

<https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-4-1211>

## Оценка изменения эффективности системы технического обслуживания и ремонта оборудования электроэнергетического сектора металлургии

Д.Ю. Сухарев ✉

АО «Выксунский металлургический завод»,  
607060, Выкса, ул. бр. Баташевых, д. 45, Российская Федерация

✉ [sukharev\\_dju@mail.ru](mailto:sukharev_dju@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы оценки различных стратегий технического обслуживания и ремонта (ТОиР) элементов основных фондов электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия с целью выбора оптимального варианта. Предложено в качестве критериев оценки эффективности рассматриваемой стратегии технического обслуживания применять три ключевых показателя: величину затрат на реализацию стратегии, коэффициент технической готовности рассматриваемого оборудования и величину максимального риска от реализации стратегии. Особое внимание уделено соответствию выбранной стратегии ТОиР текущей загрузке оборудования и требованиям к производительности. Рассмотрен пример применения предлагаемой методики к реальным элементам электроснабжения промышленного предприятия. Произведен расчет перечисленных показателей для критичного элемента энергетической инфраструктуры промышленного предприятия металлургической отрасли, отказ которого приведет к остановке процесса производства готовой продукции. Показано, что совокупная оценка перечисленных показателей позволяет принять оптимальную стратегию в заданном горизонте планирования с учетом требований или ограничений по одному из критериев.

**Ключевые слова:** металлургическая промышленность, промышленное предприятие, система технического обслуживания и ремонта, электрооборудование, повышение эффективности, вероятностная оценка, риск-ориентированный подход, снижение затрат, распределение бюджета ремонтов

**Для цитирования:** Сухарев Д.Ю. Оценка изменения эффективности системы технического обслуживания и ремонта оборудования электроэнергетического сектора металлургии. *Экономика промышленности*. 2023;15(4):431–441. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-4-1211>

## Assessment of changes in the efficiency of the system of maintenance and repair of equipment in the electric power sector of metallurgy

D.Yu. Sukharev ✉

JSC “Vyksa Metallurgical Plant”,  
45 Brat'yev Batashevych Str., Vyksa 607060, Russian Federation

✉ [sukharev\\_dju@mail.ru](mailto:sukharev_dju@mail.ru)

**Abstract.** The problems of evaluating various strategies for maintenance and repair (MRO) of elements of fixed assets of the electric power infrastructure of an industrial enterprise in order to choose the optimal option are considered. The author suggests using three key indicators as criteria for evaluating the effectiveness of the considered maintenance strategy: the amount of costs for the implementation of the strategy, the coefficient of technical readiness of the equipment in question and the amount of maximum risk from the implementation of the strategy. Particular attention is paid in the article to the compliance of the chosen MRO strategy with the current equipment load and performance requirements. The paper considers

an example of the application of the proposed methodology to real elements of the power supply of an industrial enterprise. The calculation of the listed indicators is made for a critical element of the energy infrastructure of an industrial enterprise of the metallurgical industry, the failure of which will lead to a halt in the production process of finished products.

**Keywords:** metallurgical industry, industrial enterprise, maintenance and repair system, electrical equipment, efficiency improvement, probabilistic assessment, risk-based approach, cost reduction, budget allocation of repairs

**For citation:** Sukharev D.Yu. Assessment of changes in the efficiency of the system of maintenance and repair of equipment in the electric power sector of metallurgy. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2023;15(4):431–441. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-4-1211>

## 提高冶金电力部门维护和修理效率的评估

D.Yu. 苏哈列夫 ✉

威克萨冶金厂股份公司, 607060, 俄罗斯联邦威克萨市巴塔绍夫兄弟大街45号

✉ [sukharev\\_dju@mail.ru](mailto:sukharev_dju@mail.ru)

**摘要:** 本文研究了评估工业企业电力基础设施固定资产要素的各种维护和修理 (MRO) 战略的问题, 目的是选择最佳MRO战略。建议采用三个关键指标作为评估MRO战略有效性的标准: 实施战略的成本、所考虑的设备技术可用系数和实施战略的最大风险值。还要特别注意所选MRO战略是否符合当前设备负载和生产能力的要求。举例说明了所提出的方法在工业企业实际供电要素中的应用。对冶金工业企业电力基础设施的关键要素的上述指标进行了计算, 其故障将导致产品生产过程的停止。结果表明, 通过对上述指标进行总体评估, 可以在给定的规划范围内采取最佳MRO战略, 同时考虑其中一项标准的要求或限制。

**关键词:** 冶金工业; 工业企业; 维护和修理系统; MRO战略; MRO战略评估; 电气设备; 提高效率; 概率评估; 风险导向方法; 降低成本; 维修预算分配

### Введение

Для обеспечения эффективного функционирования промышленного предприятия в условиях рыночной экономики и высокой конкуренции на рынке требуется непрерывная оптимизация его бизнес-процессов, результатом которой должно быть повышение уровня эффективности выпуска продукции, т.е. повышение эффективности использования основных фондов, в частности, основных фондов электроэнергетической инфраструктуры. Безусловно, затраты на энергоносители и затраты на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) элементов электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия входят в структуру затрат выпускаемой продукции. Эффективность использования основных фондов характеризует показатель фондоотдачи, который является отношением объема выпуска продукции к среднегодовой полной стоимости основных фондов [1]. Эффективное использование основных фондов электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия является одной из основных задач управления электрохозяйства и предприятия в целом. Решение этой задачи позволяет обеспечить снижение

себестоимости продукции и рост рентабельности производства. Ремонт основных фондов – это совокупность технико-экономических и организационных мероприятий, связанных с поддержанием и частичным или полным восстановлением потребительской стоимости основных фондов [2]. Способ организации ремонта оборудования непосредственно влияет на эффективность использования основных фондов предприятия.

