

Calculation of the Exchange Fund of Electrical Equipment of Industrial Enterprises

Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M., Cherepanov V.V., Ozhegov A.N., Zakalata A.A.
Vyatka State University
Kirov, Russian Federation

Abstract. The purpose of this work is the theoretical substantiation and development of a practical method for calculating the exchange fund of electrical equipment of an industrial enterprise. The purpose is achieved through the use of separate methods of queuing theory if the flow of applications for repairs and restoration are the simplest. It is confirmed by the results of statistical studies. Therefore, for the mathematical description of the repair problem the authors use the scheme $[Mm; Ms; n]$, which corresponds to the process of death and reproduction. As a criterion for optimizing the exchange fund of electrical equipment it is proposed to use the zero probability waiting for the replacement of a faulty electrical component with a working from the exchange fund. For the case of the simplest flow of applications for service, the authors suggest to use the Peck and Hazelwood tables, which significantly simplify the calculation of the exchange fund for known failure rates and electrical equipment recoveries. For practical use of the proposed method, the authors have developed convenient forms for presenting initial data for calculating the exchange fund, and it is proposed to present the results of calculations in the form of several options for the optimal number of electrical equipment in the exchange fund depending on the accepted level of zero expectation probability, the number of elements from the exchange fund and their recovery time. The proposed method will optimize the exchange fund of electrical equipment and reduce the cost of its formation.

Keywords: exchange fund, probability of zero expectation, recovery rate, optimality criterion, system reliability, queueing systems.

DOI: 10.5281/zenodo.2650407

Calculul fondului de schimb al echipamentelor electrice ale întreprinderilor industriale

Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M., Cherepanov V.V., Ozhegov A.N., Zakalata A.A.
Universitatea de Stat din Vyatka

Kirov, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării constă în fundamentarea teoretică și dezvoltarea unei metode practice de calcul al fondului optim de schimb al echipamentelor electrice ale unei întreprinderi industriale. Datele inițiale pentru constituirea fondului de schimb sunt date statistice privind defecțiunile și recuperările anumitor tipuri de echipamente electrice (timpul mediu de funcționare și timpul mediu de recuperare). Scopul a fost atins pe baza utilizării unor metode ale teoriei serviciului de masă, cu condiția, ca fluxul de aplicații pentru reparații și restaurare să fie cel mai simplu. Această tratare a problemei are la bază ca confirmare rezultater publicate ale numeroaselor studii statistice privind fiabilitatea echipamentelor electrice. Prin urmare, pentru descrierea matematică a problemei de reparare, autorii folosesc o schemă binecunoscută care corespunde procesului de deces și reproducere. Ca un criteriu pentru optimizarea fondului de schimb al echipamentelor electrice, autorii propun să folosească probabilitatea zero de așteptare pentru înlocuirea unui element defectat cu un element robust, care ar trebui să prezent în fondul de schimb. În cazul celui mai simplu flux de aplicații pentru servicii, autorii propun utilizarea tabelelor statistice ale lui Peck și Hazelwood, care pot simplifica în mod semnificativ calcularea fondului de schimb pentru ratele cunoscute ale refuzurilor și restaurare ale componentelor electrice. Pentru utilizarea practică a metodei propuse, autorii au elaborat forme convenabile de prezentare a datelor inițiale pentru calcularea fondului de schimb. Rezultatele calculelor se propun a fi prezentate sub forma mai multor variante ale numărului optim de echipamente electrice în fondul de schimb al întreprinderii.

Cuvinte-cheie: fondul de schimb, probabilitatea zero de așteptare, rata de recuperare, criteriul de optimalitate, fiabilitatea sistemului, sistemul de servicii de masă.

**Расчет обменного фонда электрооборудования промышленных предприятий
Басманов В.Г., Холманских В.М., Черепанов В.В., Ожегов А.Н., Закалата А.А.**

Вятский государственный университет

г. Киров, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является теоретическое обоснование и разработка практического метода расчета оптимального обменного фонда электрооборудования промышленного предприятия. Исходными данными для формирования обменного фонда являются статистические данные об отказах и восстановлениях конкретных видов электрооборудования (среднее время исправной работы и среднее время восстановления). Поставленная цель была достигнута на основе использования отдельных методов теории массового обслуживания, при условии, что потоки заявок на ремонты и восстановления являются простейшими. Это подтверждается публикациями результатов многочисленных статистических исследований по надежности электрооборудования. Поэтому для математического описания ремонтной проблемы авторами используется хорошо известная схема $[M_m; M_s; n]$, которая отвечает процессу гибели и размножения. В качестве критерия оптимизации обменного фонда элементов электрооборудования, авторами предлагается использовать вероятность нулевого ожидания замены неисправного элемента на исправный, который должен быть в обменном фонде. Для случая простейшего потока заявок на обслуживание авторы предлагают использовать статистические таблицы Пека и Хейзелвуда, которые позволяют существенно упростить расчет обменного фонда по известным интенсивностям отказов и восстановлений элементов электрооборудования. Для практического использования предлагаемого метода авторами разработаны удобные формы представления исходных данных для расчета обменного фонда. Результаты расчетов предлагается представлять в виде нескольких вариантов оптимального количества элементов электрооборудования в обменном фонде предприятия в зависимости от принятого уровня вероятности нулевого ожидания, количества элементов в обменном фонде и времени их восстановления. Предложенная методика позволит оптимизировать обменный фонд восстанавливаемых элементов электрооборудования, что повысит надежность не только электрооборудования промышленного предприятия, но и системы электроснабжения в целом, т.к. большинство элементов системы электроснабжения являются восстанавливаемыми (ремонтируемыми) электротехническими изделиями. Таким образом можно минимизировать затраты на комплектование обменного фонда.

