

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-320-333

УДК 621.311.016.1

## Дискретизация плана ремонтов основного оборудования в электроэнергетической системе

Канд. техн. наук, доц. О. И. Александров<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный технологический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** В статье рассмотрены основные аспекты построения формально-функциональных математических моделей, обеспечивающих систему оперативного разрешения ремонтных заявок в сложной электроэнергетической системе. В соответствии с нормативами ремонтной кампании, ревизии, замены элементов основного оборудования или устройств системной автоматики, включения резервных мощностей, различных переключений и с принятой на практике периодичностью отключений, процесс принятия решения формализуется и автоматизируется в виде задачи составления оптимальных суточных графиков отключений, функционирующей в составе автоматизированной системы диспетчерского управления электроэнергетической системы. Основными проблемами, затрудняющими математическое моделирование процесса принятия решений по оперативным заявкам на ремонт основного электросетевого оборудования электроэнергетической системы, являются необходимость согласованного учета большого количества ограничивающих факторов и показателей эффективности решений; необходимость информационной и алгоритмической взаимосвязи с задачами смежных уровней пространственной, временной и функциональной иерархии; отсутствие разработок по стандартизации информационных структур, позволяющих адекватно отображать процесс поиска решений; вычислительная сложность ряда ограничений задачи оптимизации, подлежащих обязательному учету.

**Ключевые слова:** энергосистема, ремонтная кампания, коммутационные вариации, суточный график нагрузки, математическая модель, краткосрочное планирование отключений

**Для цитирования:** Александров, О. И. Дискретизация плана ремонтов основного оборудования в электроэнергетической системе / О. И. Александров // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 4. С. 320–333. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-320-333

## Sampling of the Plan of Repairs of the Main Equipment in the Electrical Power System

O. I. Alexandrov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The main aspects of creation of the formal-and-functional mathematical models supporting a system for prompt resolution of repair requires in a complex electric power system are

---

**Адрес для переписки**  
Александров Олег Игоревич  
Белорусский государственный  
технологический университет  
ул. Свердлова, 13а,  
220006, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 327-23-97  
sanoleg@mail.ru

**Address for correspondence**  
Alexandrov Oleg I.  
Belarusian State  
Technological University  
13a Sverdlova str.,  
220006, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 327-23-97  
sanoleg@mail.ru

---

considered in the article. In accordance with the standards of repairs, inspections, replacement of elements of the main equipment or devices of a system of automation, inclusion of spare capacity, various switches, as well as with the frequency of outages adopted in practice, the decision-making process is formalized and automated as the problem of scheduling optimal daily schedules of blackouts, functioning as a part of automated system of dispatching management of electric power system. The main problems that hinder mathematical modeling of decision-making concerning operational applications for the repair of the main power equipment of power system are: the need for a coherent account of a large number of limiting factors and indicators of effectiveness of the solutions; the need of information and algorithmic trade-offs with the objectives of adjacent levels of spatial, temporal and functional hierarchy; the lack of developments in the standardization of information structures that adequately reflect the process of finding solutions; the computational complexity of several restrictions of the optimization problem subject to mandatory registration.

**Keywords:** power supply system, repair campaign, switching variations, daily load schedule, mathematical model, short-term scheduling of shutdowns

**For citation:** Alexandrov O. I. (2017) Sampling of the Plan of Repairs of the Main Equipment in the Electrical Power System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (4), 320–333. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-320-333 (in Russian)

## Введение

Обработка поступающих заявок на проводимые ремонтные отключения основного оборудования энергосистемы относится к наиболее трудоемким, трудно формализуемым задачам диспетчерского управления энергосистемами. Здесь рассматриваются принципы построения математической модели в процессе разрешения оперативных заявок на коммутационные вариации (включение/отключение) основного оборудования энергосистемы [1, 3–5]. В соответствии с нормативами ремонтной кампании, ревизии, замены элементов основного оборудования [2, 6] или устройств системной автоматики, включения резервных мощностей, различных переключений и с принятой на практике периодичностью отключений, процесс принятия указанных решений формализуется и автоматизируется в виде задачи составления оптимальных суточных графиков отключений, функционирующей в составе автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) электроэнергетической системы (ЭЭС). Включение этой задачи в состав АСДУ повышает эффективность суточного планирования режима работы энергосистемы путем принятия оптимальных решений относительно моментов отключений в ремонт оборудования, исходя из требований оптимизации основных показателей экономичности и надежности режимов, а также качества электроэнергии с учетом запрашиваемых сроков ремонтов и основных технологических, режимных и организационно-технологических ограничений.

