изд. АН СССР, 1957. 295 с.
19. Стародубов К.Ф., Бабич В.К. Изменение пластических свойств стали при отпуске. Днепропетровск: Укр НТО Чермет. 1957. 31 с.
20. Стародубов К.Ф. О природе процессов, протекающих при отпуске закаленной стали в интервале температур 350-550 °С // Научн. докл. высш. школы. Металлургия. 1958. 31. С. 266-268.
21. Счастливцев В.М. Перлит в углеродистых сталях. Екатеринбург: УрО РАН. 2006. 311 с.
22. Тавадзе Ф.Н. Влияние термической обработки на коррозионную стойкость чугуна / Ф.Н. Тавадзе, Б.Е. Галинкин // Труды Грузинск. Политехн. ин-та. 1957. № 3 (51). С. 120-126.
23. Титов Г.Н. Явление тепловой хрупкости у ВИТ-железа. М.: Metallurg, 1937. С. 15-25.
24. Шахназаров К.Ю. Аномалии физико-механических свойств железа как следствие превращений при ~ 650, ~450 и ~200 °С // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 1. С. 70-78. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-1-70-78.
25. Шахназаров К.Ю. 430±30 °С – узловая (критическая) температура железа и углеродистой стали / К.Ю. Шахназаров, А.Ю. Шахназаров // МиТОМ. 2001. № 11. С. 24-25.



*ДЛЯ ЗАМЕТОК*

---

Адрес редакции:  
141070, Королев,  
Ул. Октябрьская, 10а  
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),  
E-mail : rio-kimes@mail.ru,  
Site:www. unitech-mo.ru

Подписано в печать 17.06.2021  
Формат В5  
Печать офсетная. Усл.печ.л. 12,6  
Тираж 500 экз.  
Заказ № 91-02  
Отпечатано  
в типографии  
ООО «Научный консультант»  
г. Москва  
Хорошевское шоссе, 35, корп.2  
Тел.: +7 (926) 609-32-93,  
+7 (499) 195-60-77  
E-mail :keyneslab@gmail.com  
Site:www.n-ko.ru