Система высоковольтного электроснабжения промышленного предприятия существенно отличается от межсистемных сетей более высоких классов напряжения своей простотой: по схеме, структуре, составу применяемого оборудования и режимам работы. Между тем постоянное совершенствование и усложнение технологических процессов промышленных предприятий устанавливает все более высокие требования к организации передачи, распределения и преобразования электрической энергии [3; 4]. В основном эти требования предъявляются к показателям экономичности и надежности, которые, в свою очередь, зависят в большей степени не от применяемых технических или схемных решений, а от эффективности их эксплуатации [5; 6]. При этом

под эффективностью эксплуатации понимается минимальный уровень затрат на поддержание работоспособности оборудования в заданных показателях надежности. Поддержание работоспособности обеспечивается комплексом ремонтных воздействий на парк оборудования [6]. Сам же комплекс ремонтных воздействий определяется принятой на предприятии системой ТОиР [7–9]. При этом сам характер ремонтных воздействий, которые необходимо выполнять по обслуживанию элементов основных фондов электроэнергетической инфраструктуры, является достаточно неоднородным по составу и чередованию операций [10]. Выбор ремонтной программы (ее объема и периодичности) укрупненно сводится к выбору стратегии технического обслуживания. Стратегия технического обслуживания – это общий подход к обеспечению технического обслуживания оборудования и его поддержки, включающий в том числе и политику владельцев, клиентов [11]. Существует три основные стратегии технического обслуживания: «Ремонт в случае отказа оборудования (эксплуатация до отказа)», «Ремонт по регламенту (по наработке, объему продукции или другому признаку)», «Ремонт по состоянию». Выбор стратегии для рассматриваемой единицы оборудования или отдельного узла производится в соответствии с утвержденным на предприятии порядком, как правило, основным критерием при этом является потенциальная величина ущерба от его отказа. Таким образом, чем больше величина ущерба от наступления отказа единицы оборудования, тем, как правило, принимается более дорогая стратегия для организации его технического обслуживания<sup>1</sup>. Величина ущерба определяется как возможный ущерб от наступления отказа.

Цель статьи: предложить рациональный метод выбора стратегии технического обслуживания элементов основных фондов электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия в заданном горизонте планирования, отличающийся учетом величины затрат на реализацию стратегии, коэффициента технической готовности рассматриваемого оборудования и величины максимального риска от реализации стратегии, и продемонстрировать его практическое применение.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что комплекс ремонтных воздействий на парк оборудования системы высоковольтного электроснабжения промышленного предприятия может включать в себя большое количество

переменных факторов, изменение каждого из которых приводит к изменению эффективности его эксплуатации и надежности электроснабжения технологического оборудования. Поскольку использование единообразной системы ТОиР для различных групп оборудования системы высоковольтного электроснабжения даже одного предприятия может давать разную эффективность [12; 13], то очевидна необходимость разработки и применения научно-обоснованных подходов для ее оценки и оптимизации [14; 15].

На основании собственных исследований и анализа отечественных и зарубежных публикаций автором представлен способ сравнения и обоснования применения стратегии технического обслуживания к парку оборудования электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия. Их отличия от представленных другими авторами подходов заключаются в следующем:

1) при анализе применимости стратегии технического обслуживания оборудования учитывается не только риск ее реализации, выраженный в оценке вероятности наступления аварийного отказа, но и изменение продолжительности электроснабжения основного технологического оборудования, вызванного необходимостью выполнения планового технического обслуживания оборудования электроэнергетической инфраструктуры;

2) при анализе применимости стратегии технического обслуживания электрооборудования учитывается сценарий загрузки производственных мощностей, электроснабжение которых должно быть обеспечено в заданном расчетном периоде для выполнения плана производства.

### Методология

При проведении исследования были использованы следующие методы: анализ, обобщение, классификация, статистическая обработка данных и наблюдение. Был произведен сбор данных о проведенных ремонтах (ремонтные ведомости, записи в журналах производства работ, записи оперативных журналов), проведена оценка его стоимости, в том числе стоимости использованных товарно-материальных ценностей (ТМЦ), произведен замер (хронометраж) продолжительности ремонтных операций и подготовки рабочих мест на исследуемом оборудовании.

Объектом проведенного исследования являлась система технического обслуживания парка оборудования распределительных сетей электроснабжения промышленного предприятия металлургической отрасли. Предмет исследования:

<sup>1</sup> ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения. Введ.: 01.01.2011. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077768> (дата обращения: 15.10.2023).

влияние параметров различных стратегий ТОиР оборудования основных фондов электроэнергетической инфраструктуры предприятия металлургической отрасли на общую эффективность его эксплуатации.

Для экономического обоснования применения той или иной стратегии технического обслуживания традиционно рассматривается сочетание двух пар критериев: удельной величины эксплуатационных затрат и одного из показателей надежности [16] или сочетание величины эксплуатационных затрат и коэффициента технической готовности [17], где под коэффициентом готовности понимается вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени [18; 19]. Ни одна из двух перечисленных пар критериев не дает полной оценки рассматриваемой стратегии, поскольку не ориентирована на выполнение плана производства с обеспечением минимальной себестоимости выпускаемой продукции. Первая пара критериев не учитывает коэффициент технической готовности, а вторая – имеющийся риск отказа оборудования при реализации выбранной стратегии. Кроме того, необходимо учитывать, что в условиях рыночной экономики и неравномерной загрузки производства одна и та же стратегия в различных горизонтах планирования (и оценки) может давать различную эффективность и должна быть своевременно и корректно подобрана.

Основная гипотеза исследования состоит в том, что любое изменение в системе ТОиР оборудования системы высоковольтного электрооборудования промышленного предприятия приводит к изменению трех основных показателей: величины затрат на реализацию стратегии, коэффициента технической готовности рассматриваемого оборудования и величины максимального риска от реализации стратегии. В совокупности

три перечисленных выше показателя дают объективную и достаточную оценку эффективности произведенного изменения в системе технического обслуживания.