## Постановка задачи

Краткосрочное планирование отключений основного оборудования на первоначальном этапе формирует сбор и обработку информации, содержащейся в заявках нижестоящих подразделений. Каждая заявка имеет определенный ранг (характеристику), в соответствии с которым она рас-

сма­тривается и разрешается лицом, принимающим решение (ЛПР). Ранг зависит от разновидности объекта (воздушная линия (ВЛ), трансформатор, система сборных шин или средства управления) и определяется такими факторами (например, для ВЛ), как:  $r_1$  – заявка аварийная или плановая;  $r_2$  – номинальное напряжение;  $r_3$  – сечение;  $r_4$  – протяженность;  $r_5$  – среднегодовая нагрузка;  $r_6$  – объем трудозатрат;  $r_7$  – продолжительность отключения;  $r_8$  – количество цепей;  $r_9$  – то же сетевых предприятий, обслуживающих данную ВЛ (ремонтируемый участок ВЛ);  $r_{10}$  – обеспеченность резервированием;  $r_{11}$  – то же трудоресурсами.

Таким образом, приоритет каждой заявки  $j$ -го объекта определяется суммарным рангом  $n$  параметров

$$R_j = \sum_{i=1}^n r_{ij} / n,$$

где  $n$  – количество параметров, учитываемых для соответствующей разновидности объекта.

Формализация задачи оперативного рассмотрения заявок на ремонт основного оборудования ЭЭС может быть выполнена с помощью двух принципиально различных подходов: сведения к последовательности задач математического программирования (кардинальная оптимизация) либо использования диалога между диспетчером системы и ЛПР при наличии у них непротиворечивой системы предпочтений (ординальная оптимизация).

Подлежащие разрешению заявки классифицируются на две группы:

- 1) заявки, удовлетворение которых практически не влияет на вероятность возникновения недоотпуска электроэнергии потребителям;
- 2) заявки, связанные с увеличением вероятности возникновения недоотпуска электроэнергии [7].

К первой группе относятся заявки на вывод в ремонт: нормально обесточенных резервных систем и секций сборных шин, обходных систем шин; обходных выключателей; нормально отключенных шиносоединительных выключателей, на которых нет АВР; основных систем или секций сборных шин при наличии нормально обесточенных резервных; выключателей присоединений при наличии обходной системы. Ко второй – все остальные заявки на вывод в ремонт основного электросетевого оборудования и ВЛ. Заявки первой группы размещаются в базовой части графика отключений в соответствии с запрашиваемыми сроками.

Поступившие заявки подвергаются ранжированию по доступным периодам ремонта. Для каждой из них в порядке убывания важности определяются доступные периоды ремонта, не имеющие признаков нежелательности с учетом продолжительности: менее суток – доступный период I ранга – предвыходной день; более суток – то же II ранга – связанная двухдневка.

Затем отбирается период, наиболее близкий к просимому времени. После размещения данной заявки соответствующему периоду присваивается одиночный признак нежелательности последующих заявок. Если для оче-

редной заявки среди доступных периодов не окажется ни одного, не отмеченного признаком нежелательности, то среди отмеченных признаком отыскивается период, занятый наименее важной заявкой.

Проверяется, относится ли соответствующая заявка к тем же РЭУ (ПЭС), что и рассматриваемая. Если относится, то данный период считается условно недоступным, если нет – заявка размещается в нем. Этот период отмечается двукратным признаком нежелательности для последующих заявок. Если для очередной заявки все доступные периоды отмечены двукратным признаком нежелательности или доступного периода вообще нет, то доступным считается ближайший к просимому послевыходной день (т. е. доступным периодом III ранга). Задействованный доступный период III ранга снабжается признаком запрета для последующих заявок. Если для очередной заявки все доступные периоды I или II ранга имеют более чем однократный признак нежелательности, а все доступные периоды III ранга – признак запрета, то среди доступных периодов I или II ранга с наименьшей кратностью признака нежелательности отыскиваются периоды, имеющие наименьшее значение ранга  $r_i$ . Затем проверяется, не относится ли соответствующая заявка к тому же ТЭО, ПЭС, что и рассматриваемая. При положительном решении берется следующее меньшее значение ранга при той же кратности признака. Если ни один из периодов с той же кратностью не подходит, то по тому же принципу рассматриваются временные интервалы с большей кратностью, и так далее до тех пор, пока заявка не будет размещена. После этого кратность нежелательности соответствующего периода увеличивается на единицу.

Сроки начала ремонтов, заявленных на планируемые сутки, по заявкам второй группы оптимизируются по векторному критерию, включающему в себя следующие скалярные:

- 1) максимум минимального по участкам сети резерва пропускной способности ремонтных схем основной электрической сети энергосистемы для наиболее неблагоприятного по данному критерию часа суток;
- 2) минимум максимального по узлам сети отклонения величины напряжения от соответствующего желаемого для данного узла значения в наиболее неблагоприятный по данному критерию час суток;
- 3) минимум потерь энергии в основной сети за сутки;
- 4) минимум суммарного ожидаемого недоотпуска электроэнергии в узлах основной сети от аварийных перерывов электроснабжения за сутки;
- 5) минимум отклонения разрешенного момента начала ремонта от запрашиваемого по заявке с первым в порядке убывания приоритетом;
- 6) минимум длительности ремонта по заявке с первым приоритетом;
- 7) критерии 5, 6 для остальных заявок в порядке убывания их приоритетов.

