

Беляев С.В.<sup>1</sup>, Малафеев А.В.<sup>2</sup>, Омельченко Е.Я.<sup>2</sup><sup>1</sup> ПАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания Урала», г. Екатеринбург<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ ГРАФИКОВ РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей поддержание в работоспособном состоянии электрических сетей сегодня осуществляется за счет использования системы планово-предупредительного ремонта. В общем случае такая система позволяет выстраивать графики ремонтов оборудования на основе ремонтных циклов на длительное время, заранее предопределить перечень необходимых материальных и трудовых ресурсов. Однако на практике использование данной системы является довольно затруднительным и не всегда эффективным. Это связано с необходимостью изменения ремонтного графика при аварийных или неотложных ремонтах, учета сезонности выполняемых работ и организационной структуры рассматриваемого производственного отделения электрических сетей и смежных подразделений, а также учета особенностей эксплуатации конкретного оборудования. С учетом современных темпов развития электрических сетей со стабильным приростом числа потребителей (что также приводит к усложнению конфигурации электрических сетей) это невозможно без использования соответствующего математического и программного обеспечения, обеспечивающего автоматизацию процессов планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту электрических сетей с учетом большого количества факторов. В качестве основного критерия оптимальности принято минимальное время простоя оборудования как фактор, во многом обуславливающий надежность электроснабжения. Разработан алгоритм планирования, учитывающий ранжирование работ по степени важности, возможность их сдвига во времени и вероятную корректировку графика по результатам оценки технического состояния оборудования. Предложены способ минимизации времени простоя ремонтных бригад за счет задействования их на смежных участках, а также методика выявления совокупности оборудования, которое может находиться в ремонте в один и тот же период времени.

**Ключевые слова:** график ремонтов, надежность электроснабжения, время простоя, ранг работы, резервная бригада, совместимость ремонтов, сдвиг работы, фактическое состояние оборудования, внеплановая работа, корректировка графика.

### ВВЕДЕНИЕ

Как показывает опыт эксплуатации, принятая длительность ремонтных циклов оборудования электрических сетей и подстанций не учитывает рост повреждаемости оборудования при увеличении срока его эксплуатации. Вместе с тем при использовании современных средств диагностики появляется техническая возможность раннего выявления дефектов как основного оборудования, так и оборудования распределительных устройств без снятия напряжения, что позволяет обеспечить ремонтные службы дополнительными данными о техническом состоянии. Повышается также степень юридической ответственности сетевых компаний в связи с нарушением электроснабжения потребителей. Тенденция к сокращению штата ремонтных бригад приводит к необходимости как можно более равномерно распределять трудовые ресурсы в течение периода планирования для обеспечения их резерва с целью оперативного реагирования на возникающие аварийные режимы. Таким образом, становится актуальной задача не только оптимального планирования графиков ремонтов, но и их оперативной коррекции в любой момент времени по принятому критерию оптимальности.

Большинство исследований в области организации ремонтов направлено на решение следующих основных задач – оперативное рассмотрение ремонтных заявок, выполняемое диспетчерским персоналом; оперативное обслуживание оборудования, выполняемое дежурным персоналом объектов; разработку планов проведения ремонтов, выполняемую соответствующими функциональными службами – линий, подстанций, релейной

защиты и автоматики и др. Проблеме краткосрочного планирования ремонтных отключений посвящена работа [1]. Отмечается сложность формализации такой задачи. В работе предложена система ранжирования заявок и дальнейший выбор способа решения в зависимости от влияния заявки на вероятный недоотпуск электроэнергии. Вопросы выбора рациональной системы обслуживания электрических сетей рассмотрены в статье [2]. Разработана методика оптимального размещения субъектов обслуживания, основанная на методе линейного программирования. Подход к этой же задаче с учетом размещения дополнительных объектов телемеханики и автоматики за счет применения теории массового обслуживания разработан в [3]. Целый ряд работ посвящен организации проведения ремонтов по фактическому состоянию оборудованию с использованием различных методов неразрушающей диагностики (например, [4]). Так, в [5] предложены новые показатели ремонтпригодности – коэффициенты контролепригодности и ремонтодоступности, дана методика их расчета. Разработке принципов управления техническим состоянием оборудования посвящена статья [6]. Автором получены критерии эффективности, основанные на расчетной оценке остаточного ресурса. Методика анализа топологии оперативных схем, предназначенная для решения задач диспетчерского управления и основанная на синтезе булевой алгебры множеств и алгебры бинарных отношений, предлагается в [7]. Подход к оценке длительности нерабочих состояний оборудования, основанный на статистическом моделировании, рассмотрен в [8]. Методы статистического анализа использованы также в [9] для оценки дискретных показателей состояния электрической сети. Развитие этого подхода, основанное на при-

менении нейронных сетей и теории нечетких множеств, изложено в [10,11]. В работе [12] предлагается для распознавания технического состояния на основе данных диагностики использовать методы искусственного интеллекта, в частности машинного обучения.

