

<https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-2-190-200>

Оценка резервов повышения эффективности систем технического обслуживания и ремонта высоковольтного электрооборудования промышленных предприятий

Д.Ю. Сухарев ✉

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

✉ sukharev_dju@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы выбора стратегии технического обслуживания оборудования системы электроснабжения промышленного предприятия с учетом риска его отказа и проблемы распределения объема ремонтной программы в целях снижения затрат на техническое обслуживание и, соответственно, себестоимости выпускаемой продукции. Предложена методика оценки величины риска для технологического процесса промышленного предприятия металлургической отрасли, учитывающая схему электроснабжения электроприемника. Особое внимание уделено учету влияния системы электроснабжения промышленного предприятия на работу конечных электроприемников, непосредственно участвующих в технологическом процессе. Рассмотрен пример использования предлагаемой методики в реальной системе электроснабжения с имеющимися статистическими данными об ее отказах. В статье сформулирован подход к оценке риска от отказа элементов сети электроснабжения промышленного предприятия с учетом оперативной схемы электроснабжения, а также показана недостаточность оценки риска от нарушений электроснабжения только от отказа элементов цепи, через которые непосредственно осуществляется передача электрической мощности к рассматриваемому электроприемнику.

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

Для цитирования: Сухарев Д.Ю. Оценка резервов повышения эффективности систем технического обслуживания и ремонта высоковольтного электрооборудования промышленных предприятий. *Экономика промышленности*. 2023;16(2):190–200. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-2-190-200>

Assessment of efficiency improvement reserves of maintenance and repair systems of high-voltage electrical equipment of industrial enterprises

D.Yu. Sukharev ✉

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

✉ sukharev_dju@mail.ru

Abstract. The problems of choosing a strategy for the maintenance of the equipment of the power supply system of an industrial enterprise, taking into account the risk its failure and the problem of distributing the volume of the repair program in order to reduce maintenance costs and, accordingly, the cost of production, are considered. A method for assessing the magnitude of risk for the technological process of an industrial enterprise of the metallurgical industry, taking into account the power supply scheme of the electric receiver, is proposed. Special attention is paid to taking into account the influence of the power supply system of

an industrial enterprise on the operation of final electrical receivers directly involved in the technological process. An example of using the proposed technique in a real power supply system with available statistical data on its failures is considered. The article formulates an approach to assessing the risk of failure of elements of the power supply network of an industrial enterprise, taking into account the operational scheme of power supply, and also shows the insufficiency of assessing the risk of power supply failures only from the failure of circuit elements through which electric power is directly transmitted to the electric receiver in question.

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

For citation: Sukharev D.Yu. Assessment of efficiency improvement reserves of maintenance and repair systems of high-voltage electrical equipment of industrial enterprises. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2023;16(2):190–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2023-2-190-200>

提高工业企业高压电气设备技术维护与检修系统效率的潜能评估

D.Yu. 苏哈列夫 ✉

维克萨冶金厂股份公司,
607060, 俄罗斯联邦下诺夫哥罗德州维克萨市巴塔舍夫兄弟大街45号

✉ sukharev_dju@mail.ru

摘要: 本文研究了为工业企业供电系统的设备选择技术维护策略的问题, 考虑到设备故障的风险和维修预算分配问题, 以期减少维修费用, 从而降低生产的主要成本。文章提出了冶金行业企业工艺过程的风险评估方法, 同时考虑到用电设备的供电方案。特别关注了工业企业的供电系统对直接参与工艺过程的最终用电设备的影响。本文研究了在具有可用故障统计数据的实际电源系统中使用所提出的方法的示例。在文章中, 结合供电工序, 制定了工业企业供电网络元件故障风险评估方法, 同时指出仅从电路元件的故障角度来评估供电系统故障风险的不足之处, 通过这些电路元件将电力直接传输到相关用电设备。

关键词: 冶金行业, 工业企业, 电气设备, 维护和维修系统, 提高效率, 概率评估, 基于风险的方法, 降低成本, 维修预算分配

Введение

Для обеспечения функционирования современного промышленного предприятия требуется большое количество различных энергоресурсов, при этом компоненты энергетической инфраструктуры предприятия, в частности сети электроснабжения, сами являются ресурсом, который расходуется и который необходимо поддерживать в работоспособном состоянии. Для обеспечения работоспособности оборудования с 30-х годов XX в. существует и применяется система планово-предупредительных ремонтов [1], предполагающая единый подход к его техническому обслуживанию – это техническое обслуживание по регламенту (техническое обслуживание оборудования производится через фиксированные межремонтные интервалы) [2]. Смысл подхода заключается в предотвращении возможных отказов оборудования за счет выполнения всех возможных предупредительных работ. Примене-

ние такого подхода предполагает высокий уровень затрат на техническое обслуживание и недостаточного использования его ресурса.

Для оборудования распределительных систем электроснабжения промышленного предприятия данный подход является наиболее затратным, но при этом он позволяет добиться высоких показателей надежности. В отличие от технического обслуживания основного технологического оборудования промышленного предприятия, работающего с неравномерной загрузкой, такой подход, в целом, является рациональным с учетом равномерности загрузки, цикличности и предсказуемости режимов работы (и износа) оборудования систем электроснабжения.

