

УДК 621.311:62 – 503.55.001.6

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕДООТПУСКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ ПЛАНИРОВАНИИ РЕМОНТНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Канд. техн. наук, доценты АЛЕКСАНДРОВ О. И., ДОМНИКОВ С. В.,  
инж. ЗГАЕВСКАЯ Г. В., ЖУКОВСКАЯ Т. Е.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Одним из индивидуальных критериев оптимального размещения оперативных заявок на отключение основного оборудования ЭЭС является величина недоотпуска  $\Delta W(t)$  электроэнергии потребителям, с которыми не предусматривается согласовывать перевод на резервные схемы питания при ремонтах нормально питающих их объектов [1].

Специально подготовленная для определения  $\Delta W(t)$  исходная информация включает в себя следующие компоненты:

1) множество  $W$  ремонтных схем объектов основной сети ЭЭС, предусматривающих перевод отдельных групп потребителей на резервное питание:

$$R = \{s(v, j) \mid b_v \in B, a_j \in E, \gamma(v, j) = 1\};$$

2) множество кортежей группы потребителей, переводимых на общий резервный источник питания (узел основной сети ЭЭС; сеть, не входящая в состав основной) при вступлении в силу ремонтных схем  $s(v, j) \in R$ :

$$\tilde{M}^{(2)} = \{\tilde{\mu}(v, j) \mid s(v, j) \in W\},$$

где кортежи  $\tilde{\mu}(v, j) \in \tilde{M}^{(R)}$  имеют следующую структуру:

$$\tilde{\mu}(v, j) = ((l, v, j), \mu(v, j));$$

$$\mu(v, j) = ((\mu_1, w_1, x_1^H, X_1^P), (\mu_2, w_2, x_2^H, X_2^P), \dots, (\mu_{M_j}, w_{n_j}, x_{M_j}^H, X_{n_j}^P)).$$

Здесь  $(l, v, j)$  – идентификатор ремонтной схемы  $s(v, j)$ ;  $\mu_i \in M, i = \overline{1, n_j}$ , – то же, группы потребителей, переключаемых на общий резервный источник ( $M$  – множество таких групп в основной сети ЭЭС);

$$w_i = \begin{cases} 0, & \text{если с потребителями группы } \mu_i \text{ перевод на резервное питание при} \\ & \text{вступлении в силу ремонтной схемы } s(v, j) \text{ не должен согласовываться;} \\ 1, & \text{то же, должен согласовываться;} \end{cases}$$

$x_i^H \in X$  — сквозной номер узла основной сети ЭЭС, нормально питающего группу  $\mu_i$ ;  $X_i^P = (x_i^P, s_i^P)$ , если при вступлении в силу ремонтной схемы  $s(v, j)$  группа  $\mu_i$  переводится на резервное питание от узла  $x_i^P \in X$ , к которому в нормальной схеме соответствующего объекта подключены трансформаторы с суммарной номинальной мощностью  $S_i^P$  и  $X_i^P = (\Lambda, \Lambda)$ , если группа  $\mu_i$  при указанном выше условии переводится на питание от сети, не входящей в состав основной сети ЭЭС;

3) графики активных и реактивных нагрузок для потребителей, которые при ремонтных схемах объектов основной сети ЭЭС переключаются на резервное питание от общего источника:

$$p_\mu(t^{(r)}), q_\mu(t^{(r)}), \mu \in M, \delta(t^{(r)}) \in \sum(t);$$

4) последовательность моментов времени

$$t^{r_H}, t^{r_H+1}, \dots, t^{r_k}, \delta(t^{(r)}) \in \sum(t), r = \overline{r_H, r_k}, \quad (1)$$

удовлетворяющих условиям

$$t^{r_H} \leq t_k, t^{r_k} \leq \tau_k;$$

5) графики активных и реактивных нагрузок в потребляющих узлах основной сети ЭЭС для состояний (1)

$$p_h(t^{(r)}), q_h(t^{(r)}), h \in Y, r = \overline{r_H, r_k}.$$

Исходной информацией для расчета периода планирования  $\overline{\tau_\alpha, \tau_\omega}$ , где  $\overline{\tau_\alpha, \tau_\omega}$  — соответственно моменты начала и конца периода в часах, считая от начала года, служит дата  $t$  планируемых суток в днях, считая от начала года. Момент начала периода планирования определяется как [2]:

$$\tau_\alpha = 24(t_0 - 1) + 1.$$

Момент  $\tau_\omega$  находится в зависимости от наиболее позднего из возможных моментов окончания ремонта (точные моменты окончания ремонтов не известны вплоть до завершения процесса решения задачи составления оптимального суточного графика отключений), который получится, если ремонт с наиболее длительным просимым сроком отключения начать в последний час планируемых суток.