Оптимизация по указанному векторному критерию производится при учете следующих ограничений, которые должны выполняться в каждый час периода планирования, обычно выходящего за пределы планируемых суток при отсутствии случайных аварийных отключений элементов сети:

связности ремонтных схем основной сети; наличия двустороннего питания у заданного множества узлов; отсутствия недоотпуска электроэнергии потребителям; обеспечения требуемого уровня надежности планируемых ремонтных схем; сохранения активных параметров сети, обеспечивающих устойчивый режим ремонтных схем; возможности вывода в ремонт в течение одного часа единиц основного электросетевого оборудования и ВЛ, находящихся в оперативном управлении диспетчера, в количестве не больше заранее заданного допустимого; условий одновременного ремонта единиц основного электросетевого оборудования и ВЛ, находящихся в административно-хозяйственной принадлежности каждого из подразделений энергосистемы, в количестве не больше заранее заданного допустимого для данного подразделения; возможности вмешательства ЛПП в процесс расчета и коррекции составленного графика с учетом изменившихся условий или поступления внеплановой аварийной заявки.

Началу работы алгоритма для оптимизации графика отключений предшествует выполнение таких алгоритмов, как: прогнозирование графиков нагрузок всех узлов основной сети на период планирования; совмещение по запрашиваемым срокам начала и длительности ремонтов заявок на вывод в ремонт участков ВЛ, находящихся в административно-хозяйственной принадлежности двух или более смежных подразделений нижестоящего по отношению к ТЭО уровня.

Общий алгоритм [8, 9] оптимизации представляет собой вычислительный метод целенаправленного поиска оптимальных вариантов решений, обеспечивающий максимально возможное сокращение перебора промежуточных вариантов, не являющихся допустимыми или наиболее предпочтительными [6]. Частные подзадачи, решаемые в процессе поиска оптимальных решений, состоят в вычислении показателей, необходимых для оценки эффективности рассматриваемого варианта решения и в проверке ограничений задачи.

К числу служебных относятся: алгоритмы формирования начального состояния управляемого объекта на момент, предшествующий началу периода планирования; алгоритмы проверки допустимости ранее принятых, но еще не осуществленных решений, влияющих на планируемый суточный режим; алгоритмы организации взаимодействия рассматриваемой задачи с базой данных (БД) и пользователями задачи и т. д.

### Формализация задачи принятия решений

Пусть имеется множество заявок на вывод в ремонт основного электросетевого оборудования энергосистемы, принятых к моменту решения задачи составления оптимального суточного графика отключений. Тогда каждая заявка характеризуется следующей информацией:

1) кортежем

$$\alpha_j = (a_j, \bar{t}_j, \bar{\theta}_j, \bar{\beta}_j, \rho_j, \vartheta_j, \chi_j),$$

где  $a_j$  – идентификатор элемента;  $\bar{t}_j, \bar{\theta}_j$  – запрашиваемые момент и длительность отключения (здесь и в дальнейшем предполагается, что все рас-

смаатриваемые моменты времени отсчитываются от некоторого фиксированного для данной задачи момента начала отсчета);  $\beta_j, \rho_j, \vartheta_j, \chi_j$  – булевы переменные, принимающие ненулевые значения при наличии специфических для данного элемента особенностей организации ремонтных работ ( $\beta_j = 1$ , если допустимо производить ремонтные работы в ночное время суток, на которые приходится момент начала или конца ремонта;  $\rho_j = 1$ , если допустимо временное включение элемента в работу в ночное время суток;  $\vartheta_j = 1$ , если недопустимо проведение ремонтных работ в выходные дни;  $\chi_j = 1$ , если элемент находится в ведении ЦДС;

2) множеством  $S_j$  ремонтных схем объектов основной электрической сети (электростанций, подстанций, ВЛ с отпайками), вступающих в силу при выводе в ремонт элемента оборудования  $a_j$ , которые либо разрабатываются заранее и утверждаются на длительный период времени, либо действительны только для предстоящего ремонта по данной заявке [10, 11]. При очередном решении задачи суточного планирования отключений из числа всех принятых отбирается множество подлежащих рассмотрению заявок, запрашиваемые моменты открытия которых приходятся на допустимый интервал открытия:

$$A = \left\{ \alpha_j \mid \beta_j \neq 1 \rightarrow \bar{t}_j \in [t^{(0)}, t^{(0)} + \delta], \beta_j = 1 \rightarrow \bar{t}_j \in [t^{(0)}, t^{(0)} + 24] \right\},$$

где  $t^{(0)}$  – принятый на практике момент начала отсчета светлого времени суток, относящийся к планируемому суткам;  $\delta$  – продолжительность светлого времени суток.

