

Володарский В.А.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ ЗАМЕН И РЕМОНТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Изложен методический подход к постановке и решению задач оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств в условиях неопределенности исходной информации.

Ключевые слова: оптимизация, ремонт, замена, информация, неопределенность.

1. Исходные положения

В настоящее время оптимизационные расчеты параметров предупредительных замен (ПЗ) и предупредительных ремонтов (ПР) технических устройств (ТУ) проводятся, как правило, в предположении о строгой достоверности и однозначности используемой исходной информации и, следовательно, о строгой однозначности получаемых решений. Недостатком такого подхода является заведомое преувеличение точности оптимизации и невозможность выявить решения, экономически близкие к однозначно определяемому формально-оптимальному решению.

При решении практических задач оптимизации ПЗ и ПР неизбежна большая или меньшая неопределенность исходной информации. 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.

Учет факторов неопределенности при принятии решений о параметрах ПЗ и ПР имеет ряд преимуществ. Во-первых, наибольшее приближение формализованных методов решения к реальным условиям эксплуатации. Во-вторых, обязательность многовариантных расчетов и возможность анализа на их основе последствий от принятия решений. В-третьих, возможность выбора наиболее гибких решений из числа практически равно экономичных. В-четвертых, возможность принятия более обоснованных решений и уменьшение риска перерасхода средств, обусловленного неточным знанием.

2. Постановка задачи

Особого внимания в условиях неопределенности требует сама постановка задачи, которая заключается: 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 определенных целей. Выделим наиболее существенные цели и соответствующие им критерии. Очевидно, что система ПЗ и ПР не может считаться совершенной, если она недостаточно экономически эффективна. Поэтому основным критерием оптимизации является минимум удельных эксплуатационных затрат на ПЗ и ПР и аварийное восстановление с учетом ущерба от возможных отказов ТУ. В отдельных случаях отказы ТУ могут приводить к нарушениям безопасности, например, безопасности движения транспортных систем. Поэтому вторым критерием при определении параметров ПЗ и ПР следует считать обеспечение безопасности при эксплуатации ТУ.

При оптимизации ПЗ и ПР невозможно рассматривать экономическую эффективность и безопасность в отрыве от надежности. Следует подчеркнуть, что применительно к ТУ надежность приобретает как бы двойную значимость. Она, с одной стороны, существенно влияет на экономическую эффективность, а 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 ТУ.

С точки зрения математической формализации и общих подходов к ее решению задача оптимизации ПЗ и ПР относится к классу задач исследования операций [1]. 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 τ и глубина α ПЗ и ПР устройств. Фиксированными параметрами W являются стоимость ПЗ и ПР B и стоимость аварийного восстановления с учетом ущерба от отказов ТУ A . В качестве неуправляемых параметров Z выступают вероятность безотказной работы (ВБР) P и вероятность q того, что отказ ТУ будет устранен минимально необходимым аварийным ремонтом.

На параметры целевой функции могут быть наложены ограничения в виде равенств и неравенств. ВБР, определяющая состояние ТУ зависит от параметров τ и α и описывается функцией распределения F . По условиям обеспечения безопасности ВБР должна быть не ниже определенного допустимого значения P_δ . Поскольку ПЗ и ПР направлены на предупреждение отказов ТУ, периодичность их должна быть меньше наработки на отказ T . Тогда в общем виде задача оптимизации ПЗ и ПР устройств может быть формализована следующим образом:

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

Введем понятия C – критерия, по которому определяются оптимальные параметры ПЗ и ПР из условия минимума удельных эксплуатационных затрат, и P – критерия, по которому определяются параметры ПЗ и ПР из условия обеспечения допустимой по безопасности ВБР. На практике при проведении ПЗ и ПР существует ряд ограничений материальных ресурсов, численности персонала, длительности проведения, погодных условий и т.п. Сроки ПЗ и ПР различных ТУ должны быть увязаны между собой. В рамках C - и P - критериев трудно, иногда невозможно учесть влияние множества ограничений и факторов, ряд из 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 формализовывать, 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.

3. 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. Точность оптимизации можно оценить по отклонениям целевой функции от оптимального значения под действием интересующего нас параметра в виде коэффициента $K = C / C_o$, где C – значение целевой функции при отклонении параметра; C_o – значение целевой функции при оптимальном значении параметра.

Используя классификацию [2], 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 и 4) собственно неопределенную.

С “полностью” неопределенной информацией на практике оперировать, как правило, не приходится, так как 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 её зависимости от ряда случайных факторов, таких, как внезапность отказов ТУ, квалификация обслуживающего персонала и т.п. Информацию об ущербе от отказов ТУ 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 α и её вклада в изменение показателей надежности ТУ, поскольку качество ПР зависит от ряда случайных, трудно

учитываемых факторов, таких как состояние ТУ, качество запасных частей и процедур ремонта, квалификация ремонтного персонала и др. В зависимости от наличия статистического материала информацию о параметре α 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 ТУ. Определить функцию распределения существующим методом математической статистики [3] можно при количестве отказов более пятидесяти. В этом случае информация о F будет вероятностно – определенной, а в противном случае – вероятностно – неопределенной, так как при этом можно получить несколько возможных функций распределения. Информация о параметре q в зависимости от объема статистического материала об отказах ТУ 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, так как 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 , α , q задан тремя значениями, то в этом случае имеет место 81 сочетание используемой информации, каждому из которых при решении задачи соответствует свое 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»[2]. 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 людьми 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 технических устройств.