При планировании ремонтной деятельности расширение получили экспертные методы. Совершенствованию одного из таких методов – метода анализа иерархий – посвящена работа [13], в которой предложен пошаговый контроль согласованности оценок экспертов. В [14] для повышения надежности технических систем рассмотрено использование генетических алгоритмов в условиях многокритериальности. В работе [15] подход, основанный на экспертных методах, положен в основу автоматизированной системы согласования предположений по графикам ремонтов от сетевых компаний, проводимого СО ЕЭС.

При проведении ремонтов по фактическому состоянию наиболее важным критерием является возможный ущерб при отказе оборудования. В [16] с целью его учета предложена методика организации ремонтов, предусматривающая разработку и анализ дерева отказов системы электроснабжения с учетом технологического оборудования. В [17] предложено для этих целей использовать составной индекс риска. Для формирования заключения применена система нечеткого вывода Мамдани. Методика планирования оптимального складского резерва силовых трансформаторов 230–500 кВ с учетом риска повреждения работающих трансформаторов предложена в [18]. Подход к оценке планируемых ремонтных схем с учетом риска отказов в сочетании с экономичностью сети рассмотрен в [19]. Авторы предлагают рассматривать систему сценариев отказов, оценивая количественно риск по величине CVaR (условная величина риска). Подобная методика, но ориентированная в первую очередь на развитие электрических сетей сельскохозяйственных районов, изложена в [20]. При этом авторы предлагают минимизировать не ущерб от ограничений, а саму величину ограничений. Экспертная система на основе нечетко-темпоральных лингвистических высказываний, позволяющая повысить эффективность оценки риска отказов в системе электроснабжения, предложена в [21].

Таким образом, большая часть исследований направлена на оценку текущих ремонтных заявок, разработку планов ремонта, совершенствование текущей диагностики электроустановок и не затрагивает вопросы оперативной корректировки ремонтного графика по фактическому состоянию оборудования.

#### ВЫБОР ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ И КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Выбор критериев оптимальности в рамках одной системы ремонтов целесообразнее всего осуществить с точки зрения надежности электроснабжения потребителей, так как очередность вывода в ремонт отдельных единиц оборудования сказывается на изменении схемы электроснабжения потребителей, а значит, и на структурной и функциональной надежности электрических сетей. Далее будем называть это системной надежностью электрических сетей. С этой точки зрения в качестве основного критерия оптимальности следует принять минимальное время простоя оборудования:

$$F = \min \sum_{i=1}^n T_{\text{рем},i} , \quad (1)$$

где  $T_{\text{рем},i}$  – время вывода в ремонт  $i$ -й единицы оборудования;  $n$  – количество единиц оборудования.

Здесь под временем вывода в ремонт  $i$ -й единицы оборудования  $T_{\text{рем},i}$  понимается не только время, при котором осуществляется ремонт на  $i$ -й единице оборудования, но и время, при котором эта единица оборудования находится без напряжения, например для обеспечения безопасности при проведении какой-либо работы на другом оборудовании.

В качестве дополнительных критериев оптимальности примем следующее:

$$N_{\text{рем}}(t) \rightarrow \max , \quad (2)$$

$$T_{\text{пр}}(t) \rightarrow \min , \quad (3)$$

где  $N_{\text{рем}}$  – число одновременно выведенных в ремонт единиц оборудования;  $T_{\text{пр}}$  – время простоя бригад в течение ремонтного периода.

Критерий (2) относится к участкам сети с последовательно соединенным оборудованием, поскольку при этом увеличение количества выведенного в ремонт оборудования снижает период времени, в течение которого надежность электроснабжения потребителей снижается.

#### СТРУКТУРА АЛГОРИТМА ПЛАНИРОВАНИЯ

Блок-схема алгоритма разработки оптимального графика ремонтов показана на **рис. 1**. Подготовительная часть алгоритма включает в себя формирование списка работ на текущий год и определение необходимого количества рабочих смен. Выявляются интервалы времени, на протяжении которых вывод в ремонт запрещен. На этом же этапе выполняется ранжирование работ по степени их важности.

Второй этап – составление первоначального графика с учетом принятых критериев оптимальности. В качестве основного интервала принимается рабочая неделя; принимается также, что одна бригада в течение смены может быть задействована только в одной работе. При формировании списка работ на первую неделю должно обеспечиваться максимальное его заполнение работами, имеющими самый высокий ранг (количество рангов принимается равным четырем, согласно опыту эксплуатации). При этом число совпадений ремонтной схемы электрической сети для различных работ должно быть наибольшим.

Произвольным образом выбирается первая бригада, для нее выбирается первая работа по уровню важности, требующая наибольшее количество рабочих смен. Для других бригад проверяется, могут ли работы, принятые для них, выполняться одновременно с работой первой бригады, при несоблюдении этого условия работы переходят в список работ, выполняемых на последующих неделях. Взамен перенесенных рассматриваются работы, следующие по рангу.

Далее аналогичным образом рассматривается следующая бригада, для нее также выбирается одна работа. В результате рассмотрения всех бригад каждая из них будет иметь хотя бы одну работу. В результате может быть намечено несколько вариантов графиков, оптимальных по различным критериям. Предлагается принимать к дальнейшему рассмотрению два типа сочетаний работ:

1) вариант с максимальным числом наиболее ответственных работ для бригад;

2) вариант с максимальным числом совпадений по положениям коммутационных аппаратов.

Перечень работ второй и последующих недель формируется несколько иным путем. Рассматривается сочетание работ первого типа. Из списка работ для второй недели исключаются работы, задействованные на первой неделе, а также работы, которые недопустимо выполнять на второй неделе. Сочетания формируются аналогично первой неделе, кроме работ, продолжающихся после первой недели. Такие работы фиксируются за второй неделей, кроме случаев, когда такая работа может быть поделена на периоды. Затем аналогично первой неделе выбирается два варианта перечней работ, указанных выше двух типов, после чего происходит переход к следующей неделе.

Для каждой недели в результате получается четыре сочетания работ, из которых для дальнейшего рассмотрения принимается два. Процедура ветвления показана на рис. 2.



Рис. 1. Упрощенная блок-схема алгоритма планирования оптимального графика проведения ремонтов

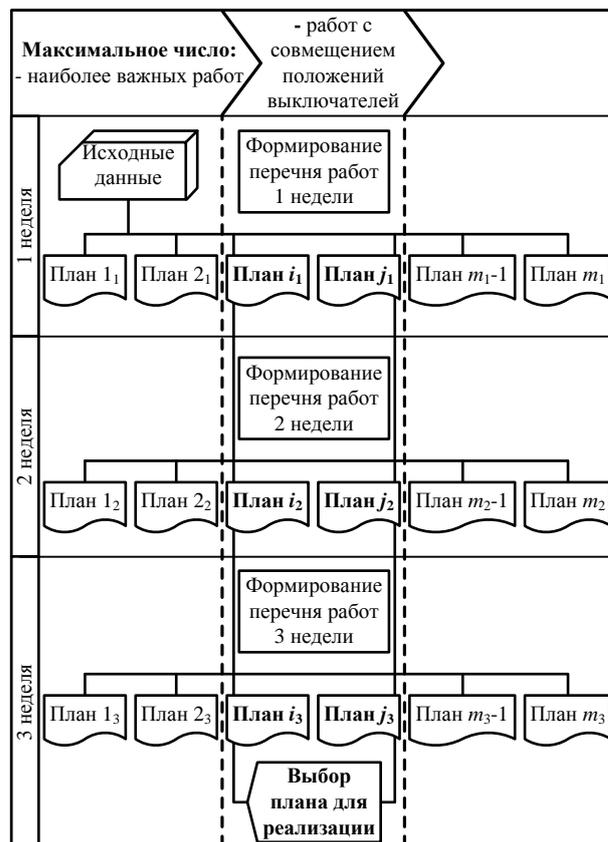


Рис. 2. Процедура ветвления при выборе вариантов для рассматриваемой недели ремонтного графика

Принятый вариант согласовывается с техническими службами предприятия электрических сетей, с главным инженером предприятия, с вышестоящими органами управления деятельностью предприятий электрических сетей. В дальнейшем график корректируется при возникновении внеплановых (аварийных) работ.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ

При разработке графика требуется ряд специфических сведений об оборудовании, среди которых можно выделить следующие:

- 1) основная бригада, за которой закреплено данное оборудование;
- 2) резервная бригада, которая может выполнить ремонт данной единицы оборудования взамен основной. Бригада может быть резервной только на тех единицах оборудования, которые по характеристике идентичны оборудованию, обслуживаемому регулярно данной бригадой. Это исключает возможность появления в ремонте бригада, не имеющая опыта эксплуатации конкретных видов оборудования;
- 3) число аварийных отключений оборудования;
- 4) для коммутационных аппаратов – число оперативных коммутаций;
- 5) длительность эксплуатации;
- 6) коэффициент износа оборудования;
- 7) перечень работ текущего ремонтного периода с учетом либо без учета цикличности (в зависимости от вида оборудования);
- 8) ранг работы – категория срочности планируемой работы (от 1 до 4);
- 9) ограничения, накладываемые на время выполнения тех или иных работ (например, запрет на вывод

в ремонт тупиковых единиц оборудования в зимнее время или запрет на выполнение работ на воздушных линиях электропередачи, проходящих по территории засеиваемых земельных участков в летнее время).

Следует отметить, что при существующей организации ремонтных работ конкретное оборудование закрепляется за какой-либо одной бригадой. Недостатком такой организации работы является тот факт, что при планировании ремонтной деятельности, как правило, не учитывается возможность привлечения той или иной бригады к ремонту схожего по структуре оборудования соседнего участка. Отсутствие возможности проведения одной бригадой ремонта оборудования соседнего участка при планировании ремонтной деятельности приводит к увеличению времени ремонта того или иного участка сети, то есть к увеличению перерыва электроснабжения потребителей. Покажем проявление данного недостатка на примере.

На рис. 3 представлен некоторый участок сети. Ремонт ЛЭП-1 и ТП-1, запитанных от подстанции 1, осуществляется первой бригадой. Ремонт ЛЭП-2, ЛЭП-3, ТП-2 и ТП-3, запитанных от подстанции 2, осуществляется второй бригадой.

Допустим, в текущем ремонтном периоде первая бригада в течение одной рабочей смены должна выполнить ремонт ЛЭП-1 и в течение одной рабочей смены ремонт ТП-1, а вторая бригада в течение одной рабочей смены должна выполнить ремонт ЛЭП-2 и в течение одной рабочей смены ремонт ТП-3. Если первая бригада поочередно будет выполнять ремонт ЛЭП-1 и ТП-1, то потребители, запитанные от подстанции 1, будут обесточены дважды. Однако если во время работы первой бригады на ЛЭП-1 или на ТП-1 будет задействована также вторая бригада для осуществления второго ремонта на ЛЭП-1 или на ТП-1, то потребители окажутся без питания только в течение одной рабочей смены. После этого первая бригада может быть задействована в работе на оборудовании второй бригады ЛЭП-2 или ТП-3. Таким образом, за счет привлечения к ремонту оборудования, расположенного на одном участке, бригад соседних участков возможно сокращение времени перерыва электроснабжения потребителей при ремонте.

Целесообразность привлечения смежных бригад к ремонту оборудования других участков определяется категоричностью потребителей, климатическими условиями, загрузкой ремонтного персонала, а также структурой электрической сети. Кроме того, следует осуществлять экономическую оценку эффективности привлечения той или иной бригады к работе на оборудовании, не входящем в зону обслуживания бригады.

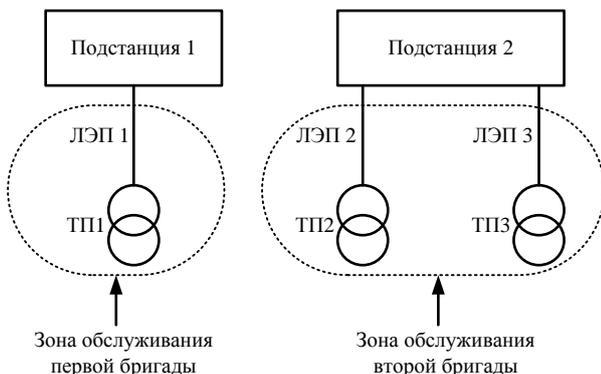


Рис. 3. Поясняющая схема к примеру работы бригады на соседнем участке сети

Поскольку при разработке оптимального графика возможно смещение межремонтных периодов в меньшую сторону для совмещения некоторых работ, необходимо исключать такие смещения для единиц оборудования с меньшим числом аварийных отключений. Это необходимо для того, чтобы избежать излишней частоты вывода в ремонт исправного оборудования. Необходимость ограничения сдвигов цикличности выполняемых работ также обусловлена требованиями Системного оператора ЕЭС.

Одним из способов учета параметра аварийности в алгоритме оптимизации является введение весовых коэффициентов. Из всего массива данных для каждой бригады выбираются единицы оборудования, которые имеют хотя бы один межремонтный интервал и минимальное число аварийных отключений (по опыту эксплуатации менее трех отключений в год). Также выделяется оборудование, обеспечивающее межсистемные перетоки. Для таких единиц вводятся весовые коэффициенты на смещение межремонтных циклов.

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫВОДА В РЕМОНТ РАЗЛИЧНЫХ ЕДИНИЦ ОБОРУДОВАНИЯ

С целью минимизации времени простоя оборудования в структуру расчета ремонтных графиков включается условие совмещения работ на элементах сети, соединенных последовательно. При этом техническое обслуживание и ремонт нескольких соединенных последовательно элементов должны осуществляться различными бригадами. Практически такое возможно, когда работы на выведенной в ремонт линии электропередачи совмещены с работами бригад, обслуживающих смежные с данной линией подстанции и электростанции. При этом необходимо учитывать конфигурацию сети.

Для проверки возможности совмещения ремонтных работ предусматривается формирование таблицы, столбцы которой соответствуют коммутационным аппаратам, задействованным в оперативных переключениях при подготовке к ремонту, а строки – выводимым в ремонт единицам оборудования.

В каждой графе таблицы может присутствовать одно из трех значений:

«1» – если коммутационный аппарат для данной единицы оборудования обязательно включен при ремонте (например, с целью обеспечения питания потребителей или обеспечения выдачи мощности электростанцией);

«-1» – если коммутационный аппарат для данного оборудования при ремонте обязательно отключен;

«0» – если положение коммутационного аппарата в данном случае не имеет значения.

Рассмотрим порядок заполнения такой таблицы на примере. Схема показана на рис. 4.

Пусть имеется сеть с двухцепной питающей линией (ВЛ-1 и ВЛ-2), двухцепной транзитной линией (ВЛ-3 и ВЛ-4), две подстанции с трехобмоточными трансформаторами Т-1 и Т-2, РУ среднего напряжения которых связаны одноцепной линией ВЛ-5, выключателями Q1–Q14. С шин среднего и низшего напряжения обеих подстанций питаются потребители. Будем считать, что в текущем периоде запланирован ремонт ВЛ-1; Т-1; РУ-110 кВ ПС-2.

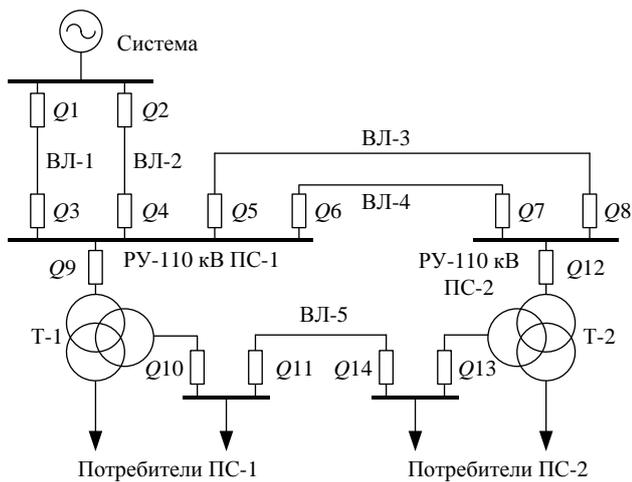


Рис. 4. Поясняющая схема к примеру работы бригады на соседнем участке сети

При выводе в ремонт ВЛ-1 обязательным является включенное положение Q2 и Q4 и отключенное положение Q1 и Q3. Положения остальных выключателей не определяются однозначно и могут строго задаваться при наложении ремонтных (или ремонтного и послеаварийного) режимов, например совмещение планового ремонта ВЛ-1 с неотложным ремонтом Т-2.

При выводе в ремонт Т-1 должны быть отключены выключатели в цепи трансформатора – Q9 и Q10. Для обеспечения питания потребителей на среднем напряжении должны быть включены выключатели Q12, Q13, Q14 и Q11. Питание потребителей ПС-1 на низшем напряжении должно обеспечиваться за счет резерва по сети, на рис. 4 не показано.

Наконец, ремонт РУ-110 кВ ПС-2 сопровождается отключением Q5, Q6, Q7, Q8, Q12. Для обеспечения питания потребителей обеих подстанций через Т-1 должны быть включены Q9, Q10, Q11, Q14, Q13 (если трансформатор Т-2 остается в работе с обмоткой 110 кВ на холостом ходу).

Проверка совместимости для этого случая сведена в таблице.

Проверка совместимости ремонтов

Ед. оборуд. Выкл.	ВЛ-1	Т-1	РУ-110 кВ ПС-2
Q1	-1	0	0
Q2	+1	0	0
Q3	-1	0	0
Q4	+1	0	0
Q5	0	0	-1
Q6	0	0	-1
Q7	0	0	-1
Q8	0	0	-1
Q9	0	-1	+1
Q10	0	-1	+1
Q11	0	+1	+1
Q12	0	+1	-1
Q13	0	+1	+1
Q14	0	+1	+1

Очевидно, что одновременный вывод в ремонт единиц оборудования, имеющих для одного и того же коммутационного аппарата в таблице совместимости ремонтов значения «1» и «-1», невозможен, так как в случае одновременного проведения работ на таких единицах оборудования произойдет перерыв в электроснабжении потребителя. Если в таблице проверки совместимости ремонтов для разных единиц оборудования хотя бы для одного коммутационного аппарата имеются одновременно значения «-1» и «0», «1» и «0», либо «0» и «0», то такие единицы оборудования совместно выводить в ремонт допустимо, так как нет однозначного противоречия относительно положения коммутационного аппарата.

Из таблицы следует, что нельзя выводить в ремонт одновременно Т-1 и РУ-110 кВ ПС-2, однако возможен одновременный ремонт ВЛ-1 и Т-1 или ВЛ-1 и РУ-110 кВ ПС-2.

Выбор конкретного варианта возможен одним из двух способов, определяемых пользователем:

1) наибольшая близость по времени трудоемкости работ для выводимых одновременно в ремонт единиц оборудования, что позволяет обеспечить равномерную загрузку персонала;

2) совместный вывод в ремонт единиц оборудования, имеющих наибольший период эксплуатации либо наихудшие статистические показатели надежности, что позволяет повысить надежность участка электрической сети в более короткие сроки.

Таблица подлежит коррекции только при изменении схемы электрической сети и не зависит от ее нормального оперативного состояния.

ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ОБЪЕМА РАБОТ ПО ОПТИМАЛЬНОМУ ГРАФИКУ

При планировании ремонтов учитывается количество рабочих смен для выполнения предстоящей ремонтной программы. При подсчете количества рабочих смен из общего числа дней исключается прогнозируемое количество выходных и праздничных дней, а также, при необходимости, часть рабочих смен для различных бригад фиксируется как резервная, для возможного выполнения внеплановых (аварийных) работ.

Для каждой бригады по разработанному графику определяются следующие характеристики:

- 1) количество требуемых смен по техническому обслуживанию (ТО);
- 2) стоимость материалов для ТО;
- 3) количество требуемых смен для проведения капитальных ремонтов (КР);
- 4) стоимость материалов для КР;
- 5) общее количество смен (сумма п. 1 и п. 3);
- 6) общая стоимость материалов (сумма п. 2 и п. 4);
- 7) лимит по количеству рабочих смен;
- 8) лимит по количеству рабочих смен за вычетом резервных;
- 9) лимит затрат на материалы.

Оптимальный график должен быть составлен таким образом, чтобы количество требуемых для выполнения ремонтной программы рабочих смен (п. 5) не превышало количество рабочих смен в году с учетом смен, отведенных для внеплановых работ (п. 8). Если превышение смен незначительное (допустимое

превышение определяется экспертным путем), тогда допускается уменьшение числа смен, отведенных для внеплановых работ. Вместе с этим осуществляется сравнение ориентировочной стоимости необходимых для ремонта материалов с отведенным для закупки материалов бюджетом предприятия электрических сетей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к формированию графиков ремонта электросетевого оборудования отличается от принятого на настоящий момент возможностью коррекции в течение ремонтного периода, что является крайне важным при внедрении организации ремонтов по фактическому состоянию. Задействование в работах смежных бригад позволит обеспечить более равномерное использование трудовых ресурсов во времени. Совмещение ремонтов на нескольких единицах оборудования при условии сохранения надежности электрооборудования даст возможность снизить вероятный ущерб при отказе работающего оборудования во время выполнения ремонтных работ как для потребителей, так и для сетевой компании.