Полная стоимость затрат на ТОиР оборудования / технического устройства включает в себя стоимость всех воздействий, таких как планово-предупредительный ремонт (РЕМ), профилактическая операция (ПРФ), диагностика (ДГН) и аварийный ремонт (АВР), за расчетный период (РП). Вариант циклограммы перечисленных воздействий, представлен на рис. 1. При этом порядок воздействий не важен, а имеет значение только количество типов воздействий каждого вида ( $N_{РЕМ}$  – количество планово-предупредительных ремонтов,  $N_{ДГН}$  – количество диагностик,  $N_{ПРФ}$  – количество профилактик,  $N_{АВР}$  – количество аварийных ремонтов).

Количество аварийных ремонтов определяется, исходя из выбранной циклограммы обслуживания и известных значений средней наработки и ее среднеквадратичного отклонения. Вариант циклограммы технического обслуживания оборудования электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия с основными показателями, характеризующими виды обслуживания, представлен на рис. 1.

**Расчет величины затрат на реализацию стратегии ТОиР.** Стоимость ТОиР оборудования за ограниченный расчетный период рассчитывается по формуле

$$C_{ИЗМ} = C_{РЕМ} + C_{ПРФ} + C_{ДГН} + C_{АВР}, \quad (1)$$

где  $C_{РЕМ}$  – стоимость всех выполненных воздействий «Начало цикла/замена» за расчетный период, руб.;  $C_{ПРФ}$  – стоимость всех выполненных воздействий «Профилактическая операция» за расчетный период, руб.;  $C_{ДГН}$  – стоимость всех выполненных воздействий «Диагностическая операция» за расчетный период, руб.;  $C_{АВР}$  – стоимость всех выполненных воздействий «Аварийный ремонт» за расчетный период, руб.

Стоимость воздействий типа «Начало цикла/замена», «Профилактическая операция», «Ди-

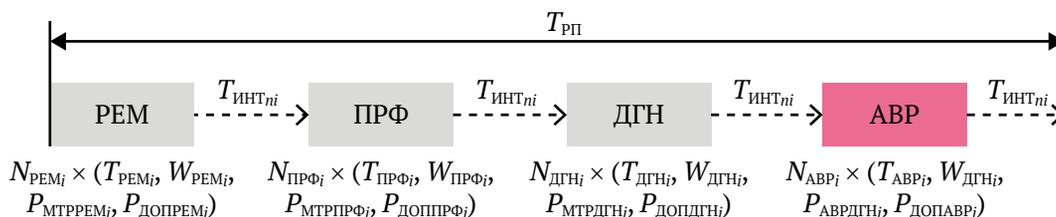


Рис. 1. Вариант циклограммы технического обслуживания электрооборудования

Fig. 1. Variant of electrical equipment maintenance cyclogram

агностическая операция» за расчетный период определяется по формуле

$$C = \sum_{i=1}^n N_i [(W_i P_{\text{человеко-час}_i}) + P_{\text{МТР}_i} + P_{\text{доп}_i}], \quad (2)$$

где  $W_i$  – трудоемкость выполнения  $i$ -го вида воздействия, человеко-час;  $P_{\text{человеко-час}_i}$  – стоимость единицы учетного времени, персонала, выполняющего воздействие  $i$ -го вида, руб.;  $N_i$  – количество ремонтных воздействий  $i$ -го вида за расчетный период определенное циклограммой ТОиР на рассматриваемое техническое устройство;  $P_{\text{МТР}_i}$  – стоимость материально-технических ресурсов, применяемых/расходуемых для выполнения  $i$ -го вида ремонтного воздействия, руб.;  $P_{\text{доп}_i}$  – прочие (дополнительные) затраты на выполнение  $i$ -го вида ремонтного воздействия, руб.

Стоимость воздействий типа «Аварийный ремонт» за расчетный период определяется по формуле (2). Расчет количества воздействий «Аварийный ремонт»  $i$ -го вида за расчетный период определяется по формуле

$$N_{\text{АВР}_i} = N_{\text{ЗМН}_i} - N_{\text{ремонт}_i}, \quad N_{\text{АВР}_i} > 0, \quad (3)$$

где  $N_{\text{АВР}_i}$  – количество воздействий «Аварийный ремонт»  $i$ -го вида за расчетный период;  $N_{\text{ЗМН}_i}$  – минимальное количество замен технического устройства для безаварийной работы в течение расчетного периода при известных показателях наработки и среднеквадратичного отклонения наработки для данного алгоритма ТОиР;  $N_{\text{ремонт}_i}$  – количество воздействий «Начало цикла/замена» за расчетный период.

Если в результате расчета  $N_{\text{АВР}_i} < 0$ , принимается  $N_{\text{АВР}_i} = 0$ .

Расчет минимально необходимого количества замен технического устройства при известной средней наработке и среднеквадратичном отклонении наработки за расчетный период [19] определяется по формуле

$$N_{\text{ЗМН}_i} = \frac{T_{\text{РП}}}{T_{\text{ср}}} + U_q \sqrt{\frac{\sigma^2 T_{\text{РП}}}{T_{\text{ср}}}}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{ЗМН}_i}$  – минимальное количество замен технического устройства для безаварийной работы в течение расчетного периода при известных показателях наработки и среднеквадратичного отклонения наработки;  $T_{\text{РП}}$  – продолжительность расчетного периода, ч;  $T_{\text{ср}}$  – средняя наработка на отказ рассматриваемого технического устройства, ч;  $U_q$  – значение нормированной функции Лапласа;  $\sigma^2$  – квадрат среднеквадратичного отклонения средней наработки рассматриваемого технического устройства.

Значения нормированной функции Лапласа принимаются из соответствующей таблицы, в общем случае используются значения в интервале от 0,95 до 0,975, в зависимости от допустимой погрешности.