4. 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 её 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 определен-

ности информации о параметрах A, α, q : 1) детерминированная; 2) вероятностно-определенная; 3) вероятностно-неопределенная.

Типы возможных оптимизационных задач представим в виде матрицы (таблица 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, 12, являются вероятностно – неопределенными.

Таблица 1

Степень определенности информации о функции F	Степень определенности информации о параметрах A, α, 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 [4,5] и 31 [6]. 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 и 33.

Один из возможных методических 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, α, q в случае условно-детерминированной и 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

$$C(\tau/a) = \min M[C(\tau; A, B, \alpha; P, q)], \text{ где } M - \text{ знак математического ожидания.}$$

В результате решения такой задачи необходимо определять не только формально – оптимальные параметры ПЗ и ПР для каждой предварительно принятой функции распределения F , а также зону всех возможных условно оптимальных значений, исходя из диапазона изменения параметров целевой функции A, α, 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 необходимый процесс поиска условно оптимальных значений параметров ПЗ и ПР. Окончательный выбор решений проводится специалистами 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 ТУ, на основании которых определяется необходимая для решения задачи исходная информация о функции распределения F и параметрах целевой функции A, B, α, 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, α, 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 вычисляются допустимые по условиям безопасности значения 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.

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

Задачи 11 и 12. По C - критерию находится оптимальное значение периодичности ПЗ (ПР) τ_o и минимальное значение целевой функции C_o , а по P – критерию допустимое по условиям безопасности значение периодичности ПЗ (ПР) τ_∂ . Тогда целесообразные значения периодичности τ_u лежат в диапазоне: при $\tau_o < \tau_\partial$ $\tau_o \leq \tau_u \leq \tau_\partial$, а при $\tau_o > \tau_\partial$ $\tau_u \leq \tau_\partial$.