Результаты исследования могут быть использованы при планировании ремонтных работ службами линий и подстанций производственных отделений сетевых компаний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров О.И. Дискретизация плана ремонтов основного оборудования в электроэнергетической системе // Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Энергетика. 2017. Т.60. № 4. С. 320–333.
2. Бойцов Ю.А., Васильев А.П. Решение задачи рациональной организации системы оперативного обслуживания электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетика. 2008. №1-2. С. 56-63.
3. Васильев А.П., Бандурин И.И. Математические модели оптимальной структуры оперативного обслуживания электрических сетей // Вестник ИГЭУ. 2010. Вып. 2. С. 47-52.
4. Николаев Ан.А., Храмшина Е.А., Николаев Ар.А. Локализация неисправностей трансформатора средствами акустической локализации частичных разрядов // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №1(38). С. 48-54.
5. Назарычев А.Н., Жулина Т.А. Ремонтпригодность оборудования станций и подстанций // Вестник ИГЭУ. 2009. Вып. 2. С. 91-96.
6. Назарычев А.Н. Основные принципы и критерии управления техническим состоянием электрооборудования // Вестник ИГЭУ. 2006. Вып. 2. С. 67-71.
7. Головинский И.А. Методы анализа топологии коммутационных схем электрических сетей // Электричество. 2005. №3. С. 10-18.
8. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Метод и алгоритм сравнения эмпирических характеристик относительной длительности нерабочих состояний оборудования энергосистем // Электричество. 2010. №6. С. 10-15.
9. Шубович А.А., Бочаров М.Е., Михалёв В.С. Использование показателей отказов электрооборудования для планирования ремонтов в электрических сетях // Энергетик. 2017. №2. С. 20-22.
10. Принцип формирования оценки технического состояния электрооборудования на подстанциях / А.И. Хальясмаа, С.А. Дмитриев, С.Е. Кокин, Д.А. Глушков, М.В. Осотова // Электричество. 2014. №10. С. 22-27.
11. Скоробогатченко Д.А. О необходимости информационной системы принятия решений при управлении ремонтами электрических сетей // Энергетик. 2017. №4. С. 52-54.
12. Хальясмаа А.И., Сенюк М.Д., Ерошенко С.А. Ключевые проблемы в задачах интеллектуального распознавания образов состояния силовых выключателей // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. №5(50). С. 103-107.
13. Огурцов А.Н., Староверова Н.А. Алгоритм повышения согласованности экспертных оценок в методе анализа иерархий // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 5. С. 81-84.
14. Тарутин А.В., Набатов А.В. Применение методов генетических алгоритмов для построения множества Парето в задачах многокритериальной оптимизации // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3359](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3359)
15. Принципы построения автоматизированной системы годового планирования ремонтов электросетевого оборудования / Ю.С. Авагимова, В.А. Дьячков, Ю.Я. Любарский, Е.В. Рубцова // Электричество. 2009. №3. С. 10-19.
16. Определение риска возникновения ущерба при отказе электрооборудования подстанций / А.В. Рассказчиков, А.А. Шульпин, П.А. Шомов, С.М. Кулагин, В.В. Гоголюк, Б.Л. Житомирский // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 1. С. 19-24.
17. Vianna E.A.L., Abaide A.R., Canha L.N., Miranda V. Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based onequipment condition // Electric Power System Research. 2017. Vol. 142. P. 36-46.
18. Enders J., Powell W.B., Egan D. A dynamic model for the failure replacement of aging high-voltage transformers // Energy Systems. 2010. Vol. 1. P. 31-59.
19. Shirokikh O., Sorokin A., Boginski V. A note on transmission switching in electric grids with uncertain line failures // Energy Systems. 2013. Vol. 4. P. 419-430.
20. Levin T., Thomas V.M. Modeling the impact of stochastic outages for electricity infrastructure development // Energy Systems. 2014. Vol. 5. P. 519-550.
21. Никольский О.К., Качесова Л.Ю., Шаныгин И.А. Математическая модель оценки и управления рисками аварий в системах электроснабжения // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2018. №10. С. 72-77.

Поступила в редакцию 09 января 2019 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### DEVELOPMENT OF OPTIMUM REPAIR SCHEDULE OF ELECTRICAL NETWORK EQUIPMENT TO IMPROVE THE RELIABILITY OF ITS FUNCTIONING

Sergey V. Belyaev

Chief specialist, Internal Audit Department, OJSC “Interregional Distributive Grid Company of Urals”, Ekaterinburg, Russia. E-mail: [belyaev-sv@mrsk-ural.ru](mailto:belyaev-sv@mrsk-ural.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0011-4369>

Aleksey V. Malafeev

Ph.D. (Engineering), Associate professor, Industrial Electric Power Supply Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: malapheev\_av@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1471-9764>

Evgeniy Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: momentum2@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

To ensure uninterrupted power supply to consumers, maintenance of the electrical networks in a working condition is today carried out through the use of a system of preventive maintenance. In the general case such a system allows building equipment repair schedules based on repair cycles for a long time predetermining the list of necessary material and labor resources in advance. However, in practice, the use of this system is rather difficult and not always effective. This is due to the need to change the repair schedule for emergency or urgent repairs taking into account the seasonality of work performed and the organizational structure of the production department of electrical networks and related departments as well as taking into account the specific features of the operation of specific equipment. Taking into account the current pace of development of electrical networks with a steady increase in the number of consumers (which also leads to a complication of the configuration of electrical networks) this is impossible without the use of appropriate mathematics and software that automates the planning processes for the maintenance and repair of electrical networks with a large number of factors. The minimum equipment downtime was taken as the main criterion for optimality, as a factor that largely determines the reliability of power supply. A planning algorithm has been developed that takes into account the ranking of works in order of importance, the possibility of their shift in time and the likely adjustment of the schedule based on the results of assessing the technical condition of the equipment. A method for minimizing the downtime of repair crews by using them in adjacent areas as well as a technique for identifying a set of equipment that may be under repair in the same period of time are proposed.

**Keywords:** repair schedule, reliability of power supply, downtime, rank of work, back-up team, compatibility of repairs, shift in work, actual equipment condition, unscheduled work, schedule adjustment.