Ключевые слова: обменный фонд, вероятность нулевого ожидания, интенсивность восстановления, критерий оптимальности, надежность системы, системы массового обслуживания.

Введение

Во время отказа восстанавливаемых элементов электрооборудования промышленного предприятия в условиях рыночной экономики, с большой долей вероятности, может возникнуть нежелательная ситуация: на складе нет в наличии нового элемента, а в ремонтном цехе отсутствует восстановленный элемент, что недопустимо для предприятий с непрерывными технологическими процессами. Подобная ситуация может возникнуть и в системе электроснабжения предприятия при этом могут наблюдаться перебои в электроснабжении на время ожидания замены или срочного ремонта вышедшего из строя элемента системы электроснабжения (далее элемента), восстановление которого происходит в экстремальных условиях, нарушается технология ремонта, что может привести к резкому снижению послеремонтной надежности элемента.

В конечном итоге это может вызвать нарушение технологии производства и снижение показателей надежности системы электроснабжения промышленного предприятия.

Разумеется, на каждом предприятии предусмотрено резервирование электроснабжения, но и в этом случае может возникнуть критическая ситуация, когда недостаточно мощности резервных линий, т.е. на время восстановления отказавшего элемента неизбежно отключение наименее ответственных потребителей электрической энергии.

Для устранения указанной выше критической ситуации, очевидно, надо создать не снижаемый оптимальный обменный фонд восстанавливаемых элементов системы электроснабжения. Это позволит обеспечить качественный технологический процесс, до минимума сократить перебои в электроснабжении, улучшить качество ремонта элементов и в итоге повысить надежность производства и электроснабжения промышленного предприятия.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является теоретическое обоснование и разработка практического метода расчета обменного фонда электрооборудования промышленного предприятия с использованием данных об отказах конкрет-

ных видов электрооборудования (среднее время исправной работы и среднее время восстановления (ремонта)).

Выполним начальный анализ формирования обменного фонда. Поступающие в ремонтный цех неисправные элементы будут обмениваться тем быстрее, чем больше будет их количество в обменном фонде, но с увеличением последнего возрастают финансовые затраты на его формирование. Минимум затрат на комплектование обменного фонда будет тогда, когда он содержит оптимальное количество элементов. Поэтому возникает задача по расчету оптимального обменного фонда.

II. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Моменты возникновения отказа элемента, поступления его в ремонтный цех и продолжительность восстановления являются случайными величинами. Поэтому могут возникнуть очереди восстанавливаемых элементов, ожидающих ремонта и обмена. Предполагая, что демонтированные из эксплуатации неисправные элементы немедленно транспортируются в ремонтный цех, можно утверждать, что поток заявок на ремонт будет практически повторять поток их отказов. В [1] показано, что поток отказов крановых электродвигателей является простейшим. В многочисленной литературе по надежности электрооборудования, например, [2-6], подтверждается, что практически все виды электротехнического оборудования в период нормальной эксплуатации отвечают основному закону надежности – экспоненциальному. Если число элементов в обменном фонде равно числу отказавших элементов, поступающих из эксплуатации, то наблюдается установившийся режим (бесперебойная замена неисправных элементов на восстановленные, имеющиеся в обменном фонде). Если же равенство нарушено, то в фонде может не оказаться элементов, которыми можно было бы заменить отказавшие элементы. Образуется очередь на замену, время ожидания в очереди зависит от количества элементов в обменном фонде и времени восстановления, которое по данным статистических исследований согласуется с экспоненциальным законом распределения.

Оптимальное количество обменных элементов определяется на основе теоретических

методов в многочисленных работах по теории массового обслуживания [7-17]. Используем разработанный в общем виде математический аппарат [18] для анализа различных систем массового обслуживания. Для этого представим процесс эксплуатации элементов в виде замкнутой системы массового обслуживания (СМО) с ожиданием (рис. 1).

Так как поступающий поток неисправных элементов является пуассоновским, а промежутки времени, в течение которых элементы восстанавливаются, распределены по показательному закону, то состояние системы будет полностью определено числом n неисправных элементов, требующих замены в момент времени t на исправные, находящиеся в обменном фонде. Предсказание будущего течения процесса не будет зависеть от прошлого состояния. Таким образом, рассматриваемый процесс является марковским, который полностью определяется матрицей A переходных вероятностей и совокупностью начальных вероятностей состояний $p_n(0)$.