Определение базовой части графика изменений схемы основной сети энергосистемы состоит в нахождении для каждого часа  $t \in \overline{\tau_\alpha, \tau_\omega}$  периода планирования двух множеств заявок:

1) закрываемых в  $t$ -й час –

$$\Delta \overline{B}_t = \left\{ \left( \overline{a}_j^{(-\ell)}, \overline{\theta}_j^{(-\ell)}, \overline{\tau}_j^{(-\ell)} \right) \mid \left( \overline{a}_j^{(-\ell)}, \overline{\theta}_j^{(-\ell)}, \overline{\tau}_j^{(-\ell)} \right) \in \bigcup_{\ell=1}^m \overline{A}_\ell, \overline{\tau}_j^{(-\ell)} + \overline{\theta}_j^{(-\ell)} - 1 = t \right\}, \quad (2)$$

т. е. множество проводимых к моменту  $\tau_\alpha$  ремонтов, которые в соответствии с поданными заявками будут завершены в момент  $t$ ;

2) открываемых в  $t$ -й час –

$$\Delta \overline{B}_t = \left\{ \left( \overline{a}_j^{+(\ell)}, \overline{\theta}_j^{+(\ell)}, \overline{\tau}_j^{+(\ell)} \right) \mid \left( \overline{a}_j^{+(\ell)}, \overline{\theta}_j^{+(\ell)}, \overline{\tau}_j^{+(\ell)} \right) \in \bigcup_{\ell=1}^m \overline{A}_\ell, \overline{\tau}_j^{+(\ell)} = t \right\}, \quad (3)$$

т. е. множество ремонтов, которые должны быть начаты в момент  $t$  в соответствии с уже разрешенными заявками.

Если для некоторого  $t \in \overline{t_\alpha, t_\omega}$  ни для какого  $i = \overline{1, m}$  не найдется ни одной такой заявки  $\overline{\alpha}_j^{(-\ell)} = \left( \overline{a}_j^{(-\ell)}, \overline{\theta}_j^{(-\ell)}, \overline{\tau}_j^{(-\ell)} \right) \in \overline{A}_\ell$ , что  $\overline{\tau}_j^{(-\ell)} + \overline{\theta}_j^{(-\ell)} - 1 = t$ , то для этого  $t$  в соответствии с (2) получим  $\Delta \overline{B}_t = \emptyset$ . Если же для некоторого  $t \in \overline{t_\alpha, t_\omega}$  ни для какого  $\ell = \overline{1, m}$  не найдется ни одной заявки  $\overline{\alpha}_j^{+(\ell)} = \left( \overline{a}_j^{+(\ell)}, \overline{\theta}_j^{+(\ell)}, \overline{\tau}_j^{+(\ell)} \right) \in \overline{A}_\ell$ , что  $\overline{\tau}_j^{+(\ell)} = t$ , то из (3) будем иметь  $\Delta \overline{B}_t = \emptyset$ .

Для исполнения алгоритма поиска оптимального суточного графика отключений базовую часть графика изменений схемы основной сети удобнее представлять в форме хронологической последовательности базовых ремонтных схем на каждый час  $t$  периода планирования. В качестве базовой ремонтной схемы на час  $t \in \overline{t_\alpha, t_\omega}$  принимается схема основной сети энергосистемы, которая имела бы место при неучете подлежащих разрешению заявок. Для построения последовательности базовых ремонтных схем используется следующая исходная информация:

1) совокупность нормальных схем объектов, соответствующих закрываемым заявкам, и ремонтных схем объектов, соответствующих открываемым заявкам, хранящимся в разделе информационной базы «Нормальные и ремонтные схемы объектов основной сети»;

2) хранящаяся в разделе информационной базы «Текущее состояние схемы» информация о схеме основной сети энергосистемы (с учетом резервных связей, соответствующих переводу потребителей на резервное питание) на момент последней коррекции информационной базы;

3) определенная базовая часть графика изменений схемы основной сети энергосистемы на период планирования.