**Расчет коэффициента технической готовности при реализации заданной стратегии ТОиР.** Продолжительность ТОиР оборудования за ограниченный расчетный период рассчитывается по формуле

$$T_{\text{ИЗМ}} = T_{\text{РЕМ}} + T_{\text{ПРФ}} + T_{\text{ДГН}} + T_{\text{АВР}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{ПРФ}}$  – продолжительность всех выполненных воздействий «Профилактическая операция» за расчетный период, ч;  $T_{\text{ДГН}}$  – продолжительность всех выполненных воздействий «Диагностическая операция» за расчетный период, ч;  $T_{\text{АВР}}$  – продолжительность всех выполненных воздействий «Аварийный ремонт» за расчетный период, ч.

Продолжительность выполнения  $i$ -го вида воздействия «Начало цикла/замена», «Профилактическая операция», «Диагностическая операция» «Аварийный ремонт» рассчитывается по формуле и определяется трудоемкостью количеством ремонтного персонала, выполняющего данную операцию/воздействие согласно соответствующей технологической карты:

$$T_i = \sum_{i=1}^n N_i, \quad (6)$$

где  $N$  – количество ремонтного персонала, выполняющего воздействие «Начало цикла/замена»  $i$ -го вида;  $N_i$  – количество воздействий  $i$ -го вида за расчетный период, определенное циклограммой ТОиР на рассматриваемое техническое устройство;  $W_{\text{ПРФ}_i}$  – трудоемкость выполнения  $i$ -го вида воздействия, чел. ч.

На **рис. 2** представлен образец структуры времени работы технического устройства за расчетный период. Диагностические операции могут выполняться как с остановкой оборудования, так и на работающем оборудовании, во втором случае имеет значение только стоимость выполнения воздействия.

Ожидаемый/фактический коэффициент готовности технического устройства за расчетный период определяется по формуле

$$K_r = \frac{T_{\text{ОРВ}} - T_{\text{ПР}}}{T_{\text{ОРВ}}}, \quad (7)$$

где  $K_r$  – коэффициент готовности рассматриваемого технического устройства за расчетный период;  $T_{\text{ОРВ}}$  – общее располагаемое время (продол-

жительность), ч;  $T_{ГР}$  – общая продолжительность остановок/отключений оборудования за расчетный период, ч.

**Расчет величины риска реализации стратегии ТОиР.** Величина риска ( $R$ ) имеет два измерения: тяжесть последствий от наступления события ( $X_i$ ) и вероятность наступления этого события (его математическое ожидание)  $Q(t)$  [19; 20]. Величина  $\xi$ , является случайной величиной, если она принимает конечное или счетное число различных значений. Таким образом, математическое ожидание случайной величины риска ( $M(\xi)$ ) может быть определено по формуле

$$R = M(\xi) = \sum_{i=1}^n X_i Q(t)_i. \tag{8}$$

Величина ущерба от любых нарушений электроснабжения технологического оборудования промышленного предприятия может быть определена по формуле

$$X_{нар} = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5, \tag{9}$$

где  $Y_1$  – ущерб возникающий от недовыпуска продукции, руб.;  $Y_2$  – ущерб от возникающих в результате незапланированной остановки отходов производства, руб.;  $Y_3$  – ущерб от возникновения дополнительных затрат на возобновление производства, руб.;  $Y_4$  – ущерб от повреждения оборудования, руб.;  $Y_5$  – ущерб, возникающий от дополнительных трудовых затрат на восстановление производства, руб.

При отсутствии всех перечисленных выше необходимых данных, для расчета величины ущерба может быть применена формула

$$X_{нар} = t_{мин\ восст} \cdot Y_{сорт} + Y_{доп}, \tag{10}$$

где  $t_{мин\ восст}$  – минимальная продолжительность восстановления технологического процесса;  $Y_{сорт}$  – ущерб от незапланированного простоя основного технологического оборудования для заданного сортамента выпускаемой продукции, руб.;  $Y_{доп}$  – дополнительный ущерб, выражаемый затратами на восстановление производственного цикла, руб.

Непосредственно расчет величины риска от реализации стратегии ТОиР в соответствии с планом производства рассчитывается по формуле

$$R = T_{АВР} \cdot S \cdot M \cdot Q(t)_{АВР}, \tag{11}$$

где  $Q(t)_{АВР}$  – вероятность возникновения необходимости проведения аварийного ремонта,  $R$  – величина максимального риска при реализации рассматриваемой стратегии, ч;  $S$  – производительность технологического оборудования, ед/ч;  $M$  – норма маржинальной прибыли на единицу продукции, руб/ед.,  $S \cdot M$  – стоимость аварийного простоя цеха (без учета затрат на восстановление производства).

В качестве рассматриваемого элемента электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия выбрана высоковольтная кабельная линия, служащая для электроснабжения критичного технологического электрооборудования. В случае отказа кабельной линии возникнет перерыв электроснабжения и остановка технологического процесса, что связано со значительным экономическим ущербом для предприятия.

**Выбор оптимальной стратегии с учетом рассматриваемых показателей.** Для примера сравним две достаточно изученные стратегии технического обслуживания кабельной линии, состоящей из нескольких кабелей. Место в схеме электроснабжения рассматриваемой кабельной линии представлено на рис. 3.

**Стратегия 1** – это стратегия обслуживания кабельной линии по регламенту в соответствии с графиком планово-предупредительных ремонтов, который включает в себя: ежегодное техническое обслуживание согласно технологической карте на данный вид работ, инструментальную диагностику кабелей электротехнической лабораторией, периодический инструментальный телевизионный контроль. На основании результатов тепловизионного обследования и диагностики электротехнической лабораторией в ближайший к обследованию перерыв работы технологического оборудования производится замена элемента кабельной линии с худшими (но