В литературе [19, 20] описанный выше процесс относится к проблеме ремонта, которая связана с теорией очередей. Более подробное рассмотрение вопроса излагается в [21-29].

Для математического изложения процесса эксплуатации электрооборудования воспользуемся работой [30].

Пусть имеется m взаимно независимых элементов, для которых создана общая группа в n запасных элементов. Пусть каждый из элементов имеет экспоненциальное распределение времени работы до отказа (символ M) с постоянной интенсивностью отказов λ' для каждого элемента. Далее, пусть для восстановления работоспособности имеется s ремонтирующих органов, т.е. одновременно может ремонтироваться до s отказавших единиц. Для СМО с ожиданием должно выполняться условие - если все ремонтные органы заняты, то вновь отказавший элемент становится последним в общую очередь. Будем считать, что длительности ремонта – случайные независимые величины, имеющие экспоненциальное распределение времени ремонта с постоянной интенсивностью восстановления μ для каждого отказавшего элемента и результирующей интенсивностью восстановления μ/s .

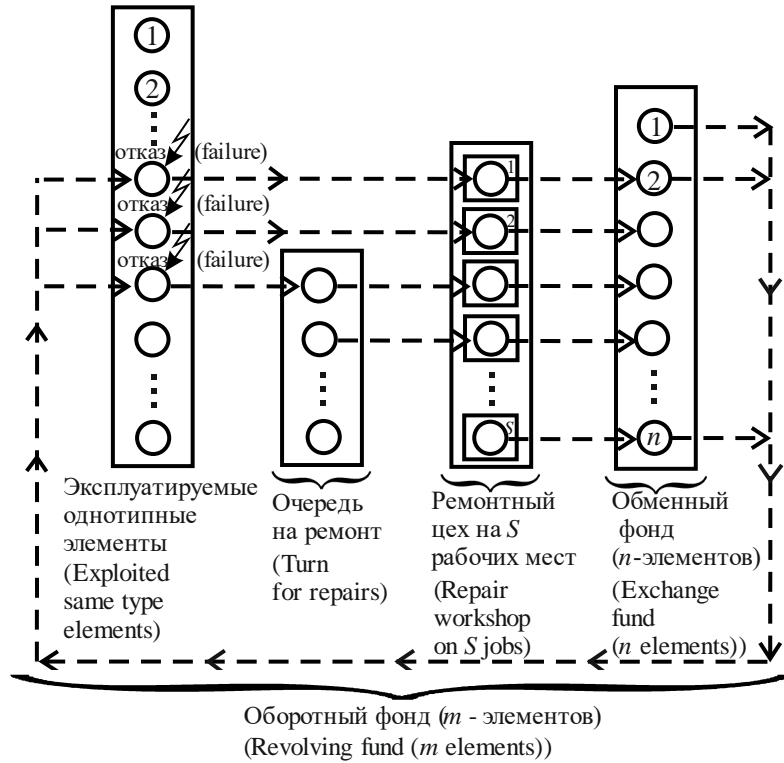


Рис. 1. Представление процесса эксплуатации восстанавливаемого электрооборудования в виде замкнутой СМО с ожиданием.¹

Основной целью изучения данного процесса является решение вопроса - как можно достичь определенной надежности системы, варьируя количество резервных элементов n ?

Схема, иллюстрирующая данную ремонтную проблему, классифицируется как $[Mm; Ms; n]$ и представлена на рис. 2.

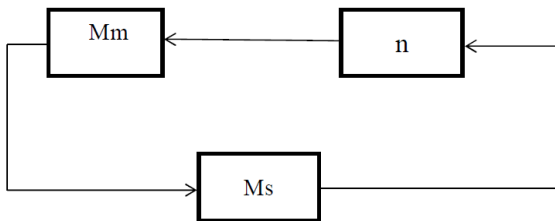


Рис. 2. Схема $[Mm; Ms; n]$, иллюстрирующая ремонтную проблему.²

Схема типа $[Mm; Ms; n]$, описывается при помощи процесса гибели и размножения. В работе [31] приводится подробное исследование этого класса случайных процессов.

Состояние системы во времени характеризуется количеством элементов, которые ремонтируются и стоят в очереди на ремонт. Состояния - 1 и $K=m+n+1$ являются отражающими. Процесс гибели и размножения есть стационарный марковский процесс $X(t)$,

пространство состояний которого есть неотрицательные числа. Матрица переходных вероятностей этого процесса показывает все возможные состояния обменного фонда в интервале времени $(t, t + \Delta t)$, т.е. какие могут произойти возможные переходы состояний с соответствующими вероятностями. В [19] приведено в общем виде математическое описание процесса гибели и размножения и показано, что матрица переходных вероятностей удовлетворяет дифференциальным уравнениям $P'(t) = AP(t)$ и $P'(t) = P(t)A$ с начальными условиями $P(0)=1$, где A есть матрица Якоби.

