

## ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

**А. А. Ковель**

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация  
ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация*

*Наземно-экспериментальная отработка элементов космической техники – ответственный этап в создании космических изделий, фактически – это наземный «полет» создаваемых устройств. И от того, насколько адекватно будут воспроизведены на этом этапе эксплуатационные условия и обеспечено успешное функционирование устройств в предполагаемых условиях, зависит его успешная работа в реальном полете в течение срока эксплуатации. Радиоэлектронные устройства (аппаратура) космического аппарата – один из неперенных элементов, обеспечивающих выполнение целевых задач, которые должны подтвердить свою готовность к предстоящей работе на этапе наземно-экспериментальной отработки.*

*Технология экспериментальной отработки во времена, когда Научно-производственное объединение прикладной механики (ныне АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва») входило в круг предприятий создателей космической техники, только складывалась. И очень своевременным оказался в это же время пик исследований и внедрений в инженерную практику математического планирования эксперимента. Имелся задел прикладных работ в различных отраслях науки и техники и минимум работ по радиоэлектронной тематике, так как элементная база последней не позволяла управлять внутренними параметрами электронных комплектующих, т. е. выявлять влияние внутренних факторов. Это стало преградой при реализации возможностей метода в исследованиях и совершенствовании радиоэлектронной аппаратуры.*

*В статье показано, как разработчики аппаратуры предприятия преодолевали существовавшие ограничения и успешно применяли математическое планирование эксперимента впервые в российской космической технике.*

*Используя возможности методологии, решались задачи оптимизации схемотехнической и конструкторской реализации устройств, выбора элементной базы для космической аппаратуры, установление допусков и формирования испытательных режимов и др.*

*Ключевые слова: факторы, матрица планирования, математическое планирование эксперимента, полный факторный эксперимент, факторограмма, коридор откликов, факторная ниша.*

### Введение

Математическое планирование эксперимента (МПЭ) как одна из реализаций активного эксперимента пережило бурный всплеск исследований, публикаций, дискуссий, обсуждений на семинарах и других научно-технических мероприятиях в 70-80-х годах ушедшего столетия. Интерес к этому научно-техническому направлению иници-

ировал публикацию в центральном органе – газете «Правда», в которой отмечалось, что «теория планирования эксперимента набирает силу и все более настойчиво проникает в практику» [1]. Также подчеркивалось, что «в ряде случаев мешает делу не высокий уровень культуры производства и, наконец, слабая информативность специалистов о новых методах исследования» [2–4].

В настоящее время информационный доступ практически снят с повестки, о чем свидетельствует даже беглый поверхностный обзор изданий о теоретических и прикладных аспектах

✉ bogdan.kovel@mail.ru

© Ковель А. А., 2019

МПЭ. И состояние публикаций не позволяет объективно оценивать исследовательское и прикладное состояние МПЭ. Настоящая статья частично заполнит нишу кратким изложением, как развивался и внедрялся метод при разработке, экспериментальной отработке элементов космической техники – радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА).

## 1. Задачи МПЭ технологии наземной экспериментальной отработки

Проведение исследований шло в направлении совершенствования и повышения информативности методов наземно-экспериментальной отработки (НЭО):

- оптимизации схмотехнической и конструкторской реализаций РЭА;
- формирования и оптимизации перечней перспективной элементной базы;
- поисков методов установления обоснованных допусков на параметры РЭА;
- ускоренных методов прогнозирования ресурсного потенциала РЭА;
- методов оценки влияния факторов космического пространства (ФКП).

В процессе исследований перечень расширялся и уточнялся в связи с имеющимися задачами, ставящимися перед предприятиями. Эти и другие обстоятельства обусловили необходимость поисков методов обеспечения длительного срока активного существования (САС) КА, параметрической совместности функциональных элементов в составе единой функциональной структуры, оценки возможного отличия результатов функционирования элементов РЭА в наземных условиях и в составе КА в течение одинакового времени пребывания и др.