Заявки  $a_j \in A$  классифицируются на две группы:

$$A = A' \cup A''; \quad A' \cap A'' = \emptyset,$$

где  $A'' = \{ \alpha_j \mid \alpha_j \in A, S_j = \emptyset \}$  – множество заявок на вывод в ремонт нормально отключенных элементов.

Для заявок  $\alpha_j \in A''$  в качестве оптимального решения принимается запрашиваемое время

$$t_j^{\text{опт}} = \bar{t}_j.$$

Заявки  $\alpha_j \in A'$  распознаются по факту отсутствия соответствующих им ремонтных схем в определенном отношении БД.

Для формирования математической модели принятия решений по заявкам  $\alpha_j \in A'$  используется метод согласования общих и иерархически упорядоченных скалярных критериев оптимальности. Для каждой заявки  $\alpha_j \in A'$  устанавливается приоритет, причем возможны два режима его задания:

1) для всех  $a_j \in A$  при приеме заявки задается степень приоритетности  $v \in [0, 1]$ , которую можно интерпретировать как значение истинности в непрерывной логике утверждения «заявка  $a_j$  является наиболее важной из

принятых». В этом случае для определения приоритетов заявок  $\alpha_j \in A'$  проводится их упорядочение

$$\alpha_{j_1}, \alpha_{j_2}, \dots, \alpha_{j_\omega}, \quad \omega = |A'|, \quad (1)$$

такое, что

$$v_{j_k} > v_{j_{k+1}}, \quad k = \overline{1, \omega - 1},$$

после чего приоритеты находятся как

$$\rho(\alpha_{j_k}) = k, \quad k = \overline{1, \omega};$$

2) приоритеты устанавливаются стандартным способом, учитывающим разную степень мобильности элементов по отношению к изменению сроков ремонтов в сравнении с запрашиваемыми. В этом случае упорядочение вида (1) выполняется исходя из условия

$$\bar{\theta}_{j_k} \geq \bar{\theta}_{j_{k+1}}, \quad k = \overline{1, \omega - 1}.$$

Множество  $U$  допустимых решений  $t = (t_1, t_2, \dots, t_\omega)$  задачи оптимального суточного планирования отключений определяется совокупностью учитываемых ограничений, схемой основной сети ЭЭС на момент  $t^{(0)}$  начала планируемых суток, множеством ранее разрешенных заявок, работы по которым к указанному моменту еще не закончены (или даже не начаты), и прогнозируемыми графиками активных и реактивных нагрузок в узлах сети. Исходя из предположения о возможности начала наиболее длительного ремонта среди запрашиваемых в последний момент планируемых суток, можно определить расчетный период планирования

$$T = \left[ t^{(0)}, t^{(0)} + \max \left( \delta + \max_{\substack{\alpha_j \in A' \\ \beta_j \neq 1}} \bar{\theta}_j(t^{(0)} + \delta), 24 + \max_{\substack{\alpha_j \in A' \\ \beta_j = 1}} \bar{\theta}_j(t^{(0)} + 24) \right) \right], \quad (2)$$

где  $\bar{\theta}_j(t_j)$ ,  $\alpha_j \in A'$  – длительность работы по заявке при открытии ее в момент  $t_j$ .

Множество  $U$  можно представить как объединение двух множеств:

$$U = U' \cup U''; \quad U' = U \setminus U'';$$

$$U'' = \{t \mid \beta_{j_k} \neq 1 \rightarrow t_k \notin [t^{(0)}, t^{(0)} + \delta);$$

$$\beta_{j_k} = 1 \rightarrow t_k \notin [t^{(0)}, t^{(0)} + 24), \quad k = \overline{1, \omega}\},$$

где  $U'$  – множество решений, при которых хотя бы для одной заявки разрешено отключение на ремонт в планируемые сутки;  $U''$  – то же всех тривиальных решений, при которых открытие всех заявок  $\alpha_{j_k} \in A'$  в планируемые сутки запрещено.

Перечисленные выше общие критерии оптимальности можно записать в стандартной форме условий оптимальности при  $t \in U$

$$F_i(t) \rightarrow \max, \quad i = \overline{1,4}, \quad (3)$$

где функции  $F_i(t)$  вычисляются по исходным целевым функциям  $\Phi_i(t)$  указанных критериев:

$$F_1(t) = \Phi_1(t); \quad F_i(t) = 1/\Phi_i(t), \quad i = \overline{2,4}.$$

Важной особенностью задачи, из которой вытекает способ сворачивания всех общих критериев (3) в один скалярный критерий, является то, что каждый из них имеет оптимальное значение при любом тривиальном решении  $t \in U$

$$\max_{t \in U} F_i(t) = \max_{t \in U} F_i(t) = F_{i\max}, \quad i = \overline{1,4}.$$