Получим матрицу A , построим граф перехода вероятностей и составим систему дифференциальных уравнений для нашего случая.

Обозначим через Y_0, Y_1, \dots, Y_m все возможные состояния обменного фонда. Тогда в интервале времени $(t, t + \Delta t)$ могут произойти следующие возможные переходы состояния с соответствующими вероятностями, которые приведены в табл. 1.

где λ' – интенсивность отказа отдельного элемента;

n – количество элементов в обменном фонде;

m – количество элементов в оборотном фонде;

μ – интенсивность восстановления поврежденных элементов.

Следует отметить, что практический интерес представляется случай, когда $m > n$.

Принимая во внимание перечисленные выше возможные состояния и вероятности перехода в эти состояния, построим граф возможных состояний (рис. 3) и выведем матрицу переходных вероятностей A (рис. 4).

Таблица 1³.

Возможные переходы состояния обменного фонда с соответствующими вероятностями⁴.

Переходы состояния (State transitions)	Вероятность переходов (Transition probability)
Неизменное состояние (Unchanged state) $Y_0 \rightarrow Y_0$	$1 - m\lambda' dt$
Использован один элемент из обменного фонда (Used one item from the exchange fund) $Y_0 \rightarrow Y_1$	$m\lambda' dt$
Обменный фонд достиг вновь n элементов (Exchange fund reached again n items) $Y_1 \rightarrow Y_0$	$\mu/n dt$
Неизменное состояние (Unchanged state) $Y_1 \rightarrow Y_1$	$1 - (m-1)\lambda' dt - \mu/n dt$
Использовано два элемента из обменного фонда (Used two items from the exchange fund) $Y_1 \rightarrow Y_2$	$(m-1)\lambda' dt$
Обменный фонд вновь достиг n элементов (Exchange fund reached again n items) $Y_2 \rightarrow Y_1$	$2\mu/n dt$
Неизменное состояние (Unchanged state) $Y_2 \rightarrow Y_2$	$1 - (m-2)\lambda' dt - 2\mu/n dt$
.....
Неизменное состояние (Unchanged state) $Y_{n-1} \rightarrow Y_{n-1}$	$1 - (m-n+1)\lambda' dt - (n-1)/n \mu dt$
Использованы все n элементов обменного фонда (Used all n elements of the exchange fund) $Y_{n-1} \rightarrow Y_n$	$(m-n+1)\lambda' dt$
Обменный фонд вновь достиг n элементов (Exchange fund reached again n items) $Y_n \rightarrow Y_{n-1}$	μdt
Неизменное состояние (Unchanged state) $Y_n \rightarrow Y_n$	$1 - (m-n)\lambda' dt - \mu dt$
Использованы все n элементов обменного фонда и один ожидает обмена (All n elements of the exchange fund are used and one is waiting for the exchange.) $Y_n \rightarrow Y_{n+1}$	$(m-n)\lambda' dt$
Обменный фонд вновь достиг n элементов (Exchange fund reached again n items) $Y_{n+1} \rightarrow Y_n$	μdt
Неизменное состояние (Unchanged state) $Y_{n+1} \rightarrow Y_{n+1}$	$1 - (m-n-1)\lambda' dt - \mu dt$
.....
Неизменное состояние (Unchanged state) $Y_{m-1} \rightarrow Y_{m-1}$	$1 - \lambda' dt - \mu dt$
Использованы все элементы обменного фонда и один ожидает замены (All elements of the exchange fund are used and one is waiting for replacement.) $Y_{m-1} \rightarrow Y_m$	$\lambda' dt$
Обменный фонд вновь достиг n элементов (Exchange fund reached again n items) $Y_m \rightarrow Y_{m-1}$	μdt
Неизменное состояние (Unchanged state) $Y_m \rightarrow Y_m$	$1 - \mu dt$

^{3,4} Appendix 1

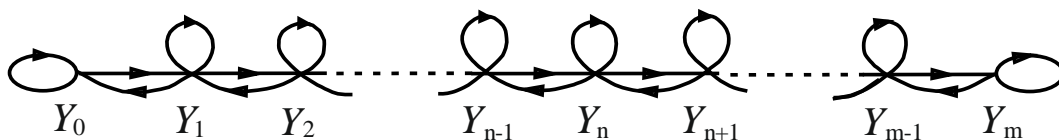


Рис. 3. Граф перехода возможных состояний обменного фонда элементов электроснабжения промышленного предприятия.⁵

Состояние обменного фонда электроцеха в момент $t+dt$
(Condition of an exchange fund of electrical workshop at the time of $t+dt$)