Использование технологических принципов МПЭ позволило получить по ряду перечисленных вопросов и проблем положительные результаты, а также понять преимущества многофакторного активного эксперимента.

При исследованиях РЭА КА рассматривалась как объект исследования (ОИ), что оказалось предпочтительней кибернетической модели черного ящика, так как в большинстве случаев разработчику РЭА известна внутренняя структура объекта и элементы, ее реализующие, и по результатам активного эксперимента, используя отклики на управляемые воздействия, необходимо восстановить аналитическую зависимость контролируемых параметров ОИ ( $\Pi_{\text{ОИ}}$ ) от управляемых воздействий  $\{x_i\}$ :

$$\{x_i\} = \{x_{\text{вх}}, x_{\text{внш}}, x_{\text{внт}}\},$$

где  $x_{\text{вх}}$  – входные,  $x_{\text{внш}}$  – внешние,  $x_{\text{внт}}$  – внутренние воздействия.

По результатам МПЭ эту зависимость представляют полиномом:

$$\Pi_{\text{ОИ}} = \epsilon_0 + \sum_{i>1}^n \epsilon_i x_i + \sum_{i=1, i>1}^n \epsilon_i x_i x_j + \dots + \sum_{i>1}^n \epsilon_{ij} x_i^2,$$

где  $\epsilon_i$  – соответствующие коэффициенты регрессии, интерпретируемые как коэффициенты влияния соответствующих факторов (воздействий) и их взаимодействий;  $n$  – количество факторов [5].

В компактном виде указанная зависимость может быть представлена как:

$$\Pi \left( \sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right).$$

Объем реализуемых операций (опытов) при МПЭ определяет матрица планирования (МП) – исходный модуль для программно-методических документов, по которым реализуют исследование и обрабатывают результаты последнего.

МП, отражающая полный набор сочетаний уровней факторов, например, варьируемых на двух уровнях (полный факторный эксперимент), ориентирует на проведение исследований по единому унифицированному алгоритму, что упрощает анализ, интерпретацию результатов, их сравнение и объединение в единой структуре.

Для инженерной практики оказалось продуктивным представление результатов МПЭ дополнительно к табличному (МП) факторограммным (развертка), которое дает хорошо обозримую визуальную картину результатов реализованных опытов (по оси абсцисс – номера опытов в соответствии с МП, по оси ординат – результаты опытов) [6].

Например, МП при воздействии на ОИ трех факторов ( $x_{\text{вх}}$ ,  $x_{\text{внш}}$ ,  $x_{\text{внт}}$ ) – рис. 1 и табл., а соответствующая факторограмма – рис. 2 ( $x_{\text{внт}}$  условно вынесены за пределы ОИ).

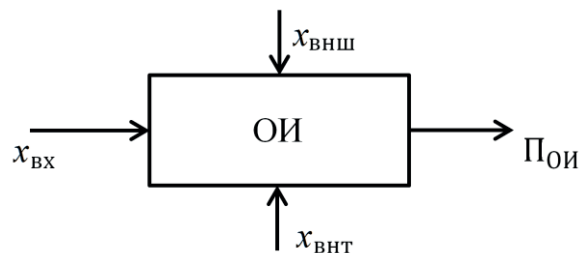


Рис. 1. Объект исследования

Приращения  $\Delta \Pi_{\text{ОИ}}$  при переходе от опыта к опыту характеризуют чувствительность ОИ к приращению варьируемого фактора ( $\Delta x$ ), т. е., в конечном итоге, чувствительность элементной базы, на которой реализовано устройство, а также, как эту чувствительность транслирует в изменение  $\Pi_{\text{ОИ}}$  выбранное схмотехническое решение.