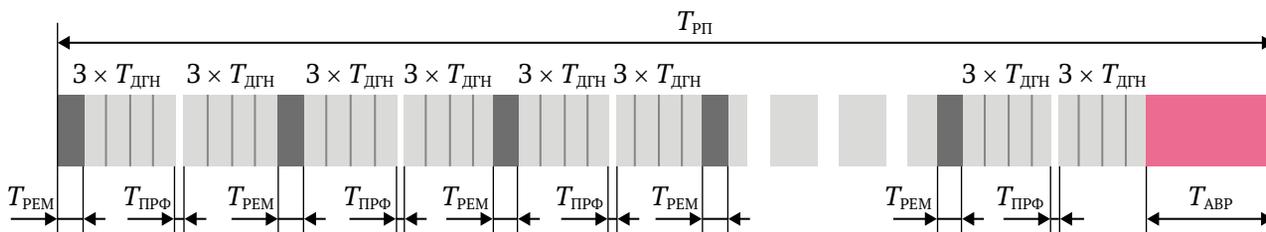


Рис. 2. Вариант структуры работы технического устройства за расчетный период

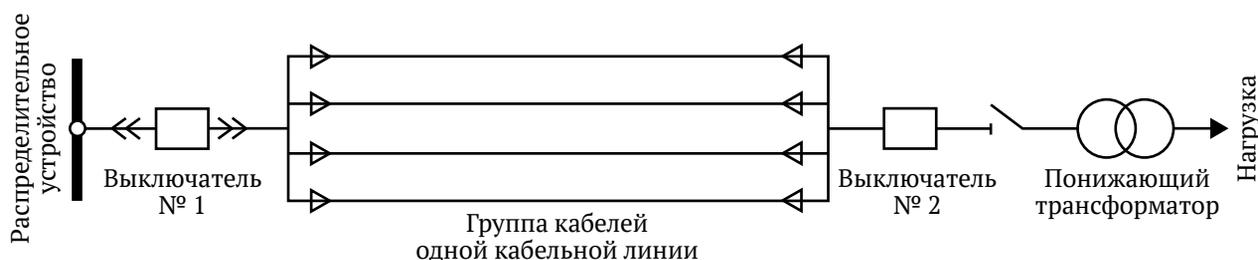
Fig. 2. Option for the structure of operation of a technical device for the billing period

не критическими) показателями. Ежемесячно осуществляется полный визуальный осмотр кабельной линии. Циклограмма стратегии 1 представлена на **рис. 4**, где  $T_{РП}$  – продолжительность расчетного периода;  $T_{ТО}$  – продолжительность планового технического обслуживания;  $T_{АВР}$  – продолжительность аварийного технического обслуживания (аварийного ремонта);  $T_{ЭТЛ}$  – продолжительность инструментальной диагностики с привлечением электротехнической лаборатории;  $T_{ДГН}$  – продолжительность инструментальной диагностики;  $T_{ВизО}$  – продолжительность визуального осмотра.

При реализации данной стратегии средняя наработка на отказ кабельной линии составляет 22 680 ч, при отклонении наработки – 1500 ч.

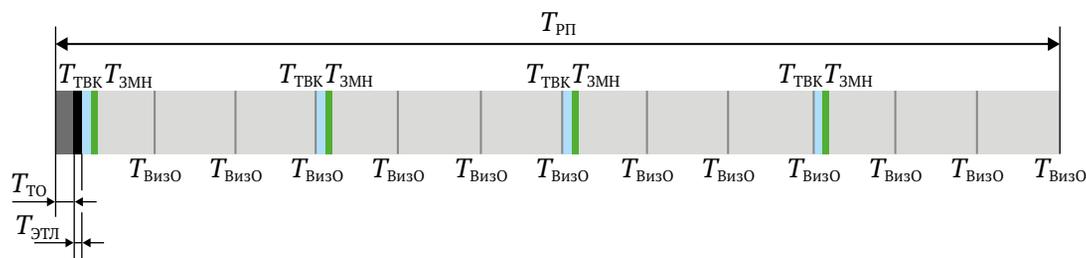
Данные о средней наработке получены на основе многолетних наблюдений за оборудованием. Общие данные о структуре затрат на реализацию стратегии представлены в **табл. 1**.

**Стратегия 2** – это стратегия обслуживания кабельной линии по регламенту в соответствии с графиком планово-предупредительных ремонтов, который включает в себя: ежегодное техническое обслуживание согласно технологической карты на данный вид работ, инструментальную диагностику кабелей электротехнической лабораторией, периодический инструментальный телевизионный контроль. Ежемесячно производится полный визуальный осмотр кабелей кабельной линии. Циклограмма стратегии 2 представлена на **рис. 5**.



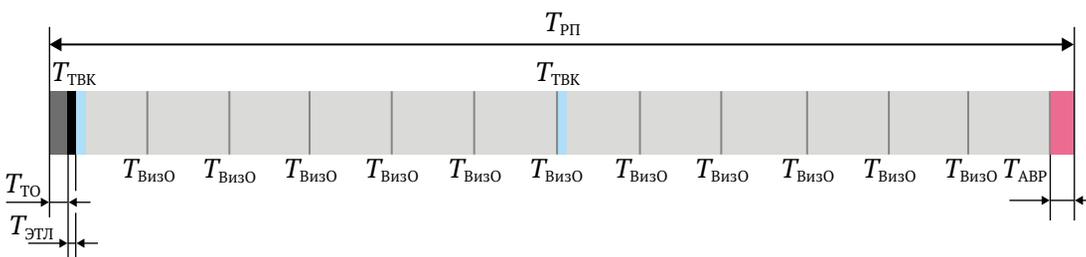
**Рис. 3. Графическое представление стратегии технического обслуживания элемента схемы высоковольтного электроснабжения № 1**

Fig. 3. Graphical representation of the maintenance strategy for high-voltage power supply circuit element No. 1



**Рис. 4. Графическое представление стратегии технического обслуживания элемента схемы высоковольтного электроснабжения № 1**

Fig. 4. Graphical representation of the maintenance strategy for high-voltage power supply circuit element No. 1



**Рис. 5. Графическое представление стратегии технического обслуживания элемента схемы высоковольтного электроснабжения № 2**

Fig. 5. Graphical representation of the maintenance strategy for high-voltage power supply circuit element No. 2

При реализации данной стратегии средняя наработка на отказ кабельной линии составляет 8100 ч, при отклонении наработки – 312 ч. Данные о средней наработке получены на основе многолетних наблюдений за оборудованием. Общие данные о структуре затрат на реализацию стратегии представлены в **табл. 2**.