Раздел «Нормальные и ремонтные схемы объектов основной сети энергосистемы» состоит из подразделов, соответствующих идентификаторам  $X_{v, v = \overline{1, N}}$ , объектов основной сети (подстанций и электростанций), где  $N$  – количество объектов (эти подразделы будем условно идентифицировать тем же идентификатором  $X_v$ , что и соответствующий объект). Подразделы сгруппированы в области  $X^{(\ell)}$ ,  $\ell = \overline{1, m}$ , такие,

что из  $X_v \in X^{(\ell)}$ ,  $X_\mu \in X^{(\ell)}$ ,  $\mu \neq v$ , следует, что объекты  $X_v$ ,  $X_\mu$  находятся в административно-хозяйственной принадлежности  $\ell$ -го подразделения энергосистемы.

Подраздел  $X_v$  содержит кортеж  $s_v^{(\ell)}$ , описывающий нормальную схему объекта  $X_v$ , и кортежи  $s_v^{(i)}$ ,  $i = \overline{1, N_v}$ , каждый из которых описывает одну ремонтную схему этого объекта.

Кортеж  $s_v^{(0)}$  состоит из:

1) одинакового для всех объектов  $X_v$ ,  $v = \overline{1, N}$ , идентификатора  $\Delta_0$  нормальной схемы;

2) подкортежей  $r_{v0}^{(j)}$ ,  $j = \overline{1, k_v}$ , описывающих элементы основного электросетевого оборудования объекта  $X_v$ , таких, что:

положение элемента (включенное или отключенное) определяет состояние (замкнутое или разомкнутое) одной из цепей схемы электрических соединений объекта (ВЛ; кабельные линии; двухобмоточные трансформаторы; шиносоединительные и секционные выключатели; отделители и разъединители; обмотки трехобмоточных трансформаторов; обходные выключатели);

элемент может являться узлом схемы электрических соединений (рабочие и резервные системы или секции сборных шин; условные точки соединения обмоток трехобмоточного трансформатора; точки присоединения отпаяк к ВЛ; обходные системы шин).

Таким образом, кортежи  $s_v^{(0)}$  имеют вид

$$s_v^{(0)} = (\Delta_0, r_{v0}^{(1)}, r_{v0}^{(2)}, \dots, r_{v0}^{(k_v)}).$$

Каждый из подкортежей  $r_{v0}^{(j)}$ ,  $j = \overline{1, k_v}$ , состоит из следующих элементов:

идентификатора  $a_v^{(j)}$  элемента оборудования;

признака  $b_{v0}^{(j)}$ , который имеет одно из трех возможных значений:  $b_{v0}^{(j)} = 0$  — отключенное состояние ветви или обесточенное состояние узла;  $b_{v0}^{(j)} = 1$  — включенное состояние ветви или нахождение узла под напряжением;  $b_{v0}^{(j)} = 2$  — ветвь отключена, но может автоматически включиться в работу при срабатывании АВР;

3) подкортежа  $C_{v0}^{(j)}$  вида  $C_{v0}^{(j)} = (C_{v0h}^{(j)}, C_{v0k}^{(j)})$ ; если элемент  $a_v^{(j)}$  соответствует цепи схемы электрических соединений,  $C_{v0h}^{(j)}, C_{v0k}^{(j)}$  являются идентификаторами соответственно начального и конечного узлов цепи, а если элемент  $a_v^{(j)}$  соответствует узлу, то

$$C_{v0h}^{(j)} = C_{v0k}^{(j)} = a_v^{(j)}.$$

Каждый из кортежей  $s_v^{(i)}$ ,  $i = \overline{1, N_v}$ , состоит из:

идентификатора  $\Lambda_v^{(i)}$  элемента основного электросетевого оборудования энергосистемы, при отключении которого вступает в силу ремонтная схема, описываемая кортежем  $s_v^{(i)}$ . Обычно  $\Lambda_v^{(i)} = a_v^{(k)}$ , при котором  $k = \overline{1, k_v}$ , однако возможны случаи, когда  $\Lambda_v^{(i)} = a_\mu^{(k)}$  при  $\mu \neq v, k = \overline{1, k_\mu}$ ;

подкортежей  $r_{vi}^{(j)}$ , имеющих для схемы  $s_v^{(i)}$  смысл, аналогичный кортежам  $r_{v0}^{(j)}$  для схемы  $s_v^{(0)}$ .