REFERENCES

1. Aleksandrov O.I. Discretization of the main equipment repair plan in the electric power system. *Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy i energ. obyedineniy SNG. Energetika*. [Power engineering. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations]. 2017, vol.60, no. 4, pp. 320–333. (In Russian)
2. Boytsov Yu.A., Vasilyev A.P. Solution of the problem of rational organization of the system of operational maintenance of electrical networks. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems]. 2008, no. 1-2, pp. 56-63. (In Russian)
3. Vasilyev A.P., Bandurin I.I. Mathematical models of the optimal structure of operational maintenance of electrical networks. *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2010, iss. 2, pp. 47-52. (In Russian)
4. Nikolayev An.A., Khrumshina E.A., Nikolayev Ar.A. Localization of transformer faults by means of acoustic location of partial discharges. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018, no. 1(38), pp. 48-54. (In Russian)
5. Nazarychev A.N., Zhulina T.A. Maintainability of station equipment and substations // *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2009, iss. 2, pp. 91-96. (In Russian)
6. Nazarychev A.N. Basic principles and criteria for managing the technical condition of electrical equipment. *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2006, iss. 2, pp. 67-71. (In Russian)
7. Golovinskiy I.A. Methods for analyzing the topology of switching circuits of electrical networks. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2005, no. 3, pp. 10-18. (In Russian)
8. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Yu.Z. Method and algorithm for comparing the empirical characteristics of the relative duration of non-operating states of equipment of power systems. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2010, no. 6, pp. 10-15. (In Russian)
9. Shubovich A.A., Bocharov M.E., Mikhalyov V.S. The use of electrical equipment failure rates to plan repairs in electrical networks. *Energetik* [Power engineer]. 2017, no. 2, pp. 20-22. (In Russian)
10. Khal'yasmaa A.I., Dmitriyev S.A., Kokin S.E., Glushkov D.A., Osotova M.V. The principle of forming the assessment of the technical condition of electrical equipment at substations. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2014, no. 10, pp. 22-27. (In Russian)
11. Skorobogatchenko D.A. On the need for a decision-making information system in the management of electrical network repairs. *Energetik* [Power engineer]. 2017, no. 4, pp. 52-54. (In Russian)
12. Khal'yasmaa A.I., Senyuk M.D., Eroshenko S.A. Key problems in the tasks of intellectual recognition of the state of power circuit breakers. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye* [Electric power. Transmission and distribution]. 2018, no. 5(50), pp. 103-107. (In Russian)
13. Ogurtsov A.N., Staroverova N.A. Algorithm to improve the consistency of expert assessments in the hierarchy analysis method. *Vestnik IGEU* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2013, iss. 5, pp. 81-84. (In Russian)
14. Tarutin A.V., Nabatov A.V. Application of methods of genetic algorithms for the construction of the Pareto set in problems of multi-criteria optimization. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don]. 2015, no. 4, [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3359](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3359)
15. Avagimova YU.S., Dyachkov V.A., Lyubarskiy YU.YA., Rubtsova E.V. Principles of developing an automated system for annual planning of repairs of power grid equipment. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2009, no. 3, pp. 10-19. (In Russian)
16. Rasskazhnikov A.V., Shulpin A.A., Shomov P.A., Kulagin S.M., Gogolyuk V.V., Zhitomirskiy B.L. Determination of the risk of damage in case of failure of electrical substation. *Vestnik IGEU* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University]. 2013, iss. 1. pp. 19-24. (In Russian)
17. Vianna E.A.L., Abaide A.R., Canha L.N., Miranda V. Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based onequipment condition. *Electric Power System Research*. 2017, vol. 142, pp. 36-46.

18. Enders J., Powell W.B., Egan D. A dynamic model for the failure replacement of aging high-voltage transformers. *Energy Systems*. 2010, vol. 1, pp. 31-59.
19. Shirokikh O., Sorokin A., Boginski V. A note on transmission switching in electric grids with uncertain line failures. *Energy Systems*. 2013, vol. 4, pp. 419-430.
20. Levin T., Thomas V.M. Modeling the impact of stochastic outages for electricity infrastructure development. *Energy Systems*. 2014, vol. 5, pp. 519-550.
21. Nikolskiy O.K., Kachesova L.Yu., Shanygin I.A. Mathematical model for assessing and managing the risks of accidents in power supply systems. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: operation and repair]. 2018, no. 10, pp. 72-77. (In Russian)

Беляев С.В., Малафеев А.В., Омельченко Е.Я. Разработка оптимальных графиков ремонта оборудования электрических сетей с целью повышения надежности их функционирования // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 2(43). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-4-11)

Belyaev S.V., Malafeev A.V., Omelchenko E.Ya. Development of Optimum Repair Schedule of Electrical Network Equipment to Improve the Reliability of its Functioning. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-4-11)