За последние десятилетия подходы к техническому обслуживанию технологического оборудования промышленных предприятий значительно изменились. Эти изменения были

обусловлены модернизацией производств, увеличением разнообразия применяемого в процессе производства оборудования и появлением большого количества (в том числе автоматизированных) средств технической диагностики, а главное – необходимостью снижения затрат на техническое обслуживание в целях снижения себестоимости выпускаемой продукции.

Сущность изменений сводится к внедрению предложенного западными экономистами в 70–80-е годы XX в. риск-ориентированного подхода (РОП) в организации ремонта, который получил название *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) [3; 4]. Данный подход основан на том, что объем ремонтной программы для каждой единицы оборудования или узла определяется с учетом тяжести последствий его отказа. Процесс включает в себя проведение анализа критичности отказа и на основании этого анализа – выбор ремонтной программы или ее приоритизации в случае ограниченности ресурсов. «*Ремонтная программа, сформированная по принципам РОП, обеспечивает минимальный уровень отрицательных последствий от отказов оборудования*» [5; 6].

Большое количество промышленных предприятий добилось положительного эффекта в результате внедрения РОП в техническом обслуживании основного технологического оборудования при том, что оборудование энергетической инфраструктуры, в частности, оборудование систем электроснабжения продолжает в силу описанных выше причин обслуживаться по регламенту [7]. И только в последние годы некоторые принципы РОП начинают переноситься на оборудование систем электроснабжения промышленных предприятий, которые являются важным звеном в обеспечении работы технологического оборудования.

Системы электроснабжения промышленного и электросетевого предприятия имеют значительные отличия по структуре, составу и неоднородности оборудования, но главное их отличие состоит в критериях оценки эффективности их работы. Так, для электросетевого предприятия долгосрочным стратегическим приоритетом является обеспечение надежности электроснабжения потребителей, оцениваемое общепринятыми в мировой практике индексами надежности SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) – индекс средней длительности прерываний в работе системы, SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) – индекс средней частоты прерываний в работе системы и др. [8]. Для систем электроснабжения промышленного предприятия долгосрочным стратегическим приоритетом является бесперебойность технологических процессов и мини-

мальный уровень потерь из-за сбойных ситуаций в системе электроснабжения [9].

В связи с непрерывными модернизациями существующих и пуском новых производственных мощностей, а также усложнением технологических процессов, основное технологическое оборудование промышленных предприятий, участвующее в производственном процессе, становится все более чувствительным к провалам напряжения, вызванным, как правило, короткими замыканиями в сети электроснабжения. Провалы, в свою очередь, приводят к сбоям или остановкам технологических процессов и выходам из строя технологического оборудования, что подтверждается большим количеством экспериментальных данных [10–12]. Таким образом, в системе электроснабжения промышленного предприятия сбойными ситуациями являются не только перерывы электроснабжения технологического оборудования, но и кратковременные (продолжительностью менее 0,1 с) нарушения электроснабжения. Все перечисленные события относятся к рисковому и для адекватного применения РОП в оперативном планировании ремонта оборудования распределительных сетей промышленного предприятия могут и должны быть спрогнозированы.

Таким образом, получение корректного прогноза наступления аварийного события для оперативного планирования объема ремонтов является актуальной задачей. Существующие методики РОП к ремонтам оборудования систем электроснабжения с учетом и без учета индекса технического состояния [13], а также варианты подходов и методик, представленные в публикациях [13–16] не дают полной оценки риска наступления аварийного события.

На основании собственных исследований и анализа отечественных и зарубежных публикаций автором представлены рекомендации по оценке риска от отказа элементов схемы сети электроснабжения промышленного предприятия. Их отличия от представленных другими авторами подходов заключаются в следующем:

- 1) критерием оценки надежности электроснабжения является не частота и длительность перерывов электроснабжения технологического оборудования, а частота нарушений технологического процесса, вызванного сбойными ситуациями в системе электроснабжения;

- 2) схема электроснабжения (порядок соединения элементов) технологического оборудования рассматривается не с точки зрения вариантов резервирования, а с точки зрения отрицательного влияния ее элементов на нормальную работу технологического оборудования.

Материалы и методы

Объектом исследования является схема электроснабжения технологического электроприемника промышленного предприятия металлургической отрасли, обеспечивающего электроснабжение трубоэлектросварочного цеха, работающего с высокой долей автоматизации. Рассматриваемая схема электроснабжения включает в себя сборные шины 110 кВ питающей подстанции, воздушные линии 110 кВ, оборудование главной понизительной подстанции 110/6 кВ, кабельные линии 6 кВ, оборудование распределительной подстанции 6 кВ, оборудование цеховой комплектной трансформаторной подстанции, кабельные линии 0,4 кВ, питающие рассматриваемый технологический электроприемник. Схема электроснабжения представлена на **рис. 1**.

Для оценки надежности электроснабжения применен Пуассоновский поток и поскольку все его элементы могут рассматриваться как восстанавливаемые, величина потока отказов может быть определена по формуле

$$\omega(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{dn(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $\omega(t)$ – поток заказов; $n(t_1), n(t_2)$ – количество отказов, зафиксированных по истечении времени t_1 и t_2 .

Вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта в рассматриваемом интервале наработки, образующего простейший поток и определяющего по закону Пуассона [17; 18], рассчитывается по формулам:

$$P(t) = \frac{[\lambda t]^n}{n!} \cdot e^{-\lambda t}, \text{ при } n \geq 0; \quad (2)$$

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \text{ при } n = 0; \quad (3)$$

где $P(t)$ – вероятность возникновения в течение времени, аварийных событий (отказов).

Показатели надежности электрооборудования, в предположении простейшего потока отказов, могут быть определены по формулам:

$$\lambda = \omega = \frac{1}{T}, \quad (4)$$

где λ – интенсивность потока отказов;

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\omega}, \quad (5)$$

где T – среднее время работы между отказами (средняя наработка на отказ).

Величина вероятности отказа определяется по формуле

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (6)$$

В соответствии с рассматриваемой схемой электроснабжения представленной на рис. 1, элементы которой соединены последовательно, расчет и анализ показателей надежности производится путем преобразования исходной схемы в последовательно соединенные эквивалентные блоки, результатом преобразования которых является состояние, при котором между источником электроснабжения и электроприемником находится один эквивалентный блок, имеющий показатели надежности полной схемы электроснабжения.

Вероятность отказа группы последовательно соединенных элементов (**рис. 2**) определяется по формуле

$$Q(t)_{\text{пэ}} = 1 - \prod_{i=1}^n P(t)_{\text{пэ}}, \quad (7)$$

где $Q(t)_{\text{пэ}}$ – результирующее значение-вероятности отказа последовательно соединенных элементов, через которые осуществляется передача

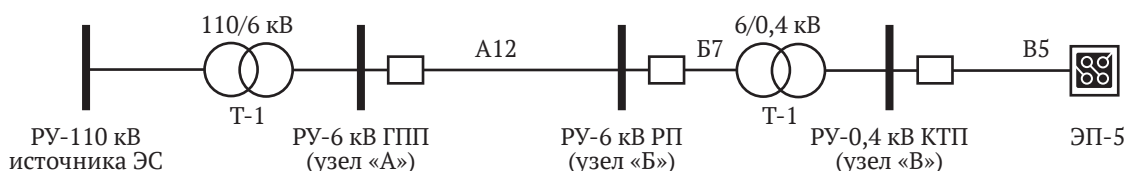


Рис. 1. Участок схемы электроснабжения технологического электроприемника

Fig. 1. Section of the power supply circuit of a technological power receiver

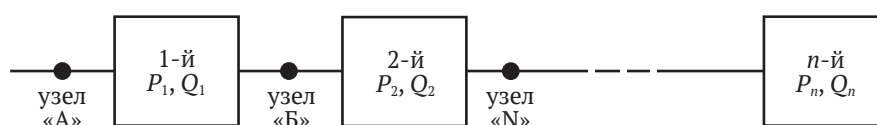


Рис. 2. Блок-схема последовательно соединенных элементов

Fig. 2. Block diagram of series-connected elements

электрической мощности к рассматриваемому электроприемнику; $P(t)_{\text{ппэ}}$ – результирующая вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов, через которые осуществляется передача электрической мощности к рассматриваемому электроприемнику.

С учетом описанных выше особенностей схемы электроснабжения и основного приоритета системы электроснабжения промышленного предприятия для объективного расчета показателей надежности должны быть учтены как показатели надежности последовательных элементов (источника до рассматриваемого электроприемника), так и показатели надежности параллельных ветвей схемы, не осуществляющих передачу электроэнергии к рассматриваемому электроприемнику.

Таким образом, вероятность отказа одного элемента из группы элементов, присоединенных к узлам электроустановок, через которые осуществляется передача электрической мощности к рассматриваемому электроприемнику, но которые сами не принимают участия в его электроснабжении (рис. 3), определяется по формуле

$$Q(t)_{\text{ппэ}} = 1 - \prod_{i=1}^n P(t)_{\text{ппэ}}, \quad (8)$$

где $Q(t)_{\text{ппэ}}$ – вероятность отказа одного из элементов, присоединенных к узлам электроустановок, через которые осуществляется передача электрической мощности к рассматриваемому электроприемнику, но которые не принимают участия в его электроснабжении; $P(t)_{\text{ппэ}}$ – вероятность безотказной работы одного из элементов, присоединенных к узлам электроустановок, через которые осуществляется передача.

Результирующее значение вероятности наступления основного рисковог события – нарушения электроснабжения технологического оборудования определяется по формуле

$$Q(t)_{\text{рез}} = 1 - \left(\prod_{i=1}^n P(t)_{\text{ппэ}} \times \prod_{i=1}^n P(t)_{\text{ппэ}} \right). \quad (9)$$

Риск-ориентированный подход предполагает проведение оценки величины риска от отказа каждого узла или единицы оборудования. Применяя наиболее общий подход, риск может быть рассмотрен как величина, определяемая двумя факторами: вероятностью наступления события $Q(t)$ и тяжестью последствий от его наступления (X_i) [19; 20]. Случайная величина (ξ) – дискретная случайная величина, если она принимает конечное или счетное число различных значений. Таким образом, математическое ожидание случайной величины риска ($M(\xi)$) определяется по формуле

$$M(\xi) = \sum_{i=1}^n X_i Q(t)_i. \quad (10)$$

В качестве меры риска (R) принимается математическое ожидание соответствующего ущерба, его величина может быть определена по формуле

$$R = M(\xi). \quad (11)$$

Величина ущерба от любых нарушений электроснабжения технологического оборудования промышленного предприятия ($X_{\text{нар}}$) может быть определена по формуле

$$X_{\text{нар}} = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5, \quad (12)$$