Сопоставив результаты двух (нескольких) вариантов реализации ОИ, уже такой первичный

качественный анализ позволяет разработчику оптимизировать выбор комплектующих элементов электро-радио изделий (ЭРИ), и схемотехнику, а также размещение ЭРИ в пространстве предполагаемой конструкции (взаимовлияние) для дальнейшей работы с ОИ.

Таблица

Матрица планирования (№ – номер опыта,  $x_1 = x_{вх}, x_2 = x_{внеш}, x_3 = x_{внт}$ )

№	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\Pi_{ОИ}$
1	+	+	+	$\Pi_1$
2	-	+	+	$\Pi_1$
3	+	-	+	$\Pi_1$
4	-	-	+	-
5	+	+	-	-
6	-	+	-	-
7	+	-	-	-
8	-	-	-	$\Pi_8$

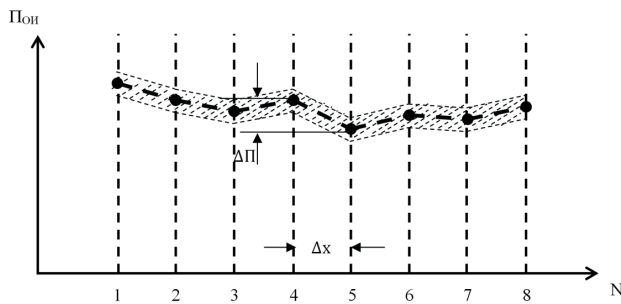


Рис. 2. Факторограмма результатов опытов

## 2. Результаты исследований

Для большинства ОИ МПЭ, реализованного на одном образце, недостаточно, так как полученные отклики не отражают влияния всей совокупности внутренних неварьируемых факторов (отличие внутренних параметров ЭРИ, взаимовлияние). Для этого дополняют МПЭ следующими процедурами: эксперимент реализуют на некотором наборе (выборке) однотипных ОИ. Тогда в каждом опыте получают, например,  $k$  значений  $\Pi_{ОИ}$ , а на факторограммной развертке –  $k$  факторограмм, которые образуют коридор откликов (рис. 3).

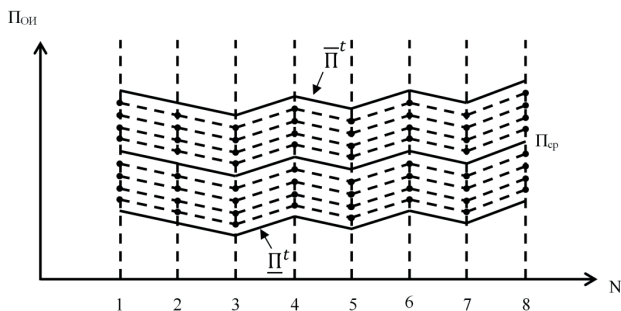


Рис. 3. Коридор откликов

При этом появляется возможность выявить влияние на  $\Pi_{ОИ}$  внутренних факторов ( $\{x_{внт}\}$ ), что поначалу являлось проблемой для исследования влияния последних, когда они недоступны для варьирования. В конечном итоге  $\{x_{внт}\}$  определяют ширину коридора откликов, которая может быть минимизирована подбором элементов базы и оптимизацией схемотехники.

В то же время  $k$  реализации МПЭ не могут охватить всех возможных разбросов  $\Pi_{ОИ}$  в пределах каждого опыта. Поэтому, используя  $k$   $N$  откликов, оценивают возможные (например, толерантные) пределы для  $\Pi_{ОИ}$  как:

$$\Pi'_{ОИ} = \Pi_{ср} \pm k^t S(\Pi),$$

где,  $\Pi^t$  – возможные толерантные пределы отклонения  $\Pi_{ОИ}$  в каждом опыте ( $\underline{\Pi}^t, \bar{\Pi}^t$  – нижние и верхние соответственно);  $\Pi_{ср}$  – среднее значение  $\Pi_{ОИ}$  в каждом опыте;  $S(\Pi)$  – оценки  $\sigma(\Pi)$  в каждом опыте;  $k^t$  – толерантный коэффициент (табулированный) [7], рис. 3.