Кроме кортежей  $s_v^{(i)}, i = \overline{0, N_v}$ , каждый подраздел  $X_v, v = \overline{1, N}$ , содержит:

1) подразделы  $s_v, v = \overline{1, N}$ , перекодировочного словаря, который дает каждому элементу  $a_v^{(j)}, j = \overline{1, k_v}$ , электросетевого оборудования объекта  $X_0$ , соответствующему ветви схемы электрических соединений, — сквозной порядковый номер  $I(a_v^{(j)})$  ветви полной схемы основной сети энергосистемы (т. е. такой условной схемы, в которой все основные и резервные связи одновременно включены);

каждому элементу  $a_v^{(j)}, i = \overline{1, k_v}$ , электросетевого оборудования объекта  $X_v$  (соответствующему узлу схемы электрических соединений) — сквозной порядковый номер  $J(a_v^{(j)})$  узла указанной полной схемы основной сети энергосистемы;

2) матрицы соединений  $M_v^{(i)}, v = \overline{1, N}, i = \overline{0, N_v}$ , в виде списков ветвей, инцидентных узлам графов  $(X_v^{(i)}, \Gamma_v^{(i)})$ , соответствующих нормальной и ремонтным схемам объекта  $X_v$ , где  $X_v^{(i)}, \Gamma_v^{(i)}$  — множества узлов и ветвей в графе ремонтной схемы, описываемой кортежем  $s_v^{(i)}$ ;

3) списки  $H_v^{(i)}, v = \overline{1, N}, i = \overline{0, N_v}$ , ветвей, отключенных, но не находящихся под действием АВР, в ремонтных схемах, описываемых кортежами  $s_v^{(i)}$ .

Матрицы  $M_v^{(i)}$  и списки  $H_v^{(i)}, v = \overline{1, N}, i = \overline{0, N_v}$ , легко составляются с помощью подразделов  $s_v$  перекодировочного словаря и значений параметров  $b_{vi}^{(j)}, j = \overline{1, k_v}$ , определяющих замкнутые или разомкнутые состояния ветвей схем электрических соединений, от которых, в свою очередь, зависит, входит или не входит любой конкретный узел полной схемы основной сети в данную ремонтную схему.

Раздел информационной базы «Текущее состояние схемы» содержит кортежи  $s_v(\tau_0), v = \overline{1, N}$ , соответствующие нормальным либо ремонтным схемам объектов энергосистемы, имевшим место на момент  $\tau_0$  (отсчитываемый в часах, считая с начала года) последней коррекции информационной базы и передаваемые в раздел «Текущее состояние схемы» из раздела «Нормальные и ремонтные схемы объектов» в соответствии с вводимой в ПЭВМ информацией из оперативного журнала о происшедших отключениях и включениях из ремонта элементов основного

электросетевого оборудования. Кроме того, раздел «Текущее состояние схемы» содержит матрицу  $\mathbf{M}(\tau_0)$  графа оперативной схемы основной сети энергосистемы, соответствующую графу  $(X(\tau_0), \Gamma(i_0))$ , который получается объединением подграфов  $(X_v(\tau_0), \Gamma_v(\tau_0)), v = \overline{1, N}$ , нормальных или ремонтных схем объектов  $X_v$  на момент  $\tau_0$ , описываемого кортежами  $s_v(\tau_0), v = \overline{1, N}$ ,

$$X(\tau_0) = \bigcup_{v=1}^N X_v(\tau_0); \quad \Gamma(\tau_0) = \bigcup_{v=1}^N \Gamma_v(\tau_0)$$

и список  $\mathbf{H}(\tau_0)$ , получающийся объединением списков  $\mathbf{H}_v(\tau_0)$ , описываемых кортежами  $s_v(\tau_0)$ :  $\mathbf{H}(\tau_0) = \bigcup_{v=1}^N \mathbf{H}_v(\tau_0)$ .

Для того чтобы по указанной совокупности исходной информации начать формирование последовательности базовых ремонтных схем основной сети энергосистемы на период планирования  $\overline{\tau_\alpha, \tau_\omega}$ , необходимо предварительно дополнить базовую часть графика изменений схемы на период  $\overline{\tau_\alpha, \tau_\omega}$  (т. е. совокупность пар множеств  $\overline{\Delta B_t, \Delta B_t^+}, t = \overline{\tau_\alpha, \tau_k}$ ) объединением пар множеств  $\overline{\Delta B_t, \Delta B_t^+}$  соответственно закрываемых и открываемых заявок на период  $\tau_0 + 1, \tau_\alpha - 1$  между моментом  $\tau_0$  последней коррекции информационной базы и моментом  $\tau_\alpha$  начала периода планирования. Выделение множеств  $\overline{\Delta B_t, \Delta B_t^+}$  при  $t = \overline{\tau_0 + 1, \tau_\alpha - 1}$  выполняется согласно с (2) и (3).