Используя данные табл. 1 и 2, производим расчет сравниваемых показателей: таких, как величина затрат на реализацию стратегии, ко-

эффициент технической готовности рассматриваемого оборудования и величина максимального риска от реализации стратегии. Продолжительность расчетного периода принимаем  $T_{\text{рп}} = 8760$  ч.

Используя данные, приведенные в табл. 1, производим расчет показателей.

Продолжительность аварийных ремонтов за расчетный период  $T_{\text{АВР}} = 8$  ч; продолжительность плановых ремонтов за расчетный период

Таблица 1 / Table 1

**Структура затрат на техническое обслуживание рассматриваемой единицы оборудования согласно стратегии 1**

Cost structure for maintenance of the considered piece of equipment according to strategy 1

Выполняемая операция	Условное обозначение	Продолжительность остановки, ч	Трудоёмкость, чел.-ч	Периодичность, год	Расценка, руб.	Трудовые затраты, руб.	Затраты на материалы, руб.	Итого на операцию за период, руб.
Визуальный осмотр	$T_{\text{ВизО}}$	0	4	12	430,20	20 649,60	0	20 649,60
Техническое обслуживание	$T_{\text{ТО}}$	240	960	1	430,20	412 992,00	118 525,85	531 517,90
Диагностика ЭТЛ	$T_{\text{ЭТЛ}}$	64	206	1	690,35	142 212,10	0	142 212,10
Тепловизионная диагностика	$T_{\text{ТВК}}$	0	8	2	587,30	9396,80	0	9396,80
		0	8	2	430,20	6883,20	0	6883,2
Аварийный ремонт	$T_{\text{ЗМН}}$	8	32	1	641,55	20 529,60	62 104,05	82 633,65
Итого		312				61266,30		793293,20
Средняя наработка на отказ для заданной стратегии, ч		8100	Отклонение наработки, ч		312	Квантиль		0,95

Таблица 2 / Table 2

**Структура затрат на техническое обслуживание рассматриваемой единицы оборудования согласно стратегии 2**

Cost structure for maintenance of the considered piece of equipment according to strategy 2

Выполняемая операция	Условное обозначение	Продолжительность остановки, ч	Трудоёмкость, чел.-ч	Периодичность, год	Расценка, руб.	Трудовые затраты, руб.	Затраты на материалы, руб.	Итого на операцию за период, руб.
Визуальный осмотр	$T_{\text{ВизО}}$	0	4	12	430,20	20649,6	0	20649,60
Техническое обслуживание	$T_{\text{ТО}}$	240	960	1	430,20	412992	118525,85	531517,85
Диагностика ЭТЛ	$T_{\text{ЭТЛ}}$	64	206	1	690,35	142212,1	0	142212,10
Тепловизионная диагностика	$T_{\text{ТВК}}$	0	8	4	587,30	18793,6	0	18793,60
		0	8	4	430,20	13766,4	0	13766,40
Замена муфты	$T_{\text{ТО}}$	8	28	4+2	641,55	71853,6	62104,05	444477,90
Итого		312	328				680267,0	1171417,45
Средняя наработка на отказ для заданной стратегии, ч		28908	Отклонение наработки, ч		1500	Квантиль		0,95

$T_{\text{ПРФ}} = 240$  ч; продолжительность диагностик с остановкой за расчетный период  $T_{\text{ДГН}} = 64$  ч. Производим расчет суммарной продолжительности работы оборудования за расчетный период:

$$T_{\Sigma\text{пл}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{РЕМ}_i} \cdot T_{\text{РЕМ}_i} + \sum_{i=1}^n N_{\text{ПРФ}_i} \cdot T_{\text{ПРФ}_i} + \sum_{i=1}^n N_{\text{ДГН}_i} \cdot T_{\text{ДГН}_i} + \sum_{i=1}^n N_{\text{АВР}_i} \cdot T_{\text{АВР}_i} = 8 \cdot 8 \cdot 1 + 240 \cdot 1 + 64 \cdot 1 = 312 \text{ ч.}$$

Далее производится расчет коэффициента готовности оборудования ( $K_r$ ) и полную продолжительность его работы за расчетный период ( $T_{\Sigma\text{РАБ}}$ ):

$$K_r = \frac{T_{\text{РП}} - T_{\Sigma\text{пл}}}{T_{\text{РП}}} = \frac{8760 - 312}{8760} = 0,96;$$

$$T_{\Sigma\text{РАБ}} = T_{\text{РП}} - T_{\text{ПО}} - T_{\text{ППР}} - T_{\text{ПЛК}} - T_{\text{ПНКА}} = 8760 - 312 = 8448 \text{ ч.}$$

Затем производится расчет показателей структуры затрат на реализацию стратегии 1:

$$C_{\text{стр1}} = C_{\text{РЕМ}} + C_{\text{ПРФ}} + C_{\text{ДГН}} + C_{\text{АВР}};$$

$$C_{\text{РЕМ}} = 0;$$

$$C_{\text{ПРФ}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{ПРФ}_i} \cdot [(T_{\text{ПРФ}_i} \cdot P_{\text{чч ПРФ}_i}) + P_{\text{МТР ПРФ}_i} + P_{\text{доп ПРФ}_i}] = (960 \cdot 430,20 + 118525,25) \cdot 1 = 531517,90 \text{ руб.};$$

$$C_{\text{ДГН}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{ДГН}_i} \cdot [(W_{\text{ДГН}_i} \cdot P_{\text{чч ДГН}_i}) + P_{\text{МТР ДГН}_i} + P_{\text{доп ДГН}_i}] = (206 \cdot 690,35 + 0) \cdot 1 + (8 \cdot 587,30 + 8 \cdot 430,20 + 0) \cdot 2 = 16280 \text{ руб.};$$

$$C_{\text{АВР}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{АВР}_i} \cdot [(W_{\text{АВР}_i} \cdot P_{\text{АВР}_i}) + P_{\text{МТР АВР}_i} + P_{\text{доп АВР}_i}] = (32 \cdot 641,55 + 62104,05) \cdot 1 = 82633,65 \text{ руб.},$$