Полученные результаты позволяют восстановить базовую модель ОИ в виде:

$$\Pi_B \left( \sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right) = \Pi_{ср} \left( \sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right),$$

отражающую свойства ОИ в факторном пространстве, а также математические модели:

$$\underline{\Pi}^t \left( \sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right), \bar{\Pi}^t \left( \sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right),$$

как пределы, в которые с заданной вероятностью ( $P_3$ ) гарантировано попадание не менее  $\gamma$  доли возможных результатов [7].

Полученные отклики – статистическая база при подготовке нормативов для изготовления товарной продукции как групповой допуск на контролируемые параметры. Для изделий единичного производства результаты МПЭ позволяют устанавливать индивидуальные допустимые значения для параметров объекта контроля, используя разбросы значений коэффициентов влияния ( $\underline{g}^t, \bar{g}^t$ ). Тогда, используя начальный («стартовый») уровень  $\Pi_{ОИ}$ , например, полученный при значениях воздействующих факторов, зафиксированных на базовых уровнях (0, 0, ..., 0), рассчитывают «полосу» (индивидуальный допуск), в пределах которой должен находиться параметр объекта контроля при любых сочетаниях уровней воздействий за счет возможных разбросов значений коэффициентов влияния (рис. 2).

Постоянные требования к увеличению САС изделий космической техники вынуждало проводить селекцию среди возможных вариантов реализации РЭА. Средствами МПЭ была выявлена возможность контролировать наличие у устройств параметрических запасов работоспособности ( $\Delta \Pi$ ). Под запасами понимают параметрические

«зазоры» между возможными значениями  $\Pi_{\text{ОИ}}$  и предельно допустимыми уровнями параметров ( $\Pi_{\text{min\_доп}}$ ,  $\Pi_{\text{max\_доп}}$ ), превышая которые  $\Pi_{\text{ОИ}}$  переходит в зону недопустимых значений, приводящих к отказу или ошибочному функционированию структуры, в составе которой используется устройство (рис. 4) [8].

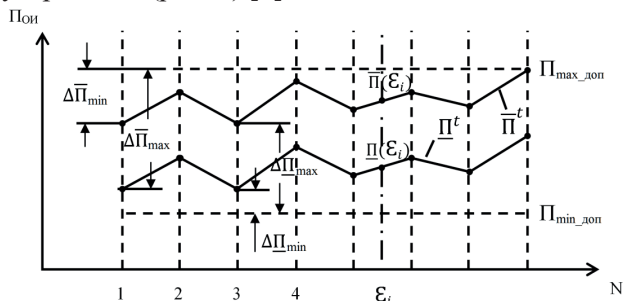


Рис. 4. Параметрические запасы работоспособности

Параметрические запасы работоспособности оценивают по результатам МПЭ, оценки толерантных пределов и используют для селекции устройств, способных сохранять значения параметров в допустимых пределах в эксплуатационных условиях при постепенном разрушающем действии деградационных процессов (рис. 4), т. о.:

$$\Delta \underline{\Pi}_{\min} = \Pi_{\min\_доп} - \underline{\Pi}^t, \quad \Delta \underline{\Pi}_{\max} = \bar{\Pi}^t - \Pi_{\min\_доп}$$

$$\Delta \bar{\Pi}_{\min} = \Pi_{\max\_доп} - \bar{\Pi}^t, \quad \Delta \bar{\Pi}_{\max} = \Pi_{\max\_доп} - \bar{\Pi}^t,$$

где  $\Delta \underline{\Pi}_{\min}$ ,  $\Delta \underline{\Pi}_{\max}$  – минимальные и максимальные параметрические запасы работоспособности относительно  $\Pi_{\min\_доп}$  ( $\Delta \underline{\Pi}$ ) и  $\Pi_{\max\_доп}$  ( $\Delta \bar{\Pi}$ ) соответственно.