где Y_1 – ущерб от недовыпуска продукции; Y_2 – ущерб от возникающих в результате незапланированной остановки отходов производства;

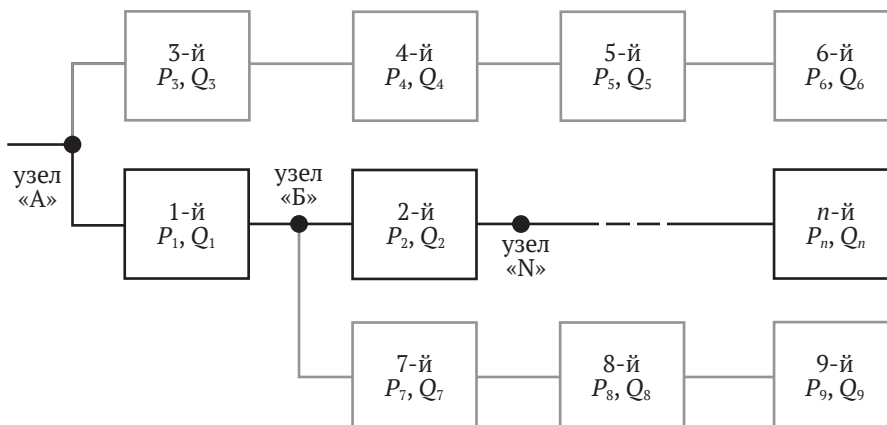


Рис. 3. Блок-схема последовательно соединенных элементов в составе системы

Fig. 3. Block diagram of series-connected elements in the system

Y_3 – ущерб на возобновление производства; Y_4 – ущерб от поврежденного оборудования; Y_5 – ущерб, возникающий от дополнительных трудовых затрат.

Учитываемые в формуле (12) величины являются случайными и зависят от фазы производственного цикла оборудования, во время которой произошло нарушение электроснабжения и незапланированная остановка. При отсутствии необходимых данных, для расчета может быть применена формула

$$X_{нар} = t_{мин\ восст} \cdot Y_{сорт} + Y_{доп}, \quad (13)$$

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

Для учета негативного влияния остальной системы электроснабжения на фрагмент схемы,

представленной на рис. 1, при расчете величины риска, должны быть учтены вероятности отказа всех элементов, присоединенных к узлам электроснабжения, через которые осуществляется транзит электрической мощности. Таким образом, для адекватного расчета, вероятности возникновения рисков события требуется рассмотрение всей системы электроснабжения, а не только питающего рассматриваемый электроприемник участок схемы. Данный участок схемы в составе системы электроснабжения представлен на рис. 4.

В период с 2009 по 2019 г. производилась фиксация отказов элементов представленной на рис. 4 схемы. Учитывались только отказы, сопровождающиеся короткими замыканиями и отключением поврежденного элемента средствами автоматики, которые приводили к нарушениям электроснабжения основного технологического оборудования. Полученные данные, вносились во второй столбец табл. 1.