Если принять ради простоты изложения, что дискретизация расчетного периода планирования проведена в целочисленных точках, соответствующих часам суток, то вместо интервала (2) имеем конечную последовательность

$$\overline{T} = (t^{(0)}, t^{(0)} + 1, \dots, t^{(0)} + \lfloor \underline{L} \rfloor) = \overline{t^{(0)}, t^{(0)} + \lfloor \underline{L} \rfloor}, \quad (4)$$

где

$$L = \max \left( \delta + \max_{\alpha_j \in A''} \bar{\theta}_j(t^{(0)} + \delta), 24 + \max_{\substack{\alpha_j \in A' \\ \beta_j = 1}} \bar{\theta}_j(t^{(0)} + 24) \right).$$

Теперь величины  $F_{i\max}$ ,  $i = \overline{1,4}$ , могут быть определены простым перебором точек указанной последовательности, а общие критерии оптимальности ставятся в равные условия путем использования скалярного критерия

$$\Phi_0(T) = \min_{i=1,4} \frac{F_i(t)}{F_{i\max}} \rightarrow \max, \quad (5)$$

$$t \in U, \quad U \subset \overline{T}^{(0)}. \quad (6)$$

Индивидуальные критерии упорядочиваются лексикографически в соответствии с приоритетами заявок и относительной важностью критериев, относящихся к одной заявке:

$$|t_k(t) - \bar{t}_k| \rightarrow \min; \quad \theta_k(t) \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$\Delta W_k(t) \rightarrow \min, \quad k = \overline{1, \omega},$$

где  $t_k(t)$ ,  $\theta_k(t)$ ,  $\Delta W_k(t)$  – момент начала ремонта, длительность ремонта и недоотпуск, связанные с решением по заявке, имеющей  $k$ -й приоритет.



В дальнейшем  $t_k(t)$  будем называть текущим моментом начала заявки  $\alpha_{jk} \in A'$ , а  $\tau_k(t) = t_k(t) + \theta_k(t)$  – текущим моментом конца заявки  $\alpha_{jk} \in A'$ .

Согласование свернутого общего критерия (3) с индивидуальными критериями (5) проводится на основе метода последовательных уступок, применение которого сводится к тому, что (7) заменяется ограничением

$$\min_{i=1,4} \frac{F_i(t)}{F_{i\max}} \geq \max_{t \in U} \Phi_0(t) - \frac{\varepsilon}{100}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon$  – максимальный проигрыш, %, допустимый по каждому из скалярных критериев (3) при решении задачи лексикографической оптимизации (8).

Поскольку

$$\max_{t \in U} \Phi_0(t) = \max_{t \in U} \min_{i=1,4} \frac{F_i(t)}{F_{i\max}} = \max_{t \in U} \min_{i=1,4} \frac{F_i(t)}{F_{i\max}} = 1,$$

то ограничение (8) упрощается к виду

$$\min_{i=1,4} \frac{F_i(t)}{F_{i\max}} \geq 1 - \frac{\varepsilon}{100}.$$

Альтернативный подход к учету критериев (3) состоит в их лексикографическом упорядочении и задании индивидуальной уступки по каждому критерию. Тогда составление оптимального суточного графика отключений сводится к решению задачи лексикографической оптимизации, где множество  $U$  определяется не только исходными ограничениями задачи, но и дополнительными ограничениями вида

$$\frac{F_i(t)}{F_{i\max}} \geq 1 - \frac{\varepsilon}{100}, \quad i = \overline{1,4}. \quad (9)$$

### Дискретизация пространства решений задачи

Если бы не было ограничений и не требовалось учитывать неточности реализации запланированного графика отключений, то задача лексикографической оптимизации (8) решалась бы тривиально

$$t_k = \overline{t}_k, \quad k = \overline{1, \omega}. \quad (10)$$

Поскольку в действительности должны быть учтены ограничения (6), то (9) можно рассматривать лишь как начальное приближение к искомому решению. Кроме того, для надежного исключения при выполнении ремонтных работ случаев совпадения таких отключений, которые в сочетании друг с другом приводят к нарушению ограничений и в оптимальном графике запланированы как не совпадающие во времени, необходимо при решении задачи оптимизации рассматривать как совпадающие те моменты времени, которые разделены промежутком, меньшим, чем некоторая

величина  $\Delta t$  (например,  $\Delta t = 1/4$  ч). Поэтому в качестве начальных приближений к искомым оптимальным моментам начала работ по заявкам должны быть приняты интервалы времени

$$t_k = \left\lfloor \overline{t}_k / \Delta t \right\rfloor \Delta t, \quad k = \overline{1, \omega}.$$