Значения запасов позволяет строить стратегию использования устройств КА при длительных САС (10 и более лет), а также, используя оценки запасов работоспособности, возможно установление, например, допустимых минимальных (или максимальных) скоростей деградационных процессов как:

$$m[v(\varepsilon_i)_{\min}] = \sum v(\varepsilon_i)_{\min} P(\varepsilon_i) = \sum_{T_3} \frac{\Delta \Pi(\varepsilon_i)_{\min}}{t(\varepsilon_i)} P(\varepsilon_i) =$$

$$= \sum_{T_3} \frac{\Delta \Pi(\varepsilon_i)_{\min}}{t(\varepsilon_i)} \sum_{T_3} \frac{\Delta t(\varepsilon_i)}{T_3} = \frac{1}{T_3} \sum_{T_3} \Delta \Pi(\varepsilon_i)_{\min},$$

где  $\Delta t(\varepsilon_i)$  – элемент длительности  $\varepsilon_i$ -го режима на участке  $T_3$ ,  $\sum \Delta t(\varepsilon_i) = t(\varepsilon_i)$  – суммарная длительность  $\varepsilon_i$ -го режима,  $T_3$  – время длительного функционирования устройства в составе КА [6].

Полученный результат показывает, что математическое ожидание минимальной скорости деградации определяется суммой минимальных запасов работоспособности в  $\varepsilon_i$ -х режимах и временем  $T_3$ .

Кроме оптимизации элементной базы, схемотехнического и конструкторского решения

устройства, обеспечивающих необходимые запасы работоспособности, полученный результат позволяет перестроить технологию ресурсных испытаний длительно функционирующих устройств, связав ее с оценкой параметрических запасов и скоростью расходования последних.

Полученные результаты позволяют также поновому организовать выбор и назначение условий и режимов испытаний устройств на всех этапах изготовления. Совокупность испытательных режимов, условий и соответствующих им ограничений объединяют понятием «испытательный тест» ( $T_{\text{И}}$ ):

$$T_{\text{И}} = \{m\{x_i\}; \Pi_{\text{ОИ}}(\varepsilon_i)_{\text{доп}}\},$$

где  $m(x_i)$  – совокупность (набор) функциональных воздействий (факторов),  $\Pi_{\text{ОИ\_доп}}$  – ограничения, соответствующие указанному набору, когда  $x_i$  принимают (задают) определенные значения, генерируемые универсальным или специализированным испытательным оборудованием [8; 9].  $\Pi_{\text{доп}}$  рассчитывают, используя математические модели  $\underline{\Pi}^t$  и  $\bar{\Pi}^t$ , как допустимые отклонения  $\Pi_{\text{ОИ}}$  в пределах сечения коридора откликов (рис. 4), соответствующих набору уровней  $x_i$ , выбранных как испытательные.

Технологии НЭО РЭА КА, использующие методологию МПЭ, позволили учитывать ряд принципов автономной экспериментальной отработки элементов (блоков) сложных электронных устройств, проектирование и изготовление которых велось различными предприятиями. Т. к. в этом случае ряд воздействий являются общими для элементов, входящих в систему (напряжение питания, температура, уровни помех и др.), указанное единство позволило сформировать понятие факторной ниши и уточнить методологию формирования уровней факторов, являющихся факторами взаимодействия ряда последовательно включенных элементов (блоков). Анализ особенности ниши показал, что только синхронное изменение уровней общих факторов и использование результатов отработки предыдущих блоков (генераторов воздействий) при определении уровней варьирования факторов взаимодействия для блоков последующих может адекватно моделировать работу всех составных частей в составе общей структуры [10].

### 3. Эксперимент, вынесенный в КОСМОС

Увеличение и обеспечение длительных САС КА – постоянная забота создателей космической техники. Возможности совершенствования схемотехники, методов резервирования и конструирования бортовой аппаратуры (БА) в значительной степени определяются элементной базой ЭРИ, возможности которой «генетически» определяют конечные возможности БА. Чтобы сблизить воз-



возможности ЭРИ с потребностями изделий космической техники, необходимо оценить их параметрические и ресурсные возможности в реальной эксплуатационной среде.

Корректное комплексное воспроизведение всего спектра эксплуатационных воздействий (тем более, длительное) при НЭО элементов КА невозможно, что обусловлено тем, что оборудование, используемое при наземных испытаниях, позволяет воспроизводить монофакторные воздействия, и результаты испытаний неадекватны результатам стохастических (по времени и по уровням воздействий) полифакторных условий эксплуатационной космической среды. Особое значение в этом спектре приобретают корпускулярно-волновые воздействия естественного (галактические, солнечные) и искусственного происхождения, объединенные понятием «факторы космического пространства» (ФКП).

Информация о функционировании ЭРИ в составе БА по результатам телеметрических измерений также недостаточна, т. к. формируется результат работы элементов в режимах большого количества схмотехнических реализаций и, соответственно, электрических режимов. В этой связи актуальны исследования в натуральных условиях работы ЭРИ в «чистом» виде. Это обстоятельство определило задачу исследования процессов, протекающих в ЭРИ в условиях КА, как в контейнере, так и вне его.

Исследованию подвергались три выборки ЭРИ одинакового объема, две из которых были установлены вне контейнера КА, а одна – внутри. Это позволило учесть влияние температуры от минимальной до максимальной вне контейнера КА, соответствующих условиям эксплуатационной среды (солнечная и теневая сторона КА). Одновременно третья плата находилась в контейнере КА в условиях относительно стабильной температуры [11; 12].

Генератор управляющих воздействий, расположенный в контейнере КА, непрерывно по случайному закону обеспечивал изменение на заданных уровнях питающих и режимных напряжений ( $E_n$ ), величин нагрузки и других воздействий в зависимости от типа ЭРИ, подвергаемых исследованию. При этом «варьировался» уровень ФКП: максимальный на солнечной стороне вне контейнера и минимальный на теневой (и в контейнере). Уровни воздействий фиксировались специальными датчиками. Параллельно эквивалентное количество ЭРИ подвергалось таким же воздействиям (кроме ФКП) в наземных условиях.

С учетом указанных условий были сформированы МП для каждой из выборок ЭРИ. По результатам, полученным по каналу телеметрии, были восстановлены полиномиальные математические модели с учетом воздействий, варьирова-

емых искусственным и естественным путем (ФКП). Одновременно те же зависимости были восстановлены и для выборки, подвергнутой исследованию в наземных условиях.

Таким образом, в процессе эксплуатации КА в фиксированных временных сечениях формировались результаты измерений по выборкам, отражающие влияние различных случайных сочетаний уровней воздействий. Различие результатов в выборках, полученных при одних и тех же сочетаниях воздействий, оценивалось как результат влияния различных уровней ФКП.

## Заключение

Результаты исследований выборок ЭРИ, использованных в РЭА КА, показали:

- принципиально новые возможности МПЭ в составе технологии экспериментальной обработки БА, позволяющие максимально приблизить режимы испытаний к условиям реальной эксплуатации;
- возможность параллельной синхронизированной реализации натуральных и наземных экспериментов и получения дополнительных экспериментальных данных, которые невозможно получить при наземных испытаниях;
- целесообразность постоянного использования возможностей исследования в натуральных условиях перспективных комплектующих и материалов для космической техники.

Результаты проведенных исследований в наземных условиях и на борту КА позволили создать перечни ЭРИ отечественного производства и рекомендации по условиям и режимам применения в БА КА с длительными САС.