где  $N = 1$  определено следующим образом:

$$N_{\text{АВР}_i} = N_{\text{ЗМН}_i} - N_{\text{РЕМ}_i}, \quad N_{\text{АВР}_i} > 0;$$

$$N_{\text{ЗМН}_i} = \frac{T_{\text{РП}}}{T_{\text{ср}}} + U_q \sqrt{\frac{\sigma^2 T_{\text{РП}}}{T_{\text{ср}}}} = \frac{8760}{8100} + 1,65 \sqrt{\frac{312^2 \cdot 8760}{8100}} = 1,14 \rightarrow 1;$$

$$C_{\text{стр1}} = C_{\text{РЕМ}} + C_{\text{ПРФ}} + C_{\text{ДГН}} + C_{\text{АВР}} = 20649,6 + 531517,90 + 142212,1 + 16280 + 82633,65 = 793292,25 \text{ руб.}$$

Для стратегии 2 расчет производим аналогичным образом.

Выполняется расчет риска от реализации стратегии ТОиР в соответствии с планом производства в соответствии с формулой (11).

Поскольку вероятность безотказной работы восстанавливаемого элемента в рассматриваемом интервале наработки, образующего простейший поток и определяющегося по закону Пуассона, может быть определен по формулам:

$$P(t) = \frac{(\lambda \cdot t)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad n \geq 0; \quad (12)$$

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}, \quad n = 0; \quad (13)$$

где  $P(t)$  – вероятность безаварийной работы;  $\lambda$  – интенсивность потока отказов;  $t$  – продолжительность наблюдения:

$$Q(t) = 1 - P(t); \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{1}{T}, \quad (15)$$

где  $T$  – среднее время работы между отказами (наработка на отказ);

$$Q(t)_{\text{АВР стр1}} = 1 - e^{-\lambda \cdot t} = 1 - 2,718^{-1/8100 \cdot 8760} = 0,66.$$

Таким образом, на расчетном периоде 8760 ч, при заданных значениях наработки на отказ вероятность отказа для каждой из двух рассматриваемых стратегий:

$$Q(t)_{\text{АВР стр1}} = 0,66;$$

$$Q(t)_{\text{АВР стр2}} = 0,26.$$

Риски при реализации каждой из двух представленных стратегий:  $S \cdot M = 800000$  руб. для рассматриваемого производственного подразделения:

$$R_1 = 8 \cdot 800000 \cdot 0,66 = 12,285 \text{ млн руб.};$$

$$R_2 = 8 \cdot 800000 \cdot 0,26 = 317655000 \text{ руб.} = 1,7 \text{ млн руб.}$$

Результаты расчетов представлены графически на **рис. 6**.

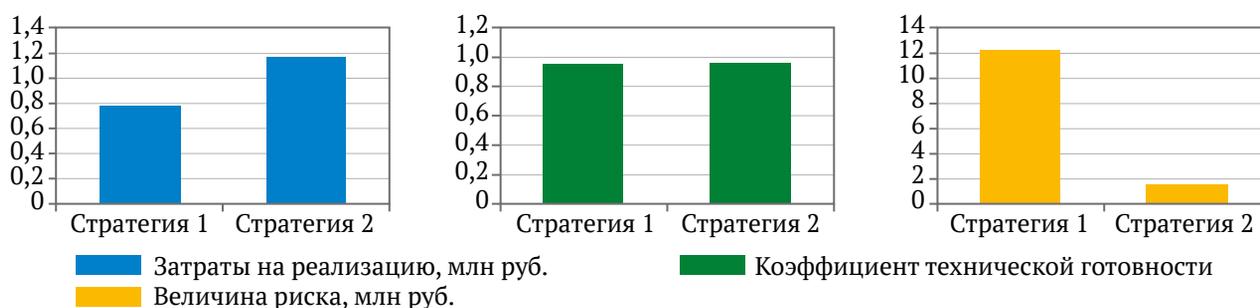


Рис. 6. Графическое представление сравниваемых показателей двух рассматриваемых стратегий технического обслуживания

Fig. 6. Graphical representation of the compared indicators of the two considered maintenance strategies

### Заключение

В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты:

1. Сформулированы ключевые показатели стратегии технического обслуживания элементов основных фондов электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия. Предложен оригинальный подход, который в отличие от подходов, предложенных другими авторами [12; 14; 15], дает оценку затрат на техническое обслуживание для заданной производительности, что в условиях неравномерной загрузки производства является серьезным преимуществом и позволяет оценить необходимые затраты, при известных показателях требуемой надежности, производительности или ограничении бюджета ремонтов.

2. Произведен расчет показателей для критичного элемента электроснабжения промышленного предприятия, показано, что их совокупная оценка позволяет принять оптимальную стратегию в заданном горизонте планирования с учетом требований или ограничений по одному из критериев.

3. Показана необходимость учета требуемой величины коэффициента готовности основного технологического оборудования для выполнения текущего плана производства с учетом влияния на него как плановых, так и аварийных ремонтов

оборудования электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия.

На основании перечисленных выше результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальная стратегия технического обслуживания парка оборудования электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия может быть выбрана только с учетом совокупной оценки трех показателей: величины затрат на ее реализацию, коэффициента технической готовности рассматриваемого оборудования (в частном случае, производительности для каждого вида сортамента) и величины максимального риска от ее реализации.

2. Каждая стратегия технического обслуживания может иметь разную эффективность при различных сценариях производственной программы. Максимальная эффективность эксплуатации оборудования электроэнергетической инфраструктуры может быть достигнута только при взаимном согласовании перечисленных выше показателей.

3. Коэффициент технической готовности оборудования электроэнергетической инфраструктуры влияет на общий коэффициент технической готовности технологического оборудования промышленного предприятия и должен быть учтен при планировании ремонтов.

### Список литературы / Reference

1. Горфинкель В.Я. (ред.). *Экономика предприятия (фирмы)*. М.: Проспект; 2011. 640 с.
2. Волков О.И. (ред.). *Экономика предприятия*. М.: Инфра-М; 2001. 520 с.
3. Гамазин С.И., Кудрин Б.И., Цырук С.А. (ред.). *Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий*. М.: ИД МЭИ; 2010. 744 с.
4. Чернев М.Ю. Анализ надежности схем электроснабжения на примере Астраханского газопере-
- рабатывающего завода. *Промышленная энергетика*. 2017;(8):16–22.
5. Chernev M.Yu. Analysis of the reliability of power supply schemes using the example of the Astrakhan gas processing plant. *Promyshlennaya energetika*. 2017;(8):16–22. (In Russ.)
6. Brown R.E., Frimpong G., Willis H.L. Failure rate modeling using equipment inspection data. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004;19(2):782–787. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.825824>

6. Секретарев Ю.А., Горшунов А.А., Меняйкин Д.А. Моделирование технического состояния оборудования систем электроснабжения монопотребителей с учетом схемной надежности. *Вести высших учебных заведений Черноземья*. 2022;18(3(69)):3–14. [https://doi.org/10.53015/18159958\\_2022\\_18\\_3\\_3](https://doi.org/10.53015/18159958_2022_18_3_3)  
Sekretarev Yu.A., Gorshunov A.A., Menyakin D.A. Modeling of the technical condition of an equipment of power supply systems of mono consumers taking into account circuit reliability. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya = News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*. 2022;18(3(69)):3–14. (In Russ.). [https://doi.org/10.53015/18159958\\_2022\\_18\\_3\\_3](https://doi.org/10.53015/18159958_2022_18_3_3)
7. Кац Б.А. Из истории создания системы планово-предупредительного ремонта. *Главный механик*. 2013;(11):19–26.  
Kats B.A. Forgotten jubilee. From the history of creation of the system of scheduled preventive repair. *Glavnyi mekhanik*. 2013;(11):19–26. (In Russ.)
8. Аксенов А.П., Фалько С.Г. *Экономика эксплуатации парка оборудования*. М.: КноРус; 2011. 224 с.
9. Hashemi-Dezaki H., Askarian-Abyaneh H., Haerikhiavi H. Reliability optimization of electrical distribution systems using internal loops to minimize energy not-supplied (ENS). *Journal of Applied Research and Technology*. 2015;13(3):416–424. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2015.07.008>
10. Bouziane B., Elmaouhab A., et al. Smart grid reliability using reliable block diagram case study: Adrar's isolated network of Algeria. *Proceed. 2019 Inter. conf. on power generation systems and renewable energy technologies (PGSRET). Istanbul, Turkey 26–27 August 2019*; 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2019.8882711>
11. Napoleone L., Roda I., Macchi M. The implications of condition monitoring on asset-related decision-making in the Italian power distribution sector. *IFAC PapersOnLine*. 2016;49(28):108– <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.019>
12. Антоненко И.Н. Риск-ориентированный подход к управлению производственными активами в энергетике. *Энергоэксперт*. 2020;(1(23)):26–33.  
Antonenko I.N. Risk-oriented approach to the management of production assets in the energy sector. *Energoekspert*. 2020;(1(23)):26–33. (In Russ.)
13. Левин В.М., Гужов Н.П., Боярова Д.А. К вопросу об эффективности управления ремонтами электрооборудования нефтедобычи со стратегией по техническому состоянию. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022;24(1):39–51. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51>  
Levin V.M., Guzhov N.P., Boyarova D.A. On the issue of effectiveness of the oil production electrical equipment repairs management with a strategy for technical condition. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):39–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51>
14. Ndawula M.B., Djokic S.Z., Hernando-Gil I. Reliability enhancement in power networks under uncertainty from distributed energy resources. *Energies*. 2019;2(3):531. <https://doi.org/10.3390/en12030531>
15. Володарский В.А. Принципы выбора стратегий обслуживания технических устройств. Современные технологии. *Системный анализ. Моделирование*. 2012;(2(34)):2110–114.  
Volodarsky V.A. Principles for choosing maintenance strategies for technical devices. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2012;(2(34)):2110–114. (In Russ.)
16. Журавлев А.Г., Чендырев М.А., Глебов И.А., Черепанов В.А. Методический подход к разработке регламентов технического обслуживания и ремонта дробильного оборудования горнодобывающих предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3-1):543–556. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-543-556>  
Zhuravlev A.G., Chendyrev M.A., Glebov I.A., Cherepanov V.A. Methodical approach to the development of regulations of maintenance and repair of crushing equipment of mining companies. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(3-1):543–556. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-543-556>
17. Чиченев Н.А. *Надежность технологических машин*. М.: Изд. Дом НИТУ «МИСиС»; 2019. 264 с.
18. Жиркин Ю.В. *Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин*. М.: Теплотехник; 2009. 330 с.
19. Картвелишвили В.М., Свиридова О.А. *Риск-менеджмент. Методы оценки риска*. М.: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова»; 2017. 120 с.

#### Информация об авторе

Дмитрий Юрьевич Сухарев – старший мастер участка по эксплуатации сетей и подстанций, цех по электроснабжению, АО «Выксунский металлургический завод», 607060, Выкса, ул. бр. Баташевых, д. 45, Российская Федерация; e-mail: sukharev\_dju@mail.ru

#### Information about author

Dmitriy Yu. Sukharev – Head Master, Site for the Operation of Networks and Substations, Electrical Supply Manufactory, JSC “Vyksa Metallurgical Plant”, 45 Brat'yev Batashevyykh Str., Vyksa 607060, Russian Federation; e-mail: sukharev\_dju@mail.ru

Поступила в редакцию 02.10.2023; поступила после доработки 05.12.2023; принята к публикации 06.12.2023

Received 02.10.2023; Revised 05.12.2023; Accepted 06.12.2023