Тем самым определяется начальный вид конечной последовательности моментов времени, соответствующих различным дискретным состояниям на протяжении периода планирования. Она представляет собой хронологически упорядоченное множество вида

$$\tilde{T} = \overline{T} \cup \left\{ t_k \mid k = \overline{1, \omega}, t_k \neq \Lambda \right\} \cup \left\{ \tau_k \mid k = \overline{1, \omega}, \tau_k \neq \Lambda \right\} \cup (T_0 \cap T),$$

где  $T_0$  – множество моментов начала и конца заявок на ремонт основного оборудования ЭЭС, разрешенных ранее до составления оптимального суточного графика отключений на планируемые сутки;  $\tau_k$  – расчетные моменты подлежащих разрешению заявок, соответствующих моментам начала  $t_k$ ,

$$\tau_k = t_k + \left\lceil \overline{\theta}_k / \Delta t \right\rceil \Delta t, \quad k = \overline{1, \omega}.$$

В процессе использования алгоритма оптимизации в соответствии с определенными правилами должны вводиться новые различные состояния ЭЭС и исключаться из рассмотрения прежде существовавшие. Если  $\tilde{T}$  – последовательность дискретных различных состояний ЭЭС на протяжении периода планирования, имеющаяся в текущий момент оптимизации, то указанные правила состоят в следующем.

1. Пусть  $t^{(v-1)}, t^{(v)}, t^{(v+1)} \in \tilde{T}$  – моменты времени, соответствующие последовательным состояниям, и для заявки  $\alpha_j \in A'_0$  с очередным приоритетом в текущий момент поиска ее оптимального размещения известно, что состояние  $t^{(v-1)}$  недоступно из-за нарушения ограничений и что проверке подлежит положение этой заявки с моментом начала  $t_j > t^{(v-1)}$ . Тогда если  $t^{(v+1)} - t^{(v)} = \Delta t$ , то  $t_j := t^{(v+1)}$ , в противном случае справедливо, что  $t^{(v+1)} - t^{(v)} \geq 2\Delta t$ , и в качестве момента начала принимается  $t_j := t^{(v)} + \Delta t$ , т. е.  $t_j$  вводится как новое состояние

$$\tilde{T} := T \cup \{ t_j \}. \quad (11)$$

Эти случаи показаны соответственно на рис. 1а, б, где  $k \geq 2, k' \geq 1, k'' \geq 1$  и жирной линией отмечен интервал  $[t^{(v-1)}, t^{(v)}]$ , который, как установлено предшествующей проверкой, недоступен для размещения заявки  $\alpha_j$ .