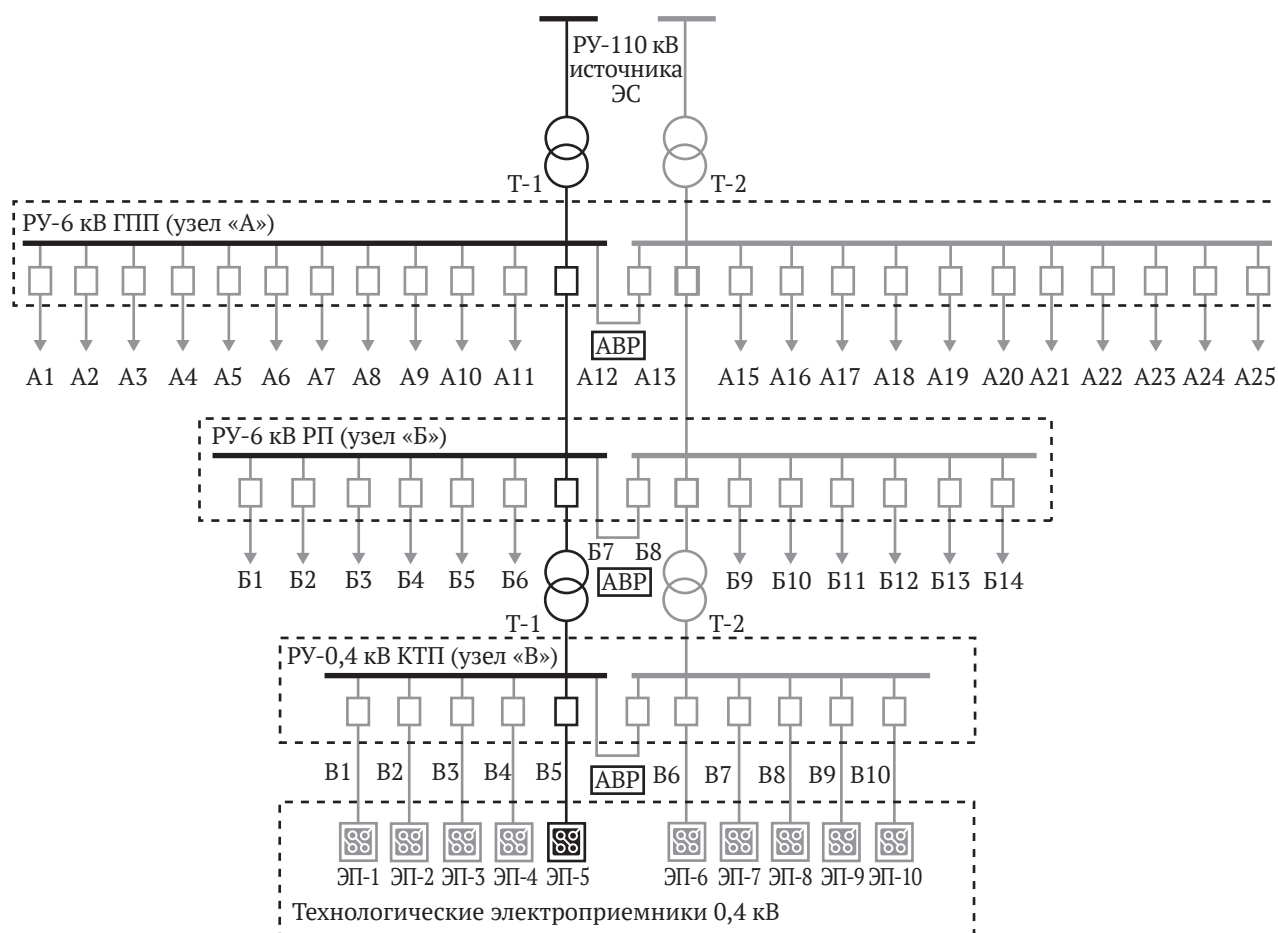


Рис. 4. Рассматриваемая схема электроснабжения

Fig. 4. Considered power supply scheme

В соответствии с формулой (1), для линии А1 производится расчет потока отказов:

$$\omega(t) = \frac{dn(t)}{dt} = \frac{2}{10} = 0,2 \text{ год}^{-1}.$$

Для остальных линий, поток отказов определяется аналогичным образом, полученные значения внесены в третий столбец табл. 1.

В соответствии с формулой (3) для линии А1 определяется вероятность отказа в период 1/12 года:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,2 \cdot \left(\frac{1}{12}\right)} = 0,98.$$

Таким же образом определяется вероятность отказа в каждый последующий месяц работы, а также через 24 и 36 мес. соответственно, ана-

логичный расчет вероятности безотказной работы производится для каждой кабельной линии, представленной на схеме. Результаты вычисления занесены в табл. 1.

Вероятность отказа группы последовательно соединенных элементов, осуществляющих электроснабжение рассматриваемого электроприемника, определяется по формуле

$$Q(t)_{\text{ПЭ}} = 1 - \prod_{i=1}^n P(t)_{\text{ПЭ}i} = 1 - \left(P(t)_{\text{А12}\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{\text{Б7}\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{\text{В5}\left(\frac{1}{12}\right)} \right) = 1 - 0,98 \cdot 0,98 \cdot 1 = 0,04.$$

Таблица 1 / Table 1

Показатели надежности кабельных линий участка системы электроснабжения
Reliability indicators of cable lines of the power supply system section

Линия	Количество отказов	λ , 1/год	P (1/12)	P (2/12)	P (3/12)	P (4/12)	P (5/12)	P (6/12)	P (7/12)	P (8/12)	P (9/12)	P (10/12)	P (11/12)	P (12/12)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A1	2	0,2	0,98	0,97	0,95	0,94	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82
A2	2	0,2	0,98	0,97	0,95	0,94	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82
A3	1	0,1	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
A4	2	0,2	0,98	0,97	0,95	0,94	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82
A5	1	0,1	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
A6	1	0,1	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
A7	2	0,2	0,98	0,97	0,95	0,94	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82
A8	4	0,4	0,97	0,94	0,90	0,88	0,85	0,82	0,79	0,77	0,74	0,72	0,69	0,67
A9	14	2,6	0,89	0,79	0,70	0,63	0,56	0,50	0,44	0,39	0,35	0,31	0,28	0,25
A10	0	0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
A11	1	0,1	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
A12	2	0,0	0,98	0,97	0,95	0,94	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82
B1	0	0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B2	0	0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B3	1	0,1	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
B4	0	0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B5	4	0,4	0,97	0,94	0,90	0,88	0,85	0,82	0,79	0,77	0,74	0,72	0,69	0,67
B6	0	0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B7	2	0,1	0,98	0,97	0,95	0,94	0,92	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,82
B1	0	0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B2	0	0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B3	0	0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B4	0	0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B5	0	0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Вероятность отказа одного элемента из группы элементов, присоединенных к узлам электроустановок, через которые осуществляется передача электрической мощности к рассматриваемому электроприемнику, но которые сами не принимают участия в его электроснабжении определяется по формуле

$$Q(t)_{\text{ППЭ}} = 1 - \prod_{i=1}^n P(t)_{\text{ППЭ}i} =$$

$$= 1 - \left(P(t)_{A12\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{A2\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{A3\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{A4\left(\frac{1}{12}\right)} \times \right.$$