Пусть известна ремонтная схема основной сети энергосистемы на момент  $t - 1 \in \overline{\tau_0 + 1, \tau_\omega}$ , представленная  $(X(t-1), \Gamma(t-1))$  и списком  $\mathbf{H}(t-1)$ , и требуется найти ремонтную схему  $(X(t), \Gamma(t))$  и список  $\mathbf{H}(t)$  на момент  $t$ . Для этого необходимо:

1) с помощью множеств  $\overline{\Delta B_t, \Delta B_t^+}$  соответственно открываемых и закрываемых заявок на момент  $t$  определить множества:

$\overline{\Delta X_t^{(1)}, \Delta \Gamma_t^{(1)}}$  узлов и ветвей, добавляемых к графу  $(X(t-1), \Gamma(t-1))$ , и множество  $\overline{\Delta \mathbf{H}_t^{(1)}}$  ветвей, добавляемых к списку  $\mathbf{H}(t-1)$ , вследствие завершения ремонтов, характеризующихся множеством заявок  $\overline{\Delta B_t}$ ;

$\overline{\Delta X_t^{(2)}, \Delta \Gamma_t^{(2)}}$  узлов и ветвей, исключаемых из графа  $(X(t-1), \Gamma(t-1))$ , и множество  $\overline{\Delta \mathbf{H}_t^{(2)}}$  ветвей, исключаемых из списка  $\mathbf{H}(t-1)$ , вследствие завершения ремонтов, характеризующихся множеством закрываемых заявок  $\overline{\Delta B_t^+}$ ;

$\overline{\Delta X_t^{+(1)}, \Delta \Gamma_t^{+(1)}}$  узлов и ветвей, добавляемых к графу  $(\overline{X(t)}, \overline{\Gamma(t)})$ , множества  $\overline{\Delta \mathbf{H}_t^{+(1)}}$  ветвей, присоединяемых к списку  $\overline{\mathbf{H}}$ , при реализации открываемых заявок на момент  $t$ ;

$\Delta X_t^{+(2)}, \Delta \Gamma_t^{+(2)}$  узлов и ветвей, исключаемых из графа  $(\bar{X}(t), \bar{\Gamma}(t))$ , и множества  $\Delta H_t^{+(1)}$  ветвей из списка  $\bar{H}(t)$ , при реализации открываемых заявок на момент  $t$ .

Здесь

$$\begin{cases} \bar{X}(t) = \left( X(t-1) \cup \Delta \bar{X}_t^{(1)} \right) \Delta \bar{X}_t^{(1)}; \\ \bar{\Gamma}(t) = \left( \Gamma(t-1) \cup \Delta \bar{\Gamma}_t^{(1)} \right) \Delta \bar{\Gamma}_t^{(1)}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{H}(t) = \left( H(t-1) \cup \Delta \bar{H}_t^{(1)} \right) \Delta \bar{H}_t^{(1)}; \quad (5)$$

2) определить искомые граф  $(X(t), \Gamma(t))$  и список  $H(t)$ :

$$\begin{cases} X(t) = \left( \bar{X}(t-1) \cup \Delta X_t^{+(1)} \right) \Delta X_t^{+(2)}; \\ \Gamma(t) = \left( \bar{\Gamma}(t) \cup \Delta \Gamma_t^{+(1)} \right) \Delta \Gamma_t^{+(2)}; \end{cases} \quad (6)$$

$$H(t) = \left( \bar{H}(t) \cup \Delta H_t^{+(1)} \right) \Delta H_t^{+(2)}. \quad (7)$$

Таким образом, все формирование сводится к определению  $\Delta \bar{X}_t^{-(\lambda)}, \Delta \bar{\Gamma}_t^{-(\lambda)}, \Delta \bar{H}_t^{-(\lambda)}, \Delta H_t^{+(\lambda)}, \lambda = 1, 2$ , по известному множеству  $\Delta \bar{B}_t$  и множеств  $\Delta X_t^{+(\lambda)}, \Delta \Gamma_t^{+(\lambda)}, \Delta H_t^{+(\lambda)}, \lambda = 1, 2$ , по известному множеству  $\Delta B_t^+$ .

Рассмотрим процесс определения  $\Delta \bar{X}_t^{-(\lambda)}, \Delta \bar{\Gamma}_t^{-(\lambda)}, \Delta \bar{H}_t^{-(\lambda)}$ . Чтобы получить последовательности базовых ремонтных схем основной сети энергосистемы, необходимо выполнить описанный процