

УДК 621.3.019

**В. А. Володарский, канд. техн. наук**

*Кафедра «Системы обеспечения движения поездов»,  
Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Исходная информация, которую реально удается собрать и подготовить для оптимизации технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, оказывается, как правило, в значительной степени неопределенной. Она проявляется в недостоверном знании численных значений исходных показателей или их вероятностного описания. Поэтому становится очевидным, что методы оптимизационных расчетов при полностью определенной информации все в большей мере приходят в противоречие с реальной действительностью.

В статье рассматривается методологический подход к постановке и решению задачи по оптимизации технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в условиях неопределенности исходной информации. В рамках комплексного подхода основными критериями оптимизации технического содержания целесообразно считать минимум удельных эксплуатационных затрат и допустимое по условиям обеспечения безопасности значение вероятности безотказной работы железнодорожной автоматики и телемеханики. Целью формализованного решения вероятностно-неопределенных задач технического содержания является определение зоны условно оптимальных значений периодичностей, ширина которой зависит от степени определенности исходной информации. Окончательный выбор решений должен производиться специалистами с привлечением дополнительных неформализованных критериев.

Учет факторов неопределенности при принятии решений о параметрах технического содержания имеет ряд преимуществ. Первое из них — это наибольшее приближение формализованных методов решения к реальным условиям эксплуатации. Второе — обязательность многовариантных расчетов и возможность анализа на их основе последствий принятых решений. Третье — свобода выбора наиболее гибких решений из числа практически равнозначных. И, наконец, четвертое — возможность принятия более обоснованных решений и уменьшение риска перерасхода средств, обусловленного неточным знанием.

железнодорожная автоматика и телемеханика, техническое содержание, оптимизация, периодичность, информация, неопределенность

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-7-24

### **Введение**

Под техническим содержанием (ТС) согласно [1] будем понимать совокупность мероприятий, направленных на поддержание и восстановление работоспособного состояния техники и ее ресурса. В частном случае ТС может сводиться к предупредительным заменам (ПЗ) и предупредительным ремонтам (ПР).

При разработке рациональной системы технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) следует учитывать некоторые предпосылки. В интересах максимального повышения эффективности работы железнодорожного транспорта заданный объем перевозок необходимо выполнять с минимальными затратами. Значит, нужно стремиться к сокращению эксплуатационных затрат, связанных с содержанием устройств ЖАТ. Выделим две основные группы этих затрат. Первая определяется расходами материальных и трудовых ресурсов на содержание, а вторая связана с аварийным восстановлением устройств ЖАТ и ущербом от задержек поездов.

Вопросы оптимального планирования технического содержания устройств ЖАТ рассматривались в ряде научных работ [2–7]. При этом расчеты оптимальной периодичности ТС устройств ЖАТ проводятся, как правило, в предположении о полной достоверности и однозначности используемой исходной информации и, следовательно, об однозначности получаемых решений. Недостатком такого подхода становится заведомое преувеличение точности оптимизации и невозможность выявить решения, экономически близкие к однозначно определяемому формально оптимальному решению.

Общие вопросы технического содержания устройств подробно описаны в ряде монографий [8–13]. Отдельные вопросы автор рассматривал в [14–16].

На практике исходная информация, которую реально удается собрать и подготовить для оптимизации периодичности ТС устройств ЖАТ, оказывается, как правило, в значительной степени неопределенной. Она проявляется в недостоверном знании численных значений исходных показателей или их вероятностного описания. Поэтому становится очевидным, что методы оптимизационных расчетов при полностью определенной информации все в большей мере приходят в противоречие с реальной действительностью. Объективно существующая неопределенность исходной информации требует принципиально нового подхода к постановке и решению задачи. Оптимизация в условиях неопределенности неизбежно содержит эвристические процедуры, исключающие полную формализацию этого процесса. При этом речь идет не о технических, а именно о принципиальных трудностях формализации, вызванных неполным знанием.

**Цель статьи** — изложить один из возможных методических подходов к постановке и решению задачи по оптимизации технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в условиях неопределенности исходной информации.

## 1. Постановка задачи

Особого внимания в условиях неопределенности требует сама постановка задачи, которая состоит:

- 1) в описании технико-экономической сущности задачи, целей и критериев оптимизации;

2) в математической формализации задачи, включающей определение целевой функции, ограничений и состава параметров, неопределенность которых может повлиять на результаты решения.

Оптимизация заключается в установлении таких значений параметров ПЗ и ПР, при которых обеспечивается максимально возможный в определенных условиях эффект. Под эффектом здесь понимается полное или частичное достижение целей. Выделим наиболее существенные цели и соответствующие им критерии. Очевидно, что система ПЗ и ПР не может считаться совершенной, если экономически она недостаточно эффективна. Поэтому основным критерием оптимизации будет минимум удельных эксплуатационных затрат на ПЗ и ПР и аварийное восстановление с учетом ущерба от возможных отказов устройств ЖАТ. В отдельных случаях отказы ЖАТ могут приводить к нарушениям безопасности движения поездов. Поэтому вторым критерием при определении параметров ПЗ и ПР следует считать обеспечение безопасности движения при эксплуатации устройств ЖАТ.

При оптимизации ПЗ и ПР невозможно рассматривать экономическую эффективность и безопасность в отрыве от надежности. Следует подчеркнуть, что применительно к ЖАТ надежность приобретает как бы двойную значимость. С одной стороны, она существенно влияет на экономическую эффективность, с другой — в значительной мере предопределяет безопасность. В рамках комплексного подхода рационально считать, что основными являются критерии экономической эффективности и безопасности, а надежность — средство, с помощью которого достигаются требуемые значения этих показателей. Тогда задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: найти такие значения параметров ПЗ и ПР, при которых достигается минимум удельных эксплуатационных затрат и обеспечивается допустимый по условиям безопасности уровень надежности ЖАТ.

Очевидно, что проведение ПЗ и ПР целесообразно только для «стареющих» устройств ЖАТ, интенсивность отказов которых со временем возрастает. Поэтому все отказы ЖАТ нужно разделить на два вида:

1) внезапные отказы, которые не зависят от внутреннего состояния устройств, а вызваны внешними факторами (например, пробой изоляции при грозовых разрядах, повреждения при сильном ветре, гололеде и т. п.). Интенсивность таких отказов в процессе эксплуатации остается постоянной, и они не могут быть устранены ПЗ и ПР;

2) постепенные отказы, интенсивность которых со временем эксплуатации возрастает, и они могут быть устранены ПЗ и ПР. Их вызывает старение или износ устройств (например, постепенное снижение сопротивления изоляции кабельных линий).

При техническом содержании необходимо учитывать возможность восстановления надежности устройств ЖАТ. Рассмотрим три степени восстановления надежности после проведения ПЗ и ПР или после устранения отказов устройств на примере изменения интенсивности постепенных отказов  $\lambda(t)$  от времени эксплуатации  $t$  (рис. 1 и 2):

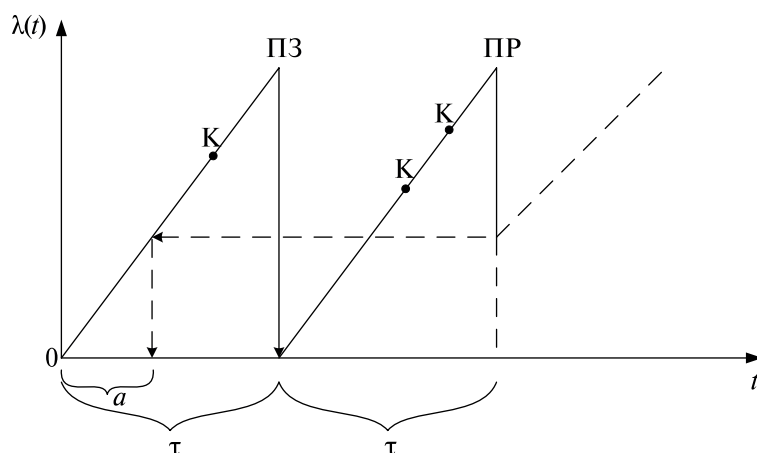
1) никакого обновления;

- 2) частичное обновление;
- 3) полное обновление.

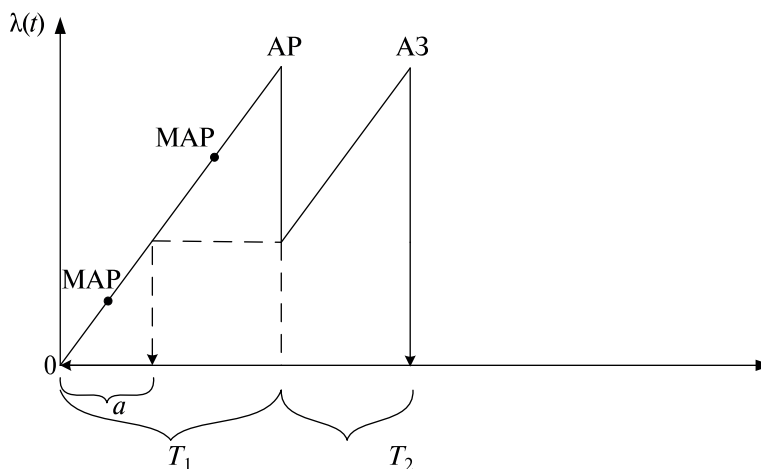
Профилактические работы типа осмотров, проверок, контроля и испытаний не приводят к обновлению устройств ЖАТ, и интенсивность их отказов не изменяется (см. точки  $K$  на рис. 1). Если устранение отказа проводится минимальным аварийным ремонтом (МАР) (например, замена предохранителя, закрепление контакта и др.), то никакого обновления устройств не проводится, и интенсивность их отказов не изменяется (см. точки МАР на рис. 2). Вероятность таких событий определяется как

$$\bar{q} = n_m/n,$$

где  $n_m$  — количество отказов, устраняемых МАР;  $n$  — общее количество отказов. Вероятность того, что отказ будет устранен аварийным ремонтом (АР) или аварийной заменой (АЗ), определяется как  $q = 1 - \bar{q}$ .



**Рис. 1.** Изменение интенсивности постепенных отказов при ПЗ и ПР



**Рис. 2.** Изменение интенсивности постепенных отказов при их устранении

Частичное восстановление происходит при проведении предупредительного ремонта (ПР) с периодичностью  $\tau$  или аварийного ремонта (АР) через наработку на отказ  $T_j$ . В этом случае «возраст» устройств как бы «возвращается» в точку  $a$  (см. рис. 1 и 2). «Время жизни» устройств ЖАТ от 0 до  $a$  назовем глубиной восстановления надежности при предупредительном или аварийном ремонте. Полное восстановление происходит при предупредительной или аварийной замене устройств. При этом «возраст» устройств ЖАТ как бы «возвращается» в точку 0 (см. рис. 1 и 2).

С точки зрения математической формализации и общих подходов к решению задача оптимизации ПЗ и ПР относится к классу задач исследования операций. Она сводится к нахождению таких значений управляемых параметров  $U$ , при которых в условиях воздействия неуправляемых  $Z$  и фиксированных  $W$  параметров целевая функция  $C(U, Z, W)$ , определяющая удельные эксплуатационные затраты, принимает минимальное значение. В качестве управляемых параметров  $U$  выступает периодичность  $\tau$  и глубина  $\alpha$  ПЗ или ПР устройств. Фиксированными параметрами  $W$  являются стоимость ПЗ или ПР  $B$  и стоимость аварийного восстановления с учетом ущерба из-за отказов  $A$ . В качестве неуправляемых параметров  $Z$  выступают вероятность безотказной работы  $P$  и вероятность  $q$  того, что отказ ЖАТ будет устранен минимально необходимым аварийным ремонтом.

На параметры целевой функции могут быть наложены ограничения в виде равенств и неравенств. Вероятность безотказной работы (ВБР), определяющая состояние устройств ЖАТ, зависит от параметров  $\tau$  и  $\alpha$  и описывается функцией распределения  $F$ . По условиям обеспечения безопасности значение ВБР должно быть не ниже определенного допустимого значения  $P_d$ . Поскольку ПЗ и ПР направлены на предупреждение отказов ЖАТ, периодичность их должна быть меньше наработки на отказ  $T$ . Тогда в общем виде задача оптимизации ПЗ и ПР устройств ЖАТ может быть формализована следующим образом:

$$C(\tau, \alpha) = \min C(\tau, \alpha; A, B; P, q) \text{ при } P = F(\tau, \alpha), \alpha \geq 0, 0 < \tau < T, P \geq P_d. \quad (1)$$

Введем понятия  $C$  (критерий, по которому определяются оптимальные параметры ПЗ и ПР из условия минимума удельных эксплуатационных затрат) и  $P$  (критерий, по которому определяются параметры ПЗ и ПР из условия обеспечения допустимой по безопасности ВБР). На практике при проведении ПЗ и ПР возникает ряд ограничений материальных ресурсов, численности персонала, длительности проведения, погодных условий и т. п. Сроки ПЗ и ПР различных устройств ЖАТ должны быть увязаны между собой. В рамках  $C$ - и  $P$ -критериев трудно, а иногда и невозможно учесть влияние множества ограничений и факторов, ряд которых может быть задан лишь в качественной форме и не влияет на поиск оптимальных значений параметров ПЗ и ПР. Поэтому представляется целесообразным такие ограничения не формализовать, а учитывать их при принятии окончательных решений.

Если для параметров целевой функции  $Z$ ,  $W$  и функции распределения  $F$  имеются однозначные статистические характеристики, то решаемая оптимизационная задача (1) будет вероятностно-определенной. Если для  $Z$  и  $W$  имеются только данные об их возможных диапазонах, а  $F$  может быть задана серией возможных функций распределения, то задачу (1) необходимо решать в вероятностно-неопределенной постановке. Таким образом, математические принципы решения задачи оптимизации ПЗ и ПР в существенной мере зависят от степени определенности исходной информации о функции распределения вероятности безотказной работы и параметрах целевой функции. Поэтому применению формализованных методов оптимизации должен предшествовать анализ исходной информации, неопределенность которой влияет на результаты решения задачи.

## 2. Анализ факторов неопределенности

Задачей анализа является классификация и качественное описание факторов неопределенности для того, чтобы выяснить возникающие при оптимизации методические и практические трудности решения и наметить пути их преодоления, а также установить в дальнейшем степень влияния этих факторов на точность оптимизации ПЗ и ПР устройств ЖАТ. Точность оптимизации можно оценить по отклонениям целевой функции от оптимального значения под действием интересующего нас параметра в виде коэффициента  $K = C/C_0$ , где  $C$  — значение целевой функции при отклонении параметра;  $C_0$  — значение целевой функции при оптимальном значении параметра.

Используя классификацию [17], исходную информацию в задачах оптимизации ПЗ и ПР можно разделить на четыре вида: 1) детерминированную; 2) вероятностно-определенную, когда известны функции и параметры распределения случайных величин; 3) вероятностно-неопределенную, когда функции распределения случайных величин неизвестны; 4) собственно неопределенную.

С «полностью» неопределенной информацией на практике оперировать, как правило, не приходится, т. к. по любому параметру можно тем или иным способом, включая экспертные оценки специалистов, получить необходимый минимум ориентировочной информации. К детерминированной относится информация о стоимости ПЗ и ПР  $B$ , среднее значение которой однозначно определено нормативными документами. Информацию о стоимости аварийного восстановления, входящей в состав параметра  $A$ , можно отнести к условно детерминированной, поскольку она не может быть определена однозначно из-за некоторой ее зависимости от ряда случайных факторов, таких как внезапность отказов устройств ЖАТ, квалификация обслуживающего персонала и т. п. Информацию об ущербе от отказов ЖАТ в силу случайного (а иногда недостаточно определенного) характера можно отнести к вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной.

На практике большие трудности возникают с точной оценкой глубины ремонта  $\alpha$  и ее вклада в изменение показателей надежности ЖАТ, поскольку качество ПР зависит от случайных трудно учитываемых факторов, таких как состояние устройств ЖАТ, качество запасных частей и процедур ремонта, квалификация ремонтного персонала и др. В зависимости от наличия статистического материала информацию о параметре  $\alpha$  можно отнести к вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной.

Особые трудности на практике возникают при выборе функции распределения  $F$  из-за малого объема статистического материала об отказах устройств ЖАТ. Достоверно определить функцию распределения существующим методом математической статистики возможно, если количество отказов устройств будет более ста. В этом случае информация о  $F$  будет вероятностно-определенной, в противном случае — вероятностно-неопределенной, т. к. при этом можно получить несколько возможных функций распределения. Информация о параметре  $q$  в зависимости от объема статистического материала об отказах устройств ЖАТ может быть вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной.

Неопределенность исходной информации приводит к методическим и практическим трудностям решения задачи оптимизации ПЗ и ПР. При этом значительно повышается размерность решаемой задачи, поскольку появляется большое число возможных сочетаний информации о функции распределения вероятности безотказной работы и параметрах целевой функции. Например, если задано три вида функции  $F$  и каждый из параметров  $A$ ,  $\alpha$ ,  $q$  задан тремя значениями, то в этом случае имеет место 81 сочетание используемой информации, каждому из которых при решении задачи соответствует свое условно оптимальное значение параметров ПЗ и ПР.

Таким образом, неопределенность исходной информации приводит к неоднозначности решения оптимизационной задачи. Расчетным путем можно определить только зону, внутри которой каждая периодичность ПЗ и ПР при тех или иных сочетаниях исходной информации будет оптимальной. Такая зона названа академиком Л. А. Мелентьевым «зоной неопределенности оптимальных решений» [17]. Практическое следствие неопределенности исходной информации состоит в том, что неоднозначность результатов решения оптимизационной задачи приводит к неопределенности при выборе параметров ПЗ и ПР. Очевидно, что в этих условиях окончательное решение должно приниматься на эвристической основе и такой «субъективный» выбор при неопределенности исходной информации неизбежен.

Трудности и отрицательные последствия, связанные с неопределенностью исходной информации, можно преодолевать по двум направлениям: 1) уменьшением неопределенности самой информации; 2) разработкой соответствующих методов оптимизации и принятия решений в условиях неопределенности. Работы по первому направлению чрезвычайно трудоемки и дороги. Кроме того,

никакие усилия в этом направлении не позволят полностью ликвидировать неопределенность исходной информации. Поэтому весьма актуально проведение исследований по второму направлению с целью создания методов, позволяющих при неопределенности исходной информации принимать обоснованные решения по практически оптимальным параметрам ПЗ и ПР устройств ЖАТ.

### 3. Методические принципы решения задачи

Методы решения задачи оптимизации ПЗ и ПР в существенной мере зависят от степени определенности используемой исходной информации. Дадим классификацию задач оптимизации в зависимости от степени определенности информации о функции распределения вероятности безотказной работы и параметрах целевой функции. Рассмотрим три степени определенности информации о функции распределения: 1)  $F$  и ее параметры известны; 2) известен только коэффициент вариации  $V$ ; 3) известна только наработка на отказ  $T$ . Первая степень соответствует вероятностно-определенной, вторая и третья — вероятностно-неопределенной информации. Рассмотрим три степени определенности информации о параметрах  $A, \alpha, q$ : 1) детерминированная; 2) вероятностно-определенная; 3) вероятностно-неопределенная.

Типы возможных оптимизационных задач представим в виде матрицы (см. табл. 1). Тип задачи характеризуется двойным индексом: первый индекс означает номер строки; второй — номер столбца. Номера строк соответствуют степени определенности информации о функции распределения, столбцов — о параметрах целевой функции. Все задачи, кроме 11 и 12, являются вероятностно-неопределенными.

**Таблица 1.** Типы возможных оптимизационных задач

Степень определенности информации о функции $F$	Степень определенности информации о параметрах $A, a, q$		
	1. Детерминированная	2. Вероятностно-определенная	3. Вероятностно-неопределенная
Известна $F$	11	12	13
Известен $V$	21	22	23
Известна $T$	31	32	33

В настоящее время в теории надежности разработаны только методы решения задач 11 [8, 9, 10] и 31 [10]. Поскольку на практике при оптимизации ПЗ и ПР необходимая исходная информация является, как правило, вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной, наибольший интерес представляет разработка методов решения задач типов 12, 13, 22, 23, 32, 33.



Один из возможных методологических подходов к решению перечисленных задач заключается в следующем. Решение вероятностно-неопределенных задач сводится к их вероятностно-определенному эквиваленту. Для этого значения параметров целевой функции  $A$ ,  $\alpha$ ,  $q$  в случае вероятностно-определенной информации задаются математическим ожиданием, а в случае вероятностно-неопределенной информации — диапазоном значений. В последнем случае при отсутствии необходимых исходных данных параметры целевой функции оцениваются экспертным путем. Неизвестные функции распределения  $F$  выбираются эвристически. Причем для большей надежности получаемых решений необходимо задать несколько возможных функций распределения.

Для решения полученной эквивалентной вероятностно-определенной задачи можно применять известные методы, позволяющие находить оптимальные решения, соответствующие математическому ожиданию целевой функции вида

$$C(\tau/\alpha) = \min M[C(\tau; A, B, \alpha; P, q)],$$

где  $M$  — знак математического ожидания.

В результате решения такой задачи необходимо определять не только формально оптимальные параметры ПЗ и ПР для каждой предварительно принятой функции распределения  $F$ , но также зону всех возможных условно оптимальных значений исходя из диапазона изменения параметров целевой функции  $A$ ,  $\alpha$ ,  $q$  или заданного коэффициента точности оптимизации  $K$ . В условиях неопределенности исходной информации формализованные методы решения поставленной задачи являются необходимым, но лишь вспомогательным инструментом, позволяющим при использовании вычислительной техники автоматизировать чрезвычайно трудоемкий, но неизбежный процесс поиска условно оптимальных значений параметров ПЗ и ПР. Окончательный выбор решений проводят специалисты, с учетом опыта эксплуатации и с привлечением дополнительных неформализованных критериев.

Решение задачи оптимизации ПЗ и ПР с использованием предложенного методического подхода состоит из следующих основных этапов.

1. Проводится сбор исходных данных об отказах, стоимости ПЗ и ПР и аварийного восстановления, а также об ущербе от отказов устройств ЖАТ, на основании которых определяется необходимая для решения задачи исходная информация о функции распределения  $F$  и параметрах целевой функции  $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $q$ .

2. В зависимости от степени определенности исходной информации по таблице 1 выбирается тип решаемой оптимизационной задачи.

3. Для вероятностно-неопределенных задач выбирается множество функции распределения  $F$ , оценивается диапазон значений параметров целевой функции  $A$ ,  $\alpha$ ,  $q$  и задается коэффициент точности оптимизации  $K$ .

4. По  $C$ -критерию:

- в случае вероятностно-определенных задач вычисляется оптимальная периодичность ПЗ и ПР и соответствующий ей минимум целевой функции;

— в случае вероятностно-неопределенных задач для множества функций распределения  $F$  вычисляется множество оптимальных периодичностей ПЗ и ПР и соответствующее им множество минимальных значений математического ожидания целевой функции. Затем при заданном коэффициенте  $K$  определяется диапазон нижних и верхних значений периодичности и устанавливается зона условно-оптимальных значений параметров ПЗ и ПР.

#### 5. По $P$ -критерию:

— в случае вероятностно-определенных задач вычисляется допустимое по условиям безопасности значение периодичности ПЗ и ПР;

— в случае вероятностно-неопределенных задач для множества функций распределения  $F$  определяется множество допустимых по условиям безопасности значений периодичности ПЗ и ПР и из него выбирается наименьшее.

6. Полученные по  $C$ - и  $P$ -критериям значения сравниваются, и определяется зона целесообразных значений периодичности ПЗ и ПР.

7. Производится анализ полученной зоны целесообразных значений и принятие окончательного решения о практически оптимальных значениях параметров ПЗ и ПР устройств ЖАТ.

Проиллюстрируем решение оптимизационных задач на этапах 4, 5 и 6.

**Задачи 11 и 12.** По  $C$ -критерию находится оптимальное значение периодичности ПЗ (ПР)  $\tau_o$  и минимальное значение целевой функции  $C_o$ , а по  $P$ -критерию — допустимое по условиям безопасности значение периодичности ПЗ (ПР)  $\tau_d$ . Тогда целесообразные значения периодичности  $\tau_{ц}$  лежат в диапазоне: при  $\tau_o < \tau_d$   $\tau_o \leq \tau_{ц} \leq \tau_d$ , а при  $\tau_o > \tau_d$   $\tau_{ц} \leq \tau_d$ .

**Задача 13.** По  $C$ -критерию определяется  $\tau_o$  и  $C_o$ , а также при заданном коэффициенте  $K$  нижнее  $\underline{\tau}_o$  и верхнее  $\bar{\tau}_o$  значения ПЗ (ПР). По  $P$ -критерию определяется  $\tau_d$ . Тогда получаем: 1) при  $\bar{\tau}_o < \tau_d$   $\underline{\tau}_o \leq \tau_{ц} \leq \tau_o$ ; 2) при  $\underline{\tau}_o < \tau_d < \tau_o$   $\underline{\tau}_o \leq \tau_{ц} \leq \tau_d$ ; 3) при  $\underline{\tau}_o > \tau_d$   $\tau_{ц} \leq \tau_d$ .

На рисунке 1 представлен принцип решения задачи 13 для случая 1, из которого видно, что целесообразные значения периодичности при заданной точности оптимизации  $K$  находятся в диапазоне  $\underline{\tau}_o \dots \bar{\tau}_o$ , определенные по  $C$ -критерию. Таким образом, в данном случае определяющим при выборе периодичности ПЗ (ПР) является критерий минимума удельных эксплуатационных затрат.

**Задачи 21, 22, 31 и 32.** По  $C$ -критерию для множества функций распределения  $\{F^1, F^2, \dots, F^n\}$  определяется множество оптимальных значений периодичности  $\{\tau_o^1, \tau_o^2, \dots, \tau_o^n\}$  и соответствующее ему множество минимальных значений целевой функции  $\{C_o^1, C_o^2, \dots, C_o^n\}$ . Зона условно оптимальных значений периодичности определяется диапазоном значений  $\tau_o^{\min} \dots \tau_o^{\max}$ . По  $P$ -критерию определяется множество допустимых по условиям безопасности значений периодичности  $\{\tau_d^1, \tau_d^2, \dots, \tau_d^n\}$ , и из него выбирается наименьшее  $\tau_d^{\min}$ . Тогда получаем: 1) при  $\tau_o^{\max} < \tau_d^{\min}$   $\tau_o^{\max} \leq \tau_{ц} \leq \tau_d^{\max}$ ; 2) при  $\tau_o^{\min} < \tau_d^{\min} < \tau_o^{\max}$   $\tau_o^{\min} \leq \tau_{ц} \leq \tau_d^{\min}$ ;

3) при  $\tau_o^{\min} > \tau_d^{\min}$   $\tau_{ц} \leq \tau_d^{\min}$ . На рисунке 2 представлен принцип решения задач 21, 22, 31 и 32 для случая 3 при трех функциях распределения  $F$ . Из рисунка видно, что целесообразные значения периодичности находятся в диапазоне значений  $0 \dots \tau_d^{\min}$ , определенных по  $P$ -критерию. Таким образом, в данном случае определяющим при выборе периодичности является критерий безопасности ЖАТ.

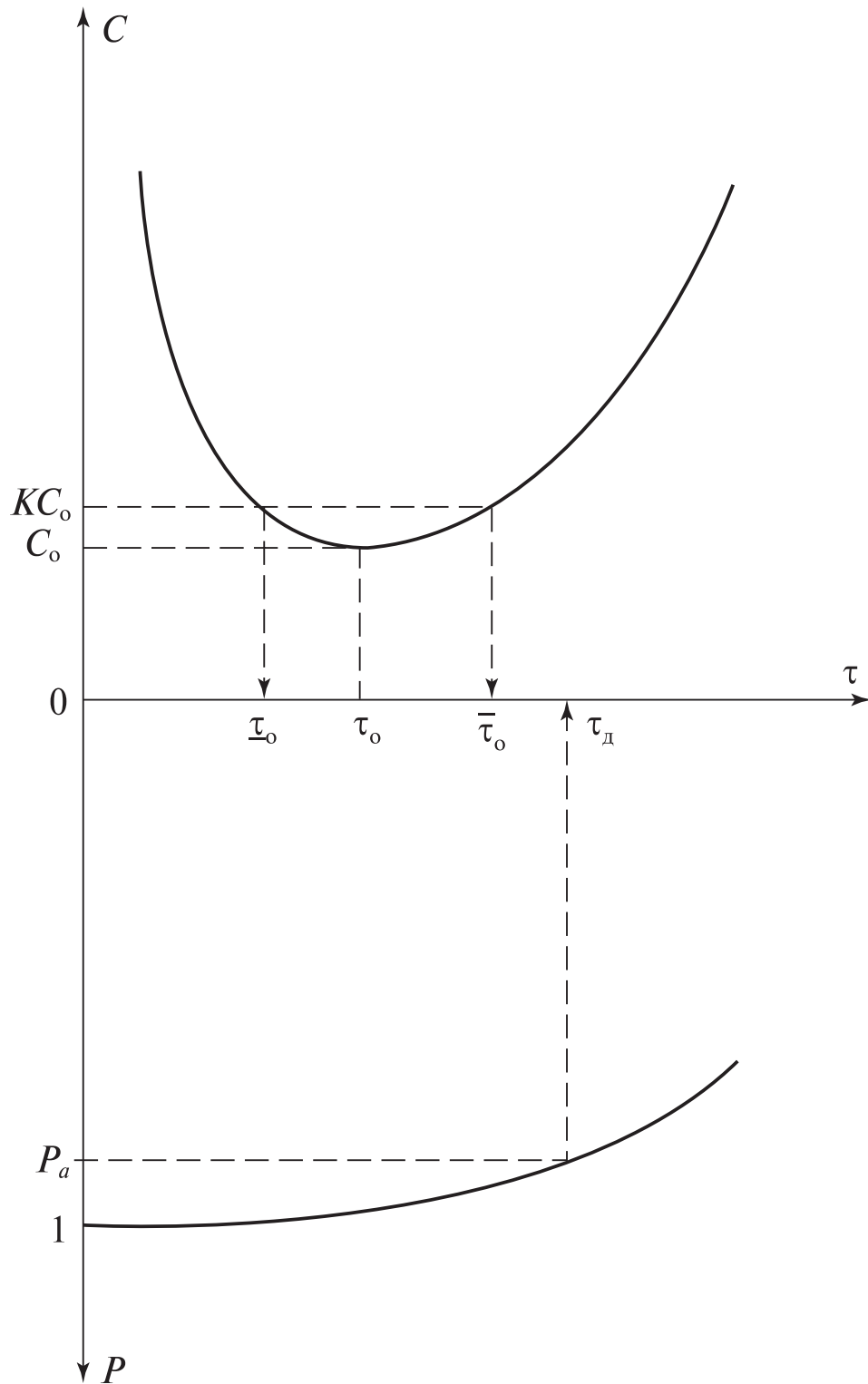
**Задачи 23 и 33.** По  $C$ -критерию для множества  $\{F^1, F^2, \dots, F^n\}$  определяется множество  $\{\tau_o^1, \tau_o^2, \dots, \tau_o^n\}$  и соответствующее ему множество  $\{C_o^1, C_o^2, \dots, C_o^n\}$ , а также при заданном  $K$  множество верхних и нижних значений периодичности  $\{\underline{\tau}_o^1, \bar{\tau}_o^1; \underline{\tau}_o^2, \bar{\tau}_o^2; \dots; \underline{\tau}_o^n, \bar{\tau}_o^n\}$ . Зона условно оптимальных значений периодичности определяется диапазоном значений  $\underline{\tau}_o^{\min}, \bar{\tau}_o^{\max}$ . По  $P$ -критерию определяется множество  $\{\tau_d^1, \tau_d^2, \dots, \tau_d^n\}$ , и из них выбирается  $\tau_d^{\min}$ . Тогда получаем: при 1)  $\bar{\tau}_o^{\max} < \tau_d^{\min}$   $\tau_o^{\min} \leq \tau_{ц} \leq \tau_d^{\max}$ ; 2) при  $\underline{\tau}_o^{\min} < \tau_d^{\min} < \bar{\tau}_o^{\min}$   $\tau_o^{\min} \leq \tau_{ц} \leq \tau_d^{\min}$ ; 3) при  $\underline{\tau}_d^{\min} > \tau_d^{\min}$   $\tau_{ц} \leq \tau_d^{\min}$ . На рисунке 3 представлен принцип решения задач 23 и 33 для случая 2 при трех функциях распределения. Из рисунка видно, что целесообразные значения периодичности находятся в диапазоне значений  $\underline{\tau}_o^{\min} \dots \tau_d^{\min}$ , определенных по  $C$ - и  $P$ -критериям. Таким образом, в данном случае можно обеспечить как экономически целесообразное при заданной точности оптимизации значение удельных эксплуатационных затрат, так и заданное по условиям обеспечения безопасности значение вероятности безотказной работы ЖАТ.

## Заключение

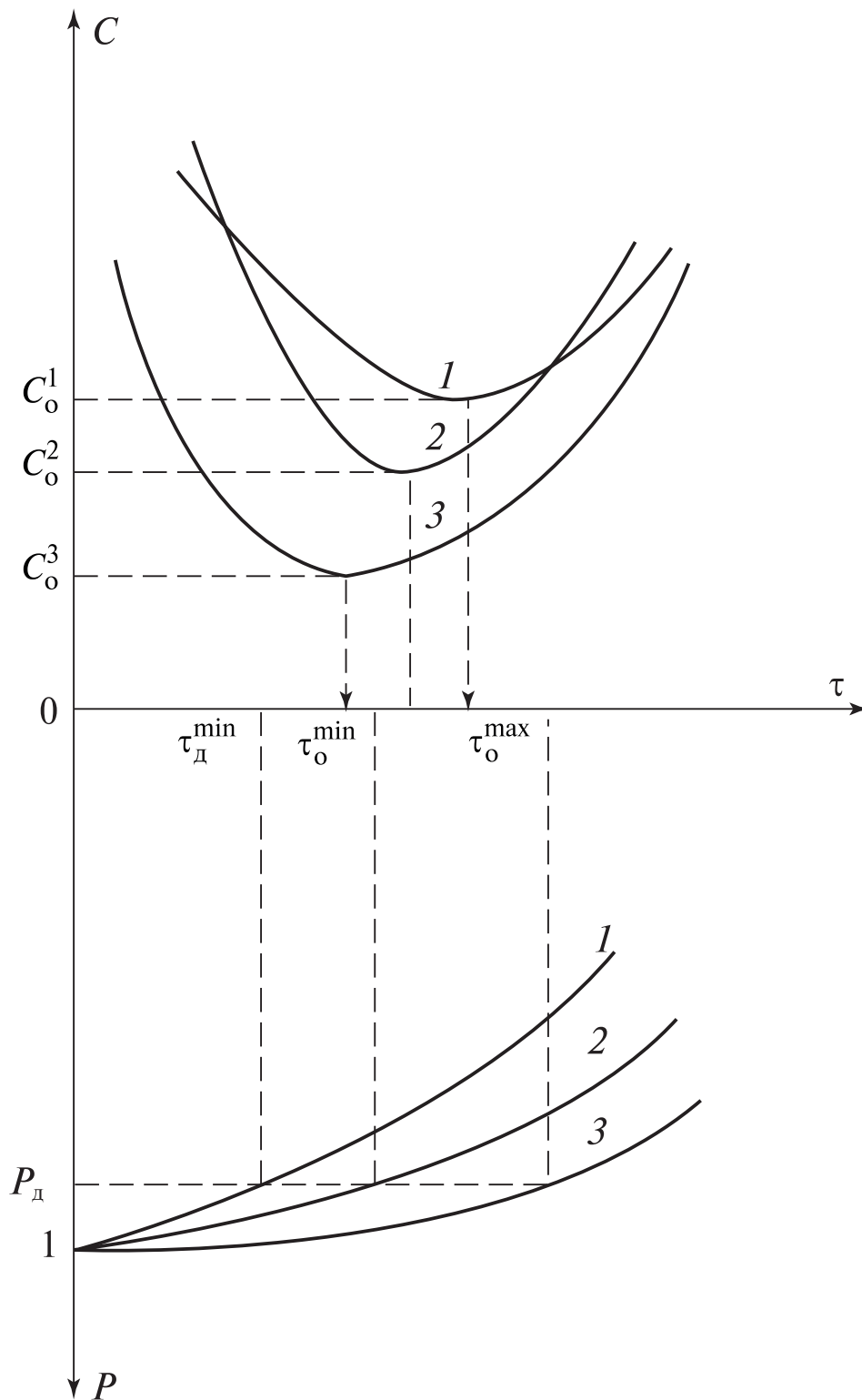
В рамках комплексного подхода основными критериями оптимизации технического содержания целесообразно считать минимум удельных эксплуатационных затрат и допустимый по условиям обеспечения безопасности уровень вероятности безотказной работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Решение задачи оптимизации технического содержания усложняется из-за неопределенности исходной информации, проявляющейся в погрешности численных значений параметров целевой функции и в недостоверном описании функций распределения показателей надежности. Неопределенность исходной информации повышает размерность задачи, приводит к неоднозначности результатов ее решения и выбора периодичности технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Учет факторов неопределенности при оптимизации технического содержания обладает рядом преимуществ. Во-первых, имеет значение наибольшее приближение формализованных методов решения к реальным условиям эксплуатации. Во-вторых — обязательность многовариантных расчетов и возможность анализа



**Рис. 3.** Принцип решения задачи 13 для случая 1



**Рис. 4.** Принцип решения задач 21, 22, 31 и 32 для случая 3

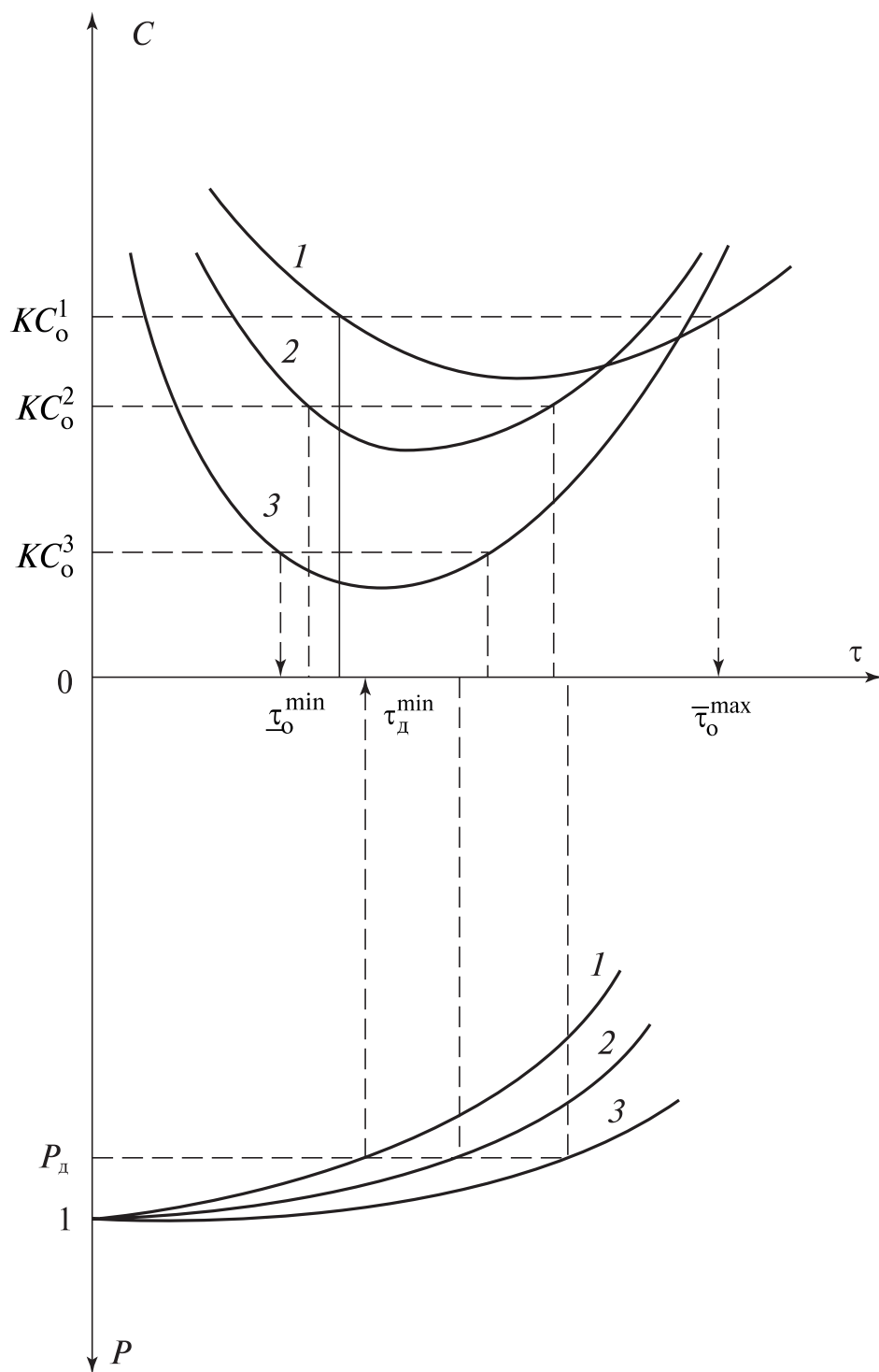


Рис. 5. Принцип решения задач 23 и 33 для случая 2

на их основе последствий принятых решений. В-третьих — свобода выбора наиболее гибких решений из числа практически равно экономичных. В-четвертых — возможность принятия более обоснованных решений и уменьшение риска перерасхода средств, обусловленного неточным знанием.

Решение вероятностно-неопределенных задач оптимизации технического содержания целесообразно свести к их вероятностно-определенному эквиваленту путем задания диапазона значений параметров целевой функции и выбора наиболее вероятных функций распределения показателей надежности.

Целью формализованного решения вероятностно-неопределенных задач технического содержания является определение зоны условно оптимальных значений периодичностей, ширина которой зависит от степени определенности исходной информации. Окончательный выбор решений должен проводиться специалистами с привлечением дополнительных неформализованных критериев.

### Библиографический список

1. ГОСТ 32192–2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2016.
2. Федотов А. Е. Методы оценки периода технического обслуживания устройств // Автоматика, телемеханика, связь. — 1981. — № 11. — С. 10–12.
3. Волков В. М., Брейда А. И., Сорокин В. М., Чиракадзе В. А. Изменение стратегии технического обслуживания — путь повышения производительности труда // Автоматика, телемеханика, связь. — 1987. — № 1. — С. 16–18.
4. Шаманов В. И. Эволюция во времени ресурса СЖАТ // Автоматика, телемеханика, связь. — 1997. — № 12. — С. 20–24.
5. Дмитренко И. Е., Ульянов В. М. Расчет оптимальных сроков технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика, связь, информатика. — 1998. — № 7. — С. 33–34.
6. Горелик А. В. Математическая модель для расчета периодичности технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика, связь, информатика. — 2002. — № 7. — С. 40–41.
7. Шаманов В. И. Методы оптимизации технического обслуживания систем автоматики // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2. — № 4. — С. 481–492.
8. Barlow R. E., Proschan F. *Mathematical Theory of Reliability*. — New York: John Wiley & Sons, 1965. — 351 p.
9. Toshio Nakagava. *Maintenance theory of reliability*. — London: Springer-Verlag, 2005. — 274 p.
10. Rausand M., Hoyland A. *System Reliability Theory*. — New York: John Wiley & Sons, 2011. — 151 p.
11. Gertsbakh I. *Reliability Theory with Applications to Preventive Maintenance*. — New York: Springer, 2012. — 112 p.
12. Каштанов В. А., Медведев А. И. Теория надежности сложных систем. — М.: Физматлит, 2010. — 608 с.
13. Володарский В. А. Оптимизация предупредительных замен и ремонтов технических устройств. — Saarbruken: Lamber, 2015. — 76 с.

14. Володарский В. А. Восстановление надежности и стратегии технического содержания устройств // Методы менеджмента качества. — 2015. — № 2. — С. 54–58.
15. Volodarsky V. A. About optimizing of lines and networks maintenance // Reliability: Theory & Applications. — 2016. — Vol 11. — No 1. — P. 21–24.
16. Volodarsky V. A. About trigonometric distributions to describe the failure of technical devices // Reliability: Theory & Applications. — 2016. — Vol 11. — No 2. — P. 11–17.
17. Мелентьев Л. А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. — М.: Высшая школа, 1983. — 319 с.

### V. A. Volodarsky

*Department of «Train Movement Systems»,  
Krasnoyarsk Institute of Rail Transport, Krasnoyarsk*

## OPTIMIZATION OF TECHNICAL MAINTENANCE OF AUTOMATION AND REMOTE CONTROL DEVICES WITH SOURCE DATA UNCERTAINTY

The source data that can actually be collected and prepared to optimize the technical maintenance of railway automation and remote control devices are, in general, largely uncertain. The problem manifests itself in an inaccurate knowledge of the numerical values of the initial parameters or their probabilistic description. Therefore, it becomes apparent that the methods of optimization calculations based on completely certain data are increasingly coming into conflict with reality.

The article discusses a methodological approach to the formulation and solution of the problem of optimizing the technical maintenance of railway automation and remote control devices under the conditions of source data uncertainty. Within an integrated approach, it is advisable to consider the minimum specific operating costs and the probability of failure-free operation of railway automation and remote control devices admissible under the safety conditions as the main criteria for optimizing the technical maintenance. The purpose of a formalized solution of probabilistic and uncertain technical maintenance problems is to determine the zone of conditionally optimal values of periodicities, the width of which depends on the degree of certainty of the source data. The final choice of solutions should be made by experts with the use of additional non-formalized criteria.

Taking into account the uncertainty factors applied when making decisions about the parameters of the technical maintenance provides several advantages. The first of them is the closest approximation of formalized solution methods to actual operating conditions. The second one is the obligatory nature of multivariate calculations and the possibility to analyze on their basis the consequences of decisions made. Third is the freedom of choice of the most flexible solutions from among the almost equally cost-effective options. And finally, the fourth advantage is the possibility of making more informed decisions and reducing the risk of overspending due to uncertainty.

railway automation and remote control, technical maintenance, optimization, periodicity, data, uncertainty

### References

1. GOST 32192–2013. Nadezhnost' v zheleznodorozhnoy tekhnike. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya [Dependability in railway technics. General concepts. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. (In Russian)



2. Fedotov A. E. (1981) Metody otsenki perioda tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv [Methods for assessing device maintenance periods]. *Avtomatika, telemekhanika, svyaz'* [Automation, remote control, communications], no. 11, pp. 10–12. (In Russian)
3. Volkov V. M., Breyda A. I., Sorokin V. M. & Chirakadze V. A. (1987) Izmeneniye strategii tekhnicheskogo obsluzhivaniya — put' povysheniya proizvoditel'nosti truda [Changing technical maintenance strategies — a way to increase labor productivity]. *Avtomatika, telemekhanika, svyaz'* [Automation, remote control, communications], No. 1, pp. 16–18. (In Russian)
4. Shamanov V. I. (1997) Evolyutsiya vo vremeni resursa SZhAT [Evolution of time resource of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika, telemekhanika, svyaz'* [Automation, remote control, communications], no. 12, pp. 20–24. (In Russian)
5. Dmitrenko I. E. & Ul'yanov V. M. (1998) Raschet optimal'nykh srokov tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Calculation of optimal terms for maintenance of railway automation and remote control devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, computer science], no. 7, pp. 33–34. (In Russian)
6. Gorelik A. V. (2002) Matematicheskaya model' dlya rascheta periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [A mathematical model for calculating the frequency of maintenance of railway automation and remote control devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, computer science], no. 7, pp. 40–41. (In Russian)
7. Shamanov V. I. (2016) Metody optimizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya sistem avtomatiki [Methods of optimizing the maintenance of automation systems]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 2, no. 4, pp. 481–492. (In Russian)
8. Barlow R. E. & Proschan F. (1965) Mathematical Theory of Reliability. New York, John Wiley & Sons, 351 p.
9. Toshio Nakagava (2005) Maintenance theory of reliability. London, Springer–Verlag, 274 p.
10. Rausand M. & Hoyland A. (2011) System Reliability Theory. New York, John Wiley & Sons, 151 p.
11. Gertsbakh I. (2012) Reliability Theory with Applications to Preventive Maintenance. New York, Springer, 112 p.
12. Kashtanov V. A. & Medvedev A. I. (2010) Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem [The reliability theory of complex systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 608 p. (In Russian)
13. Volodarsky V. A. (2015) Optimizatsiya predupreditel'nykh zamen i remontov tekhnicheskikh ustroystv [Optimization of preventive replacement and repair of technical devices]. Saarbruken, Lambert, 76 p. (In Russian)
14. Volodarsky V. A. (2015) Vosstanovleniye nadezhnosti i strategii tekhnicheskogo sodержaniya ustroystv [Restoring reliability and technical maintenance strategies for devices]. *Metody menedzhmenta kachestva* [Methods of Quality Management], no. 2, pp. 54–58. (In Russian)
15. Volodarsky V. A. (2016) About optimizing of lines and networks maintenance. *Reliability: Theory & Applications*, vol. 11, no. 1, pp. 21–24. (In Russian)
16. Volodarsky V. A. (2016) About trigonometric distributions to describe the failure of technical devices. *Reliability: Theory & Applications*, vol. 11, no. 2, pp. 11–17. (In Russian)

17. *Melent'yev L. A.* (1983) *Optimizatsiya razvitiya i upravleniya bol'shikh sistem energetiki* [Optimizing the development and management of large-scale power engineering systems]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 319 p. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым*

*Поступила в редакцию 17.09.2019, принята к публикации 03.03.2020*

**ВОЛОДАРСКИЙ Владислав Афанасьевич** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Системы обеспечения движения поездов» Красноярского института железнодорожного транспорта;  
*e-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru*

© Володарский В. А., 2020