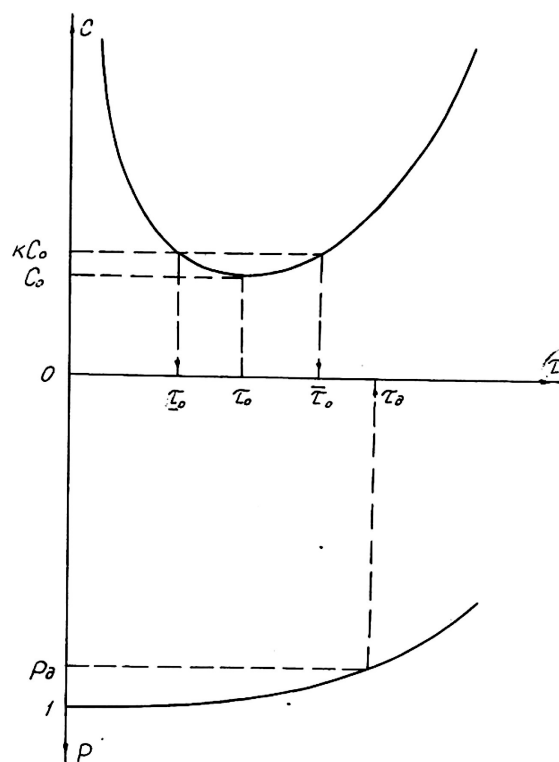


Рис. 1. Принцип решения задачи 13 для случая 1

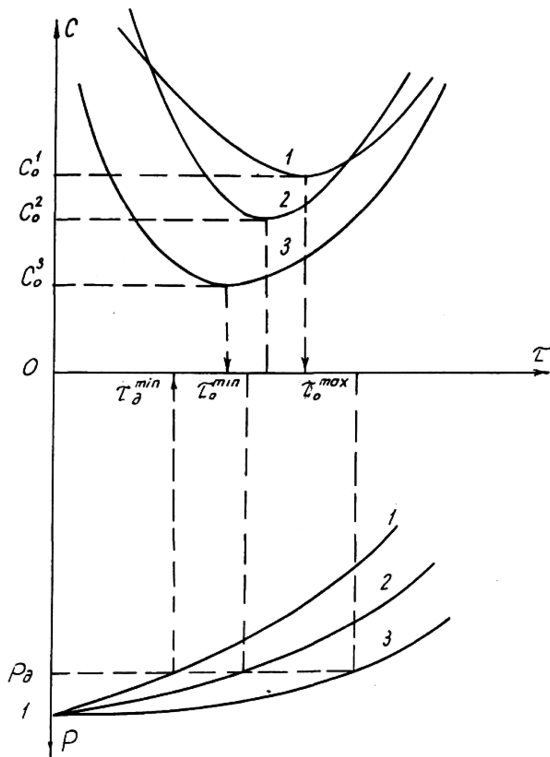


Рис. 2. Принцип решения задач 21, 22, 31 и 32 для случая 3

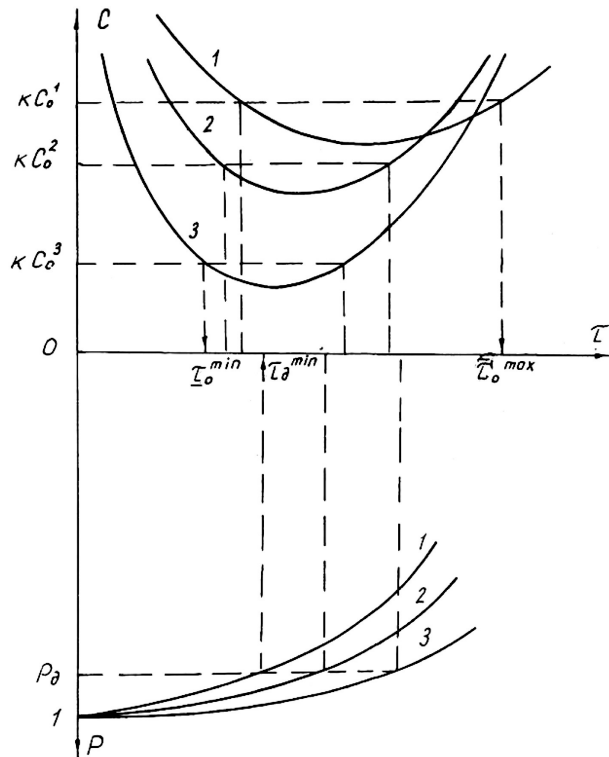


Рис. 3. Принцип решения задач 23 и 33 для случая 2

Задача 13. По C - критерию определяется τ_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 τ_Δ . Тогда получаем: 1) при $\bar{\tau}_o < \tau_\Delta \leq \tau_u \leq \tau_o$; 2) при $\tau_o < \tau_\Delta < \bar{\tau}_o \leq \tau_u \leq \tau_\Delta$; 3) при $\tau_o > \tau_\Delta \leq \tau_u \leq \tau_\Delta$.

На рис.1 представлен принцип решения задачи 13 для случая 1, из которого видно, что целесообразные значения периодичности при заданной точности оптимизации K находятся в диапазоне $\underline{\tau}_o \dots \bar{\tau}_o$, определенных 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 $\{\tau_\Delta^1, \tau_\Delta^2, \dots, \tau_\Delta^n\}$ и из него выбирается наименьшее τ_Δ^{min} . Тогда получаем: 1) при $\tau_o^{max} < \tau_\Delta^{min} \leq \tau_u \leq \tau_\Delta^{max}$; 2) при $\tau_o^{min} < \tau_\Delta^{min} < \tau_o^{max} \leq \tau_u \leq \tau_\Delta^{min}$; 3) при $\tau_o^{min} > \tau_\Delta^{min} \leq \tau_u \leq \tau_\Delta^{min}$.

На рис. 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 $0 \dots \tau_\Delta^{min}$, определенных по P - критерию. Таким образом, в данном случае определяющим при выборе периодичности является критерий безопасности ТУ.

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 $\underline{\tau}_o^{min} \dots \bar{\tau}_o^{max}$. По P – критерию определяется

множество $\{\tau_o^1, \tau_o^2, \dots, \tau_o^n\}$ и из них выбирается τ_o^{min} . Тогда получаем: при 1) $\bar{\tau}_o^{max} < \tau_o^{min} \leq \tau_o^{min} \leq \tau_{ц} \leq \bar{\tau}_o^{max}$; 2) при $\tau_o^{min} < \tau_o^{min} < \bar{\tau}_o^{max} \leq \tau_o^{min} \leq \tau_{ц} \leq \tau_o^{min}$; 3) при $\tau_o^{min} > \tau_o^{min} \tau_{ц} \leq \tau_o^{min}$.

На рис. 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 $\tau_o^{min} \tau_o^{min}$, 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 ТУ.

Заключение

В рамках комплексного подхода основными критериями оптимизации предупредительных замен и ремонтов целесообразно считать минимум удельных эксплуатационных затрат и допустимый по условиям обеспечения безопасности уровень вероятности безотказной работы технических устройств.

Решение задачи оптимизации ПЗ и ПР усложняется из-за неопределенности исходной информации, которая проявляется 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 её решения и выбора периодичности ПЗ и ПР технических устройств.

Решение вероятностно-неопределенных задач оптимизации ПЗ и ПР 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 является определение зоны условно оптимальных значений периодичностей ПЗ и ПР, ширина которой зависит от степени определенности исходной информации. Окончательный выбор решений должен проводиться специалистами с привлечением дополнительных неформализованных критериев.

Литература

1. Исследование операций / Под ред. Дж. Моудера. – М.: Мир, 1981. – 667 с.
2. Мелентьев Л.А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. – М.: Высшая школа, 1983. – 319 с.
3. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных. – М.: Мир, 1980. – 612 с.
4. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.
5. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. – М.: Советское радио, 1971. – 272 с.
6. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности систем. – М.: Советское радио, 1975. – 136 с.