Финальным аккордом нетрадиционного использования технологии МПЭ следует считать возможность моделирования длительного (в пределах САС КА) функционирования БА. Идея моделирования заключается в следующем. Кроме гарантии сохранения работоспособности ЭРИ в течение длительных сроков, разработчик (изготовитель) ЭРИ должен располагать данными об изменении функциональных параметров элементов через 1, 3, 5, ..., 10 лет функционирования в эксплуатационных условиях при применении в режимах, оговоренных в ТУ на элементы. Форма представления этих данных может быть согласована потребителями и поставщиком ЭРИ.

Оптимальным следует считать наличие выборок ЭРИ со значениями физических параметров после нормального функционирования в течение отмеченных выше сроков. Тогда, используя такие выборки ЭРИ в РЭА и исследуя ее по методологии МПЭ, разработчик получит  $P_{0и}$  при всех сочетаниях варьлируемых воздействий, а временные изменения параметров ЭРИ найдут отражения в ма-

тематических моделях  $\Pi_{\text{ОИ}}$  через изменения коэффициентов влияния ( $v_i, v_{ij}, v_{ii}, \dots$ ), что, в конечном итоге, позволит восстановить зависимости этих коэффициентов от времени ( $v_i(t), v_{ij}(t), v_{ii}(t), \dots$ ).

Применение МПЭ при НЭО РЭА КА показало значительные возможности метода при совершенствовании технологии и повышении качества наземной обработки.

## Список литературы

- [1] Адлер Ю. П., Грановский Ю. В. // Правда, 1973. 26 марта.
- [2] Ивобатенко Б. А., Ильинский Н. Ф., Копылов И. П. Планирование эксперимента в электротехнике. М. : Энергия, 1971. 185 с.
- [3] Мизайлов В. И., Федосов К. М. Планирование эксперимента в судостроении. Л. : Судостроение, 1978. 159 с.
- [4] Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. Планирование эксперимента в технике. Киев : Техника, 1984. 198 с.
- [5] Синдяев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М. : Юрайт, 2011. 399 с.
- [6] Ковель А. А., Покидько С. В. Математическое планирование эксперимента при обработке электронных устройств // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 8. С. 13–18.
- [7] Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М. : Наука, 1965. 556 с.
- [8] Ковель А. А. Установление допусков на параметры электронных устройств по результатам многофакторного эксперимента // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 8. С. 18–22.
- [9] Способ формирования испытательных тестов : пат. 2469372 Рос. Федерация / Ковель А. А., Капустин А. Н. ; заявл. 27.05.2011 ; опубл. 10.12.2012. Бюл. № 34.
- [10] Ковель А. А., Покидько С. В. Математическое планирование эксперимента в условиях факторной ниши // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 4. С. 47–50.
- [11] Ковель А. А., Покидько С. В. Исследование элементной базы бортовой аппаратуры в условиях космического пространства // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 4. С. 54–57.
- [12] Способ измерения параметров элементов радиоэлектронной аппаратуры в условиях воздействия факторов космического пространства : авт. св-во 289851 СССР / Ковель А. А., Покидько С. В., Верхотуров В. И. ; 1990.

## PROGNOSTIC POTENTIAL OF MATHEMATICAL EXPERIMENT PLANNING

**A. A. Kovel**

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation  
Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

*The ground-experimental testing of the elements of space technology is a crucial stage in the creation of space products, in fact, this is the ground «flight» of the devices being created. And how well the operating conditions will be reproduced at this stage and the successful functioning of the devices under the expected conditions is ensured, its successful operation in real flight during the service life depends. Electronic equipment (apparatus) of the spacecraft is one of the essential elements that ensure the fulfillment of target tasks, which should confirm their readiness for the forthcoming work at the stage of ground-based experimental testing.*