$$\times P(t)_{A5\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{A6\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{A7\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{A8\left(\frac{1}{12}\right)} \times$$

$$\times P(t)_{A9\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{A10\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{A11\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{B1\left(\frac{1}{12}\right)} \times$$

$$\times P(t)_{B2\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{B3\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{B4\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{B5\left(\frac{1}{12}\right)} \times$$

$$\times P(t)_{B6\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{B1\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{B2\left(\frac{1}{12}\right)} \cdot P(t)_{B3\left(\frac{1}{12}\right)} \times$$

$$\left. \times P(t)_{B4\left(\frac{1}{12}\right)} \right) =$$

$$= 1 - (0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,99 \times$$

$$\times 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,97 \cdot 0,89 \cdot 1 \cdot 0,99 \cdot 1 \times$$

$$\times 1 \cdot 0,99 \cdot 1 \cdot 0,97 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) = 0,28.$$

Результирующая вероятность наступления рисковог о события определяется по формуле

$$Q(t)_{\text{рез}} = 1 - \left(\prod_{i=1}^n P(t)_{\text{ПЭ}} \times \prod_{i=1}^n P(t)_{\text{ППЭ}} \right) =$$

$$= 1 - (0,96 \cdot 0,72) = 0,31.$$

Полученные значения для $Q(t)_{\text{ПЭ}}$, $Q(t)_{\text{ППЭ}}$ и $Q(t)_{\text{рез}}$ представлены в виде графиков на рис. 5.

В соответствии с формулой (13) и на основании [21] (принимая $t_{\text{мин восст}} = 0,75$ ч; $Y_{\text{сорт}} = 1,2$ млн руб./ч; $Y_{\text{доп}} = 0$), произведем расчет ущерба от незапланированного простоя технологического оборудования промышленного предприятия металлургической отрасли:

$$X_{\text{нар}} = t_{\text{мин восст}} \cdot Y_{\text{сорт}} + Y_{\text{доп}} =$$

$$= 1,2 \cdot 0,75 + 0 = 0,94 \text{ млн руб.}$$

Величина риска в соответствии с формулами (10) и (11), учетом ранее полученных значений $Q(t)$ составит для периода в 12 мес.:

$$R_{\text{ПЭ}12} = M(\xi) = X_{\text{нар}} \cdot Q(t)_{\text{ПЭ}} =$$

$$= 0,94 \cdot 0,04 = 0,31 \text{ млн руб.};$$

$$R_{\text{ППЭ}12} = M(\xi) = X_{\text{нар}} \cdot Q(t)_{\text{ППЭ}} =$$

$$= 0,94 \cdot 0,97 = 0,91 \text{ млн руб.};$$

$$R_{\text{рез}12} = R_{\text{ПЭ}12} + R_{\text{ППЭ}12} =$$

$$= 0,31 + 0,91 = 1,2 \text{ млн руб.}$$

Рассчитанные аналогичным образом значения для периодов 24 и 36 мес. представлены в виде графика на рис. 6.

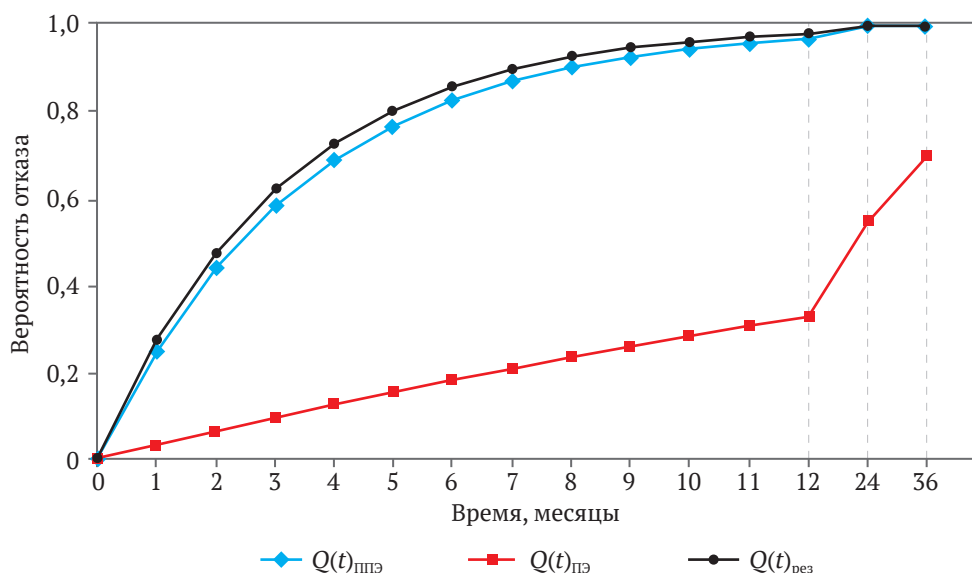


Рис. 5. Графики вероятностей отказов элементов питающей цепи рассматриваемого электроприемника

Fig. 5. Graphs of the failure probabilities of the elements of the supply circuit of the considered power receiver