	Y_0	Y_1	Y_2	...	Y_{n-1}	Y_n	Y_{n+1}	...	Y_{m-1}	Y_m
Y_0	$1 - m\lambda' dt$	$m\lambda' dt$	0	...	0	0	0	...	0	0
Y_1	$\mu/n dt$	$1 - (m-1)\lambda' dt - \mu/n dt$	$(m-1)\lambda' dt$	...	0	0	0	...	0	0
Y_2	0	$2\mu/n dt$	$1 - (m-2)\lambda' dt - 2\mu/n dt$	...	0	0	0	...	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots
Y_{n-1}	0	0	0	...	$\frac{1 - (m-n+1)\lambda' dt - (n-1)\mu/n dt}{\lambda' dt}$	$\frac{(m-n+1)\mu}{\lambda' dt}$	0	...	0	0
Y_n	0	0	0	...	μdt	$1 - (m-n)\lambda' dt - \mu dt$	$(m-n)\lambda' dt$	...	0	0
Y_{n+1}	0	0	0	...	0	μdt	$1 - (m-n-1)\lambda' dt - \mu dt$	...	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots
Y_{m-1}	0	0	0	...	0	0	0	...	$1 - \lambda' dt - \mu dt$	$\lambda' dt$
Y_m	0	0	0	...	0	0	0	...	μdt	$1 - \mu dt$

Рис. 4. Матрица переходов состояния обменного фонда элементов электрооборудования.⁶

Вероятность различных состояний рассматриваемой системы описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 p_0'(t) &= -m\lambda' p_0(t) + \frac{\mu}{n} p_1(t); \\
 \dots\dots\dots \\
 p_k'(t) &= -\left[(m-k)\lambda' + k\frac{\mu}{n} \right] p_k(t) + (m-k+1)\lambda' p_{k-1}(t) + (k+1)\frac{\mu}{n} p_{k+1}(t), \text{ при } (1 \leq k < n); \\
 p_k'(t) &= -\left[(m-k)\lambda' + \mu \right] p_k(t) + (m-k+1)\lambda' p_{k-1}(t) + \mu p_{k+1}(t), \text{ при } (n \leq k < m); \\
 \dots\dots\dots \\
 p_m'(t) &= -\mu p_m(t) + \lambda' p_{m-1}(t), \text{ при } (k = m).
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $p_0(t); p_1(t); \dots; p_m(t)$ – вероятности возможных состояний системы.

Матрица А (рис. 4) является конечной неприводимой и непериодической, это означа-

ет, что при любых значениях λ' и μ всегда существует установившийся режим со следующими уравнениями состояния:

$$\left. \begin{aligned}
 m\lambda' p_0 &= \frac{\mu}{n} p_1; \\
 \dots\dots\dots \\
 \left[(m-k)\lambda' + k \frac{\mu}{n} \right] p_k &= (m-k+1)\lambda' p_{k-1} + (k+1) \frac{\mu}{n} p_{k+1}, \text{ при } (1 \leq k < n); \\
 \left[(m-k)\lambda' + \mu \right] p_k &= (m-k+1)\lambda' p_{k-1} + \mu p_{k+1}, \text{ при } (n \leq k < m); \\
 \dots\dots\dots \\
 \mu p_m &= \lambda' p_{m-1}, \text{ при } (k = n).
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Используя метод решения системы уравнений (2), изложенный в работе [18], выразим в конечном виде вероятности системы:

$$p_k = \frac{m!}{k!(m-k)!} n^k \alpha^k p_0, \text{ при } 0 < k \leq n; \quad (3)$$

$$p_k = \frac{m!}{k!(m-k)!} \alpha^k p_0, \text{ при } n < k \leq m,$$

где

$$\begin{aligned}
 p_0 &= 1 / \left(\sum_{k=0}^{n-1} \frac{m!}{k!(m-k)!} n^k \alpha^k p_0 + \right. \\
 &\left. + \sum_{k=n}^m \frac{m!}{k!(m-k)!} \frac{k! n^n}{n!} \alpha^k \right). \quad (4)
 \end{aligned}$$

Здесь $\alpha = \lambda' / \mu$ – коэффициент использования обменного фонда элементов одного назначения.

Уравнение расхода рассматриваемой системы массового обслуживания запишется в следующем виде:

$$\frac{1}{\alpha_1(m-k)} = \frac{\bar{w}}{\nu} = \frac{n}{\mu(n-\delta)} = \frac{\tau}{k}, \quad (5)$$

где \bar{w} – среднее время ожидания обмена;

ν – среднее число оборотных элементов, ожидающих обмена;

δ – среднее число использованных обменных элементов;

τ – среднее время нахождения элемента в системе (ожидание + ремонт).

Для определения оптимального количества элементов в обменном фонде в качестве основного критерия примем вероятность нулевого ожидания $P(\omega = 0)$ обмена неисправного элемента на исправный, который находится в обменном фонде:

$$P(\omega = 0) = \sum_{k=0}^{n-1} p_k = p_0 \sum_{k=0}^{n-1} \frac{m!}{k!(m-k)!} n^k \alpha^k. \quad (6)$$

Определение n из (6) связано с большими вычислениями. Для облегчения расчетов воспользуемся таблицами Пека и Хейзельвуда [32], из которых можно определить оптимальное количество элементов n обменного фонда в зависимости от количества элементов m обратного фонда, коэффициента обслуживания χ и принятого уровня вероятности нулевого ожидания $P(\omega = 0)$.