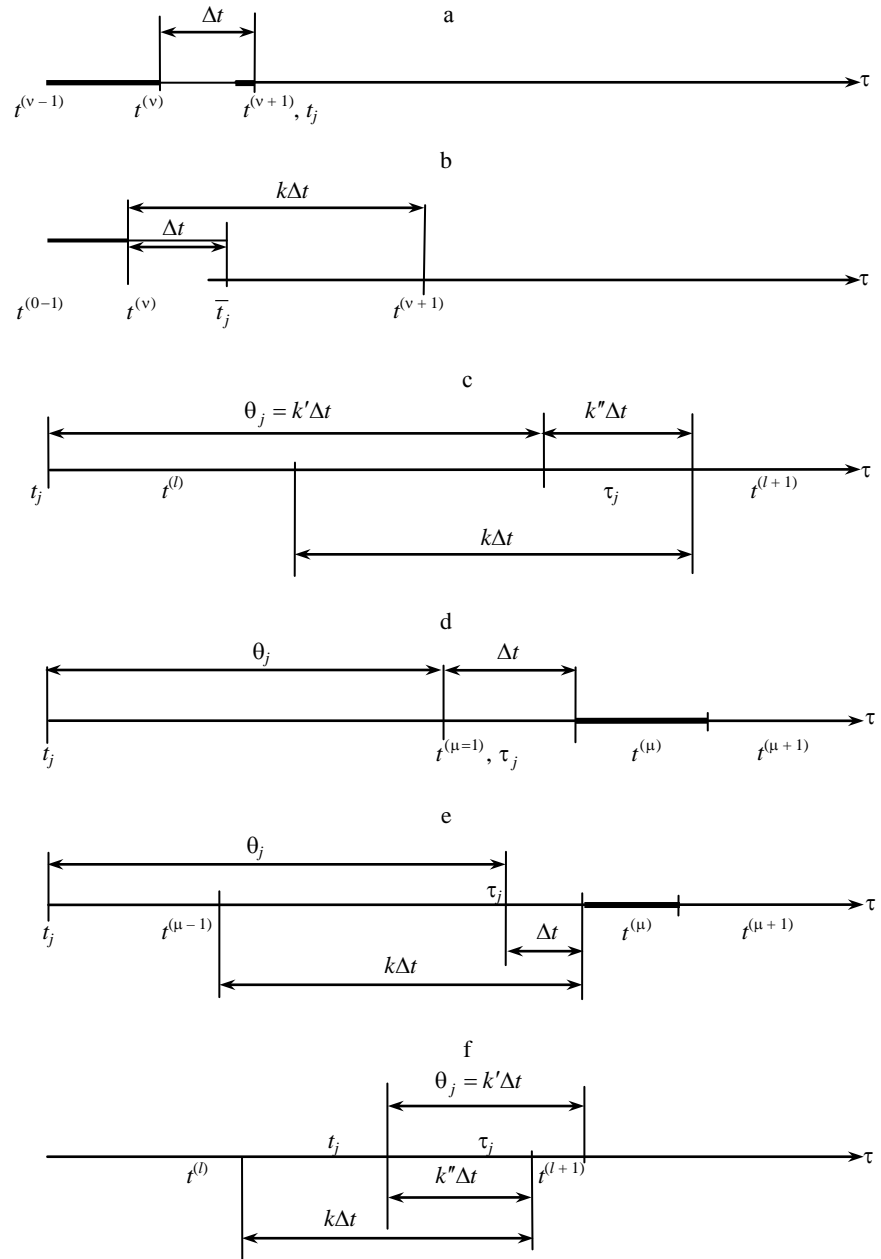


Рис. 1. Схемы, поясняющие введение различимых дискретных состояний  
 Fig. 1. Diagrams illustrating the insertion of distinguishable discrete states

Пусть  $\theta_j$  – длительность отключения, соответствующая моменту  $t_j$  начала заявки. Тогда алгоритм определения  $\theta_j$  при любом текущем векторе  $t$  должен обеспечивать кратность  $\theta_j$  интервалу  $\Delta t$ , т. е. выполнение условия

$$\theta_j / \Delta t = \lceil \overline{\theta_j / \Delta t} \rceil.$$

Если расчетный момент конца заявки

$$\tau_j = t_j + \theta_j \notin \tilde{T},$$

то вводится новое состояние, соответствующее моменту времени  $\tau_j$

$$\tilde{T} := \tilde{T} \cup \{ \tau_j \}. \quad (12)$$

Этот случай проиллюстрирован на рис. 1с.

2. Пусть  $t^{(\mu-1)}, t^{(\mu)} \in \tilde{T}$  – последовательные состояния, и для заявки  $\alpha_j \in A'$  известно, что состояние  $t^{(\mu)}$  недоступно из-за нарушения ограничений и что проверке подлежит положение этой заявки с моментом конца  $\tau_j \leq t^{(\mu)}$  (это соответствует сдвигу заявки из предшествующего положения влево). Тогда если  $t^{(\mu)} - t^{(\mu-1)} = \Delta t$ , то  $t_j := t^{(\mu-1)}$ , в противном случае справедливо, что  $t^{(\mu)} - t^{(\mu-1)} \geq 2\Delta t$ , поэтому  $\tau_j := t^{(\mu)} - \Delta t$ , и  $\tilde{T}$  преобразуется по (12). Этот случай показан на рис. 1d, e.

Если  $\theta_j$  – длительность отключения, соответствующая моменту  $\tau_j$  конца заявки, и расчетный момент начала

$$t_j = \tau_j - \theta_j \notin \tilde{T},$$

то  $\tilde{T}$  преобразуется по (12) (рис. 1f).

Допустимое множество  $U$  решений задачи для составления оптимального суточного плана отключений в любой текущий момент процесса оптимизации определяется условиями  $t_k \in [t^{(0)}, t^{(0)} + \delta] \cap \tilde{T}$  или  $t_k = \Lambda$  для закрываемых заявок, а также набором учитываемых ограничений задачи [10, 11].

Алгоритм решения задачи построен таким образом, что при отказе пользователя от заданных приоритетов они устанавливались бы стандартным способом, учитывающим разную степень мобильности элементов оборудования по отношению к изменениям запрашиваемых сроков ремонтов. С этой точки зрения наиболее оправдано упорядочение заявок по убыванию запрашиваемой длительности ремонта. В части системы управления (руководство ЦДС и административный аппарат энергосистемы) учет человеческого фактора в алгоритме оптимизации сводится к выбору соответствующей математической модели и вычислительного метода. Методика, разработанная на базе данной модели, позволяет получить несколько оптимальных или близких к оптимальному вариантов решения, т. е. графиков отключений для обеспечения возможности выбора окончательного решения на основе интуиции инженера. Как отмечалось выше, это свойство алгоритма обеспечивается применением метода последовательных уступок. Аналогичные свойства имеют алгоритмы, которые могут быть получены на основе метода динамического программирования, если все исходные

критерии оптимальности свернуты тем или иным способом в единый скалярный критерий.

### ВЫВОДЫ

1. Предложена математическая модель для описания системы рассмотрения оперативных заявок на выполнение коммутационных вариаций в электроэнергетической системе.