*The technology of experimental development at a time when the scientific and production association of applied mechanics (now the JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems) was part of the circle of enterprises that created space technology. And at the same time, the peak of research and implementation in the engineering practice of mathematical experiment planning turned out to be very timely. There was a backlog of applied work in various branches of science and technology and a minimum of work on radio-electronic topics, since the element base of the latter did not allow managing the internal parameters of electronic components, i. e., to reveal the influence of internal factors. This became an obstacle to the implementation of the capabilities of the method in research and improvement of electronic equipment.*

*The article shows how the developers of the enterprise equipment overcame the existing limitations and successfully applied mathematical planning of the experiment for the first time in Russian space technology.*

*Using the capabilities of the methodology, the tasks of optimization of circuit design and design implementation of devices, the choice of the element base for space equipment, the establishment of tolerances and the formation of test modes, etc. were solved.*

*Keywords: factors, planning matrix, mathematical experiment planning, full factorial experiment, factorogram, response corridor, factor niche.*

## References

- [1] Adler Yu. P., Granovsky Yu. V. // Pravda, 1973, March 23. (In Russian)
- [2] Ivobatenko B. A., Ilinsky N. F., Kopylov I. P. *Planirovanie eksperimenta v elektrotekhnike* [Planning of an experiment in electrical engineering]. Moscow, Energy, 1971, 185 p. (In Russian)
- [3] Mizylov V. I., Fedosov K. M. *Planirovanie eksperimenta v sudostroenii* [Planning of an experiment in shipbuilding]. Leningrad, Sudostroenie, 1978. 159 p. (In Russian)
- [4] Barabashchuk V. I., Kredentser B. P., Miroshnichenko V. I. *Planirovanie eksperimenta v tekhnike* [Planning an experiment in engineering]. Kiev, Technics, 1984. 198 p. (In Russian)
- [5] Sindyaev N. I. *Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh* [The theory of experiment planning and analysis of statistical data]. Moscow, Yurayt, 2011. 399 p. (In Russian)
- [6] Kovel A. A., Pokidko S. V. *Matematicheskoe planirovanie eksperimenta pri otrabotke elektronnykh ustrojstv* [Mathematical planning of the experiment when developing electronic devices] // Journal of Instrument Engineering, 2008, vol. 51, no. 8, pp. 13–18. (In Russian)
- [7] Smirnov N. V., Dunin-Barkovsky I. V. *Kurs teorii veroyatnostej i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozhenij* [Course of probability theory and mathematical statistics for technical applications]. Moscow, Science, 1965. 556 p. (In Russian)
- [8] Kovel A. A. *Ustanovlenie dopuskov na parametry elektronnykh ustrojstv po rezul'tatam mnogofaktornogo eksperimenta* [Establishment of tolerances on the parameters of electronic devices based on the results of a multifactor experiment] // Journal of Instrument Engineering, 2008, vol. 51, no. 8, pp. 18–22. (In Russian)
- [9] Kovel A. A., Kapustin A. N. *Sposob formirovaniya ispytatel'nykh testov* [The method of forming the test tests]. Patent RU 2469372, 2012, bulletin no. 31.
- [10] Kovel A. A., Pokidko S. V. *Matematicheskoe planirovanie eksperimenta v usloviyah faktornoj nishi* [Mathematical planning of the experiment in a factor niche] // Journal of Instrument Engineering, 2011, vol. 54, no. 4, pp. 47–50. (In Russian)
- [11] Kovel A. A., Pokidko S. V. *Issledovanie elementnoj bazy bortovoj apparatury v usloviyah kosmicheskogo prostranstva* [Investigation of the element base of onboard equipment in space conditions] // Journal of Instrument Engineering, 2011, vol. 54, no. 4, pp. 54–57. (In Russian)
- [12] Kovel A. A., Pokidko S. V., Verkhoturov V. I. *Sposob izmereniya parametrov elementov radioelektronnoj apparatury v usloviyah vozdejstviya faktorov kosmicheskogo prostranstva* [A method for measuring the parameters of radio-electronic equipment elements under the influence of space factors] : author's certificate USSR 289851, 1990.