Коэффициент χ вычисляется по формуле:

$$\chi = \frac{\alpha}{1 + \alpha} = \frac{T_R}{T_R + T_{co}}, \quad (7)$$

где T_R – суммарное время, необходимое на восстановление поврежденного элемента;

T_{co} – наработка элемента между капитальными ремонтами.

По таблицам [32] предоставляется возможность уточнить значение $P(\omega = 0)$ и дополнительно определить коэффициент эффективности системы F , характеризующий величину уменьшения среднего количества оборотных элементов из-за возможного ожидания обмена:

$$F = \frac{T_R + T_{co}}{T_R + T_{co} + \bar{w}}. \quad (8)$$

Зная F можно определить среднее количество элементов M , ожидающих обмена:

$$M = m(1 - F). \quad (9)$$

Покажем, как практически можно воспользоваться материалами данной работы.

Суммарное время восстановления отказавших элементов в условиях промышленного предприятия выражается формулой:

$$T_R = t_1 + t_2 + t_3, \quad (10)$$

где t_1 – время на демонтаж и транспортировку отказавшего элемента в ремонтный цех;
 t_2 – время на ожидание восстановления;
 t_3 – время на восстановление.

Очевидно, каждая из составляющих суммарного времени восстановления для отдельных элементов и предприятий индивидуальны и зависят от многочисленных факторов, основными из которых являются: общее число элементов всех типов и марок в оборотном фонде предприятия, их эксплуатационная надежность, квалификация и количество специалистов, занятых ремонтом, уровень технической оснащенности ремонтного цеха. Изучение практики выполнения ремонтных работ основных элементов электрооборудования показывает, что $t_1 = 1-5$ часов, t_2 из-

меняется в широком диапазоне от 1 до 15 рабочих дней.

Время t_3 необходимое для выполнения качественного ремонта элементов в основном определяется соблюдением технологии ремонта, например, для электродвигателей и обмоток коммутационных аппаратов продолжительность пропитки и сушки изоляции составляет 2–5 рабочих дня.

Учитывая указанные выше обстоятельства предлагается рассчитывать несколько вариантов оптимального количества отдельных элементов в обменном фонде ремонтного цеха, например, для $T_R = 5, 10$ и 15 дней.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Покажем примеры представления исходных данные для расчета обменного фонда и результатов расчета в табличной форме, см. табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2⁷

Пример представления исходных данных для расчета обменного фонда электрооборудования⁸.

Тип эл. двигателя (Type of electric motor)	Наименование механизма (The name of the mechanism)	Наработка между отказами, требующими капитального ремонта T_{co} , час (Time between failures requiring major repairs T_{co} , hour)	Время ремонта одного эл. двигат. T_R , дней (Repair time of one electric motor T_R , days)			Принятый уровень вероятности нулевого ожидания, P (Zero wait probability level accepted, P)	Кол-во эл. двигат. в оборотном фонде предприятия m , шт. (The number of electric motors in the revolving fund of an enterprise m , pcs.)
			15	10	5		
МТО-12-6	передвижения кабины крана (crane cabin movements)	2695	0.135	0.094	0.049	≥ 0.9	1, 2, 3, ..., m
МТ-22-6	передвижения крана (crane movement)	4581	0.084	0.058	0.030		
МТ-42-8	грузовая лебедка крана (crane cargo winch)	12658	0.032	0.022	0.011		

^{7,8}Appendix 1

Таблица 3⁹.

Пример представления результатов расчета оптимального количества электродвигателей в обменном фонде ремонтного цеха при наличии в оборотном фонде предприятия от 4 до 28 электродвигателей¹⁰.

№ эл. дв. (electric motor number)	Количество электродвигателей в оборотном фонде предприятия (The number of electric motors in the revolving fund of an enterprise)										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	28
$T_R = 15$ дней (Days)											
1	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7
2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5
3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3
$T_R = 10$ дней (Days)											
1	2	2	2	3	3	4	4	4	5	5	6
2	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
3	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
$T_R = 5$ дней (Days)											
1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Таким образом, для формирования обменного фонда необходимо наличие статистических данных об отказах и восстановлениях интересующего нас электрооборудования. В случае отсутствия данных о наработках между отказами их можно ориентировочно оценить методом экспертных оценок. Время восстановления индивидуально для ремонтных подразделений предприятий и может быть объективно задано и проконтролировано администрацией ремонтного цеха.