2. Простота вычислительного алгоритма и адекватность математической модели принятия решений в наибольшей степени обеспечиваются путем распознавания заявок, разрешение которых практически влияет на надежность и экономичность планируемого суточного режима электроэнергетической системы. Процесс идет путем иерархического упорядочения подлежащих оптимизации заявок, что может быть выполнено на основе показателей мобильности элементов оборудования по отношению к изменению сроков ремонта относительно запрашиваемых либо априорной оценки степени важности заявок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич, М. А. Оптимизация эксплуатационного обслуживания электрических сетей / М. А. Короткевич; под ред. А. В. Бережного. Минск: Наука и техника, 1984. 199 с.
2. Нормы времени на капитальный, текущий ремонт и техническое обслуживание подстанций напряжением 35–500 кВ. М.: Информэнерго, 1984. Ч. 2. 212 с.
3. Коварский, Л. Г. Расчетные основы оптимизации ремонта энергооборудования / Л. Г. Коварский. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1985. 12 с.
4. Алгоритмизация задачи составления оптимального месячного графика отключений основного электросетевого оборудования энергосистемы / О. И. Александров [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1991. № 7. С. 10–17.
5. Александров, О. И. Формально-функциональная модель выбора вариантов для экспертной системы оперативного рассмотрения ремонтных заявок в АСДУ ЭЭС / О. И. Александров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1993. № 9–10. С. 9–17.
6. Назарычев, А. Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния / А. Н. Назарычев. Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т. 2002. 168 с.
7. Александров, О. И. Алгоритм определения суточного недоотпуска электроэнергии при разрешении ремонтных заявок в ЭЭС / О. И. Александров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1998. № 4. С. 3–13.
8. Александров, О. И. Автоматизированный контроль режимных параметров при планировании текущих ремонтных отключений в энергосистеме / О. И. Александров, Д. Г. Горячко // Инженер-механик. 2001. Т. 12, № 3. С. 32–33.
9. Alexandrov, O. I. Algorithm of Decision Making on Operative Requests for Repair Switchings-off of the Main Equipment in an Electric Power System / O. I. Alexandrov, A. F. Muihsen // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2002. No 2. P. 53–60.
10. Alexandrov, O. I. Method for Optimum Planning of Generating Equipment Switching-offs for Repair / O. I. Alexandrov // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2009. No 6. P. 27–39.
11. Александров, О. И. Методы анализа текущих ремонтных отключений основного оборудования в сложной электроэнергетической системе / О. И. Александров, С. В. Домников. Минск: Технопринт, 2001. 260 с.

Поступила 27.02.2017 Подписана в печать 03.05.2017 Опубликовано онлайн 28.07.2017

## REFERENCES

1. Korotkevich M. A., Berezhnyi A. V. ed. (1984) *Optimization of Operational Service of Electric Networks*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 199 (in Russian).
2. *Time Rates for Capital, Current Repairs and Maintenance of Substations of 35–500 kV. Vol. 2*. Moscow, Informenergo Publ. 212 (in Russian).
3. Kovarsky L. G. (1985) *Estimated Bases of Optimization of Repair of the Power Equipment*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningr. Office. 12 (in Russian).
4. Alexandrov O. I., Domnikov S. V., Babochkin V. T., Baro Bandia, Orlova V. P. (1991) Algorithmization of a Problem of Drawing up the Optimum Monthly Schedule of Shutdowns of the Capital Network Equipment of a Power Supply System. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (7), 10–17 (in Russian).
5. Alexandrov O. I. (1993) Formal-and-Functional Model of the Choice of Options for the Expert System of Expeditious Consideration of Repair Applications in ASDS EES. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (9–10), 9–17 (in Russian).
6. Nazarychev A. N. (2002). *Methods and Models of Optimization of Repair of Electric Equipment of Power Industry Facilities Taking into Account Technical Condition*. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University. 168 (in Russian).
7. Alexandrov O. I. (1998) Algorithm of Definition of a Daily Inefficient Output of the Electric Power at Permission of Repair Applications in EES. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 3–13 (in Russian).
8. Alexandrov O. I., Goryachko, D. G. (2001). The Automated Control of Regime Parameters when Planning the Current Repair Shutdowns of a Power Supply System. *Inzhener-Mekhanik = The Mechanical Engineer*, 12 (3), 32–33 (in Russian).
9. Alexandrov O. I., Muhsen A. F. (2002) Algorithm of Decision Making on Operative Requests for Repair Switchings-off of the Main Equipment in an Electric Power System. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, (2), 53–60.
10. Alexandrov O. I. (2009) Method for Optimum Planning of Generating Equipment Switching-offs for Repair. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, (6), 27–39.
11. Alexandrov O. I., Domnikov S. V. (2001) *Methods of the Analysis of the Current Repair Shutdowns of the Capital Equipment of a Complex Electrical Power System*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 260 (in Russian).

Received: 27 February 2017

Accepted: 3 May 2017

Published online: 28 July 2017