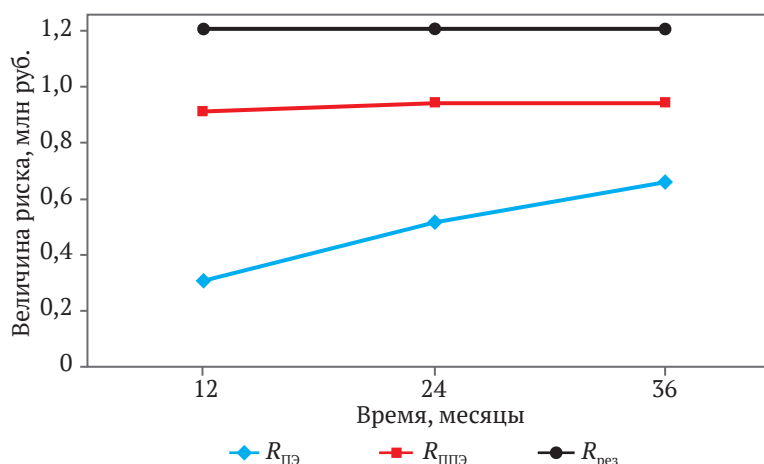


Рис. 6. Графики величины риска от нарушений электроснабжения основного технологического оборудования

Fig. 6. Graphs of the magnitude of the risk from power failures of the main technological equipment

Заключение

Перенос принципов РОП при планировании технического обслуживания электрооборудования системы электроснабжения промышленных предприятий металлургической отрасли в текущей экономической ситуации неизбежен. Производители металлургической продукции для сохранения конкурентоспособности на рынке постоянно ищут пути снижения себестоимости выпускаемой продукции. Один из основных путей снижения себестоимости – это снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт оборудования основных производственных фондов, в частности, компонентов системы электроснабжения промышленного предприятия. Непрерывно развивающиеся и повсеместно применяющиеся на механическом, гидравлическом, пневматическом и другом металлургическом оборудовании принципы РОП для достижения положительного эффекта их применения, требуют адаптации для электрооборудования и поиска научно-обоснованного подхода к их применению.

В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты:

1. Сформулирован подход к оценке риска от отказа элементов сети электроснабжения промышленного предприятия с учетом оперативной схемы электроснабжения рассматриваемого электроприемника. Данный подход учитывает включенные в сеть смежные элементы систем в качестве источника возможных кратковременных нарушений электроснабжения – провалов напряжения, возникновение которых в сети ведет к нарушениям технологического процесса.

2. Показано, что важным критерием оценки надежности электроснабжения технологического оборудования промышленного предприятия, наряду с частотой и длительностью возможных перерывов электроснабжения технологического оборудования является частота нарушений технологического процесса, вызванного сбойными ситуациями в системе электроснабжения, которые вызывают провалы-напряжения в сети.

3. Отражена недостаточность оценки риска от нарушений электроснабжения только от отказа элементов цепи, через которые непосредственно осуществляется передача электрической мощности к рассматриваемому электроприемнику. В приведенном примере показан источник (смежные элементы системы электроснабжения промышленного предприятия) и величина дополнительно возникающих рисков возникновения сбойных ситуаций от нарушений электроснабжения в результате отказов элементов системы электроснабжения промышленного предприятия. Из графика приведенного на рис. 5 видно, что риск нарушения электроснабжения, возникающий в результате отказов смежных элементов сети, в разы выше риска от отказов элементов, непосредственно участвующих в электроснабжении электроприемника, и этот риск, в обязательном порядке должен быть учтен при планировании ремонта.

На основании полученных результатов исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Для адекватной оценки величины риска от отказа оборудования системы электроснабжения промышленного предприятия необходимо

учитывать сбойные ситуации, возникающие не только в питающей сети, но и в частях системы электроснабжения предприятия, связанных с конечным рассматриваемым электроприемником, которые способны оказать отрицательное влияние на его работу и вызвать сбой (разладку) технологического процесса.

2. При распределении ремонтной программы парка оборудования системы электроснабжения промышленного предприятия с учетом принципов риск-ориентированного подхода необходимо в приоритетном порядке производить техническое обслуживание не только оборудования, отказ которого приведет к перерыву электроснабжения основного технологического оборудования, но и оборудования системы электроснабжения, отказ которого может иметь отрицательное влияние на технологический процесс.

3. При ранжировании оборудования системы электроснабжения промышленного предприятия по его критичности для технологического процесса необходимо учитывать как показатели надежности последовательных элементов (источника до рассматриваемого электроприемника), так и показатели надежности параллельных ветвей схемы, не осуществляющих передачу электроэнергии к электроприемнику.

Таким образом, полученный подход к оценке рисков от отказа элементов системы электроснабжения промышленного предприятия может быть использован для приоритизации и оптимизации объемов ремонтной программы, а также адекватного применения РОП в оперативном планировании ремонта оборудования распределительных сетей с учетом реального влияния его отказа на технологический процесс выпуска продукции в целях снижения ее себестоимости.

Список литературы / References

- 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.)
- Синягин Н.Н., Афанасьев Н.А., Новиков С.А. Система планово-предупредительного ремонта электрооборудования промышленных предприятий. М.: Энергия; 1984. 446 с.
- Nowlan F.S., Heap H.F. *Reliability-centered maintenance*. San Francisco: Dolby Access Press; 1978. 466 p.
- Moubray J. *Reliability-centered maintenance*. NY: Industrial Press Inc.; 2001. 426 p.
- Jiang Y., Zhang Zh., Voorhis T.V., McCalley J.D. Risk-based maintenance optimization for transmission equipment. *Proceed. of the XV Inter. conf. "On Systems Engineering"*; 2002. 8 p.
- 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>
- 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>
- Петросенко А.В., Тульский В.Н. Применение многокритериального подхода и комбинированного анализа при формировании производственной программы электросетевых организаций. *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2019;(1(52)):22–29.
Petrosenko V.A., Tulsy V.N. Application of the multicriteria approach and combinatorial analysis when seating production program of electric grid organizations. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric power. Transmission and Distribution*. 2019;(1(52)):22–29. (In Russ.)
- Левин В.М., Гужов Н.П., Черненко Н.А., Яхья А.А. Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов. *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2020;(2-3(79)):139–155. <https://doi.org/110.17212/1814-1196-2020-2-3-139-155>
- Levin V.M., Guzhov N.P., Chernenko N.A., Yahya A.A. Methodology for managing equipment repairs in oilfield electrical networks. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;(2-3(79)):139–155. (In Russ.). <https://doi.org/110.17212/1814-1196-2020-2-3-139-155>
- Анчарова Т.В., Бодрухина С.С. *Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий*. [Под ред. С.И. Гамазина и др.]. М.: Изд. дом МЭИ; 2010. 745 с.
- Одинцов К.Э., Петушков М.Ю., Иванов Е.Ф., Бочкарев А.А., Лыгин М.М. Способы повышения надежности ответственных электроприводов заводских электростанций металлургических производств. *Электротехнические системы и комплексы*. 2021;(4(53)):28–32. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-28-32)
- Odintsov K.E., Petushkov M.Yu., Ivanov E.F., Bockarev A.A., Lygin M.M. Improving the critical electric drives reliability at industrial power plants of metallurgical enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы = Electrotechnical Systems and Com-*

- plexes. 2021;(4(53)):28–32. (In Russ.). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-28-32)
12. Ивкин О.Н., Киреева Э.А., Пупин В.М., Маркитанов Д.В. Применение динамических компенсаторов искажений напряжения с целью обеспечения надежности электроснабжения потребителей. *Главный энергетик*. 2006;(1):28–38. Ivkin O.N., Kireeva E.A., Pupin V.M., Markitanov D.V. The use of dynamic voltage distortion compensators to ensure the reliability of power supply to consumers. *Glavnyi energetik*. 2006;(1):28–38. (In Russ.)
 13. Чернев М.Ю. Анализ надежности схем электроснабжения на примере Астраханского газоперерабатывающего завода. *Промышленная энергетика*. 2017;(8):16–22. Chernev M.Yu. Analysis of the reliability of power supply schemes on the example of the Astrakhan gas processing plant. *Promyshlennaya energetika = Industrial Energy*. 2017;(8):16–22. (In Russ.)
 14. 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.)
 15. Лесных В.В., Тимофеева Т.Б., Петров В.С. Проблемы оценки экономического ущерба, вызванного перерывами в электроснабжении. *Экономика региона*. 2017;13(3):847–858. <https://doi.org/10.17059/2017-3-17> Lesnykh V.V., Timofeeva T.B., Petrov V.S. Problems of assessing the economic damage caused by power outages. *Economy of Region*. 2017;13(3):847–858. (In Russ.). <https://doi.org/10.17059/2017-3-17>
 16. Секретарев Ю.А., Левин В.М. Риск-ориентированные модели управления ремонтом оборудования в системах электроснабжения с монопотребителем. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2021;14(1):17–32. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0295> Sekretarev Yu.A., Levin V.M. Risk-based models of equipment repair management in power supply systems with a mono consumer. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021;14(1):17–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0295>
 17. 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/10.30724/1988-9903-2022-24-1-39-51> 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. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):39–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51>
 18. Жиркин Ю.В. *Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин*. М.: Теплотехник; 2009. 330 с.
 19. Чиченев Н.А. *Надежность технологических машин*. М.: Изд. дом НИТУ «МИСиС»; 2019. 264 с.
 20. Basson Aladon M., *RCM3: Risk-based reliability centered maintenance*. NY: Industrial Press, Inc.; 2018. 500 p.
 21. Khan F., Haddara M. Risk-based maintenance (RBM): A quantitative approach for maintenance / inspection scheduling and planning. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003;16(6):561–573. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2003.08.011>
 22. Сушко А.Е. Практические аспекты внедрения систем вибрационной диагностики в условиях современных промышленных производств. *Вибрация машин: измерение снижение защита*. 2007;(4):24–30. Sushko A.E. Practical aspects of the implementation of vibration diagnostics systems in modern industrial production. *Vibratsiya mashin: izmerenie snizhenie zashchita = Machine vibration: measurement, reduction, protection*. 2007;(4):24–30. (In Russ.)

Информация об авторе

Дмитрий Юрьевич Сухарев – старший мастер участка по эксплуатации сетей и подстанций, цех по электроснабжению, АО «Выксунский металлургический завод», 607060, Нижегородская обл., 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 Batashevychk Str., Vyksa, Nizhny Novgorod Region 607060, Russian Federation; e-mail: sukharev_dju@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2023; поступила после доработки 04.06.2023; принята к публикации 05.06.2023

Received 22.03.2023; Revised 04.06.2023; Accepted 05.06.2023