В результате проведенных исследований авторами была достигнута цель работы, результатом, которого является создание простого практического метода расчета оптимального обменного фонда электрооборудования. Применение, которого позволит обеспечить надежность системы электроснабжения, состоящей из ремонтируемого электрооборудования, варьируя количество обменных элементов электрооборудования. Кроме того, в процессе проведения исследований были получены и другие результаты, которые можно представить в виде следующих рекомендации при решении подобных задач:

1. Так как процесс эксплуатации восстанавливаемого электрооборудования является марковским, то это позволяет упростить процесс описания всех возможных состояний обменного фонда в интервале времени $(t, t + \Delta t)$ с помощью матрицы Якоби;

2. Для расчета обменного фонда достаточно рассмотреть установившийся процесс функционирования рассматриваемой системы, т.к. на практике почти всегда рассматривается случай, когда период приработки электрооборудования закончился и начался период нормальной (установившейся) эксплуатации электрооборудования, который всегда поддерживается системой ППР и оптимальным обменным фондом электрооборудования;

3. Практический интерес представляет случай, когда количество обменных элементов n меньше количества оборотных элементов m электрооборудования, т.к. в этом случае количество эксплуатируемых элементов будет превышать количество элементов, находящихся в обменном фонде, что будет обеспечивать нормальный процесс эксплуатации;

4. В случае отсутствия данных о наработках между отказами рассматриваемого электрооборудования предлагается их оценивать методом экспертных оценок т.к. это единственный оставшийся способ получения информации о надежности электрооборудования.

Результатом нашей работы является простая, конкретная методика расчета оптимального обменного фонда электрооборудования, которая удобна для практического примене-

^{9,10}Appendix 1

ния, чем и отличается от других работ, которые в основном ограничиваются только рассмотрением общих теоретических положений рассматриваемой ремонтной проблемы.

IV. ВЫВОДЫ

1. Реальный процесс эксплуатации однотипного электрооборудования можно описать схемой типа $[M_m; M_s; n]$, отвечающей классической схеме гибели и размножений.

2. Расчет оптимального обменного фонда однотипных элементов электрооборудования может быть выполнен по критерию нулевого ожидания замены отказавшего элемента на исправный, имеющийся в обменном фонде.

3. Предложен простой практический способ для расчета вариантов оптимального количества элементов электрооборудования в обменном фонде предприятия в зависимости от количества элементов в оборотном фонде и времени их восстановления.

4. Предложенная методика позволит создать неснижаемый оптимальный обменный фонд восстанавливаемых элементов, что обеспечит качественный технологический процесс, до минимума сократит перебои в электроснабжении, улучшит качество ремонта элементов системы электроснабжения, минимизирует затраты на комплектование обменного фонда, а, следовательно, повысит надежность производства и электроснабжения промышленного предприятия.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Presentation of the process of operation of the recovered electrical equipment in the form of a closed QS with the expectation.

²**Fig. 2.** The scheme $[M_m; M_s; n]$ which illustrates the repair problem.

^{3,4}**Table 1.** Possible transitions of the state of the exchange fund with the corresponding probabilities

⁵**Fig. 3.** Transition graph of possible states of the exchange fund of power supply elements of an industrial enterprise.

⁶**Fig. 4.** Matrix of transitions of the state of the exchange fund of electrical equipment elements.

^{7,8}**Table 2.** An example of the presentation of the initial data for the calculation of the exchange fund of electrical equipment.

^{9,10}**Table 3.** An example of the presentation of the results of calculating the optimal number of electric motors in the exchange fund of a repair workshop with 4 - 28 electric motors in the revolving fund of an enterprise.

Литература (References)

- [1] Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M. Svjaz pokazatelej nadezhnosti jelektrooborudovanija kranov s ih proizvoditelnostju na predpriyatijah lesopromyshlennogo kompleksa [Relation of parameters of reliability electrical equipment of cranes with their productivity at the enterprises of timber industry complex]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija-Modern problems of science and education*, 2014, no. 3. (In Russian). Available at: <http://www.science-education.ru/117-13244> (accessed 16.01.2019).
- [2] Swingler J. (Ed.) Reliability Characterisation of Electrical and Electronic Systems. Woodhead Publishing, 2015. — 274 p.
- [3] Khorolsky V.Ya., Taranov M.A. *Nadezhnost' elektrosnabzheniya* [Reliability of power supply]. Rostov-on-don, Terra Print, 2007. 128 p. (In Russian).
- [4] Hooke J.B. *Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike* [The theory of reliability in the electricity industry]. Leningrad, Energoatomizdat, 1990. 206 p. (In Russian).
- [5] Malafeev S.I. *Nadezhnost' elektrosnabzheniya* [Reliability of power supply]. 2nd ed. St. Petersburg, Lan², 2018. 368 p. (In Russian).
- [6] Rausand M., Houland A. System Reliability Theory, Models, Statistical Methods and Applications. Second edition. John Wiley & Sons Inc. 2004. 636 p.
- [7] Khinchin A.Y. Mathematical Methods in the Theory of Queuing. Dover Publications. 2013. 128 p.
- [8] Kalashnikov V.V. Mathematical Methods in Queuing Theory. Springer Science+Business Media Dordrecht. 1994. 382 p. doi: 10.1007/978-94-017-2197-4.
- [9] Daigle J. Queueing Theory with Applications to Packet Telecommunication. Springer US. 2010. 316 p.
- [10] Gross D., Shortle J.F., Thompson J.M., Harris C.M. Fundamentals of Queueing Theory. Fourth Edition. John Wiley & Sons. 2011. 528 p.
- [11] Kleinrock L., Gail R. Queueing Systems: Problems and Solutions. Wiley-Interscience. 1996. 240 p.
- [12] Emelyanov A.A. Modeli protsessov massovogo obsluzhivaniya [Queueing process models]. *Prikladnaya informatika – Applied Informatics*, 2008, no. 5 (17), pp.92-130. (In Russian).
- [13] Kleinrock L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queueing theory]. Moscow: Kniga po trebovaniyu, 2013. 429 p. (In Russian).
- [14] Newell C.F. Applications Of Queueing Theory. Second Edition. Springer Science & Business Media. 2013. 303 p.
- [15] Medhi. J. Stochastic Models in Queueing Theory. Elsevier, 2002. 450p.
- [16] Kalashnikov V.V. Mathematical methods in queueing theory. *Journal of Applied Mathematics*

- and Stochastic Analysis*, 1993, vol. 6, pp. 411-411. doi:10.1155/s1048953393000346
- [17] Baccelli F., Bremaud P. Elements of Queueing Theory. Elements of Queueing Theory: Palm Martingale Calculus and Stochastic Recurrences 2nd ed. Springer. 2004. 345 p.
- [18] Kaufmann A., Cruon R. Les phénomènes d'attente; théorie et applications. Paris, Dunod, 1961. 274 p.
- [19] Barlow R.E., Proschan F. Mathematical Theory of Reliability. Philadelphia: SIAM, 1996. 258 p.
- [20] Feller W. An Introduction to Probability Theory and Its Applications. vol. 1, 3rd Edition. Wiley, 2005. 528 p.
- [21] Feller W. An Introduction to Probability Theory and Its Applications, vol. 2, 2nd Edition. John Wiley & Sons Inc. 1991. 704 p.
- [22] Singla N., Garg P.C. Transient and numerical solution of a feedback queueing system with correlated departures. *American Journal of Numerical Analysis*, 2014, vol. 2(1), pp. 20-28.
- [23] Claeys D., Steyaert B., Walraevens J., Laevens K., Bruneel H. Analysis of a versatile batch-service queueing model with correlation in the arrival process. *Performance Evaluation*, 2013, vol.70, pp. 300-316.
- [24] Melikov A.Z., Ponomarenko L.A., Ismailov B.G. Analysis of Queueing System with Dynamic Priorities. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2015. pp. 23-33. doi: 10.1615/JAutomatInfScien.v47.i9.30
- [25] Melikov A., Rustamov A., Jafarzade T., Sztrik J. Methods to Analysis of Queueing Models with State-Dependent Jump Priorities. *Ann. Math. Inform.*, 2016, vol. 46, pp.143–163.
- [26] Cox D.R., Smith W.L. Queues. Boca Raton, Fla.: Chapman & Hall, 1999. 180p.
- [27] Iravani F., Balcioglu B. On priority queues with impatient customers. *Queueing Systems*, 2008, vol. 58, no. 4, pp. 239–260.
- [28] Qing H., Chakravarthy S.R., Analytical and simulation modeling of a multi-server queue with Markovian arrivals and priority services. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, vol. 28, pp. 12–26.
- [29] Sundarapandian V. Probability, Statistics and Queueing Theory. PHI Learning Pvt. Ltd., 2009. 820p.
- [30] Takacs L., Introduction to the Theory of Queues, Oxford University Press, New York, 1962. 268p.
- [31] Barlow R. E., Repairman problems, in: K. J. Arrow, S. Karlin, and H. Scarf (eds.), Studies in Applied Probability and Management Science, Stanford Univ. Press, Stanford CA, 1962, pp. 18–33.
- [32] Peck Z. G., Hazelwood R. N. Finite Queueing Tables: Publications in Operations Research, no. 2. Literary Licensing, LLC. 2013. 224 p.

About authors.



Басманов Владислав Геннадьевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: диагностика электрооборудования, надежность электрооборудования, энергосбережение.
E-mail: basmanov@vyatsu.ru



Черепанов Вячеслав Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, энергосбережение.
E-mail: cherepanov@vyatsu.ru



Холманских Валерий Михайлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: надежность электроснабжения, энергосбережение.
E-mail: vm_holmanskih@vyatsu.ru



Ожегов Андрей Николаевич, к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, энергосбережение.
E-mail: ojegov@vyatsu.ru



Закалата Александр Алексеевич, доцент кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: энергосбережение.
E-mail: usr00134@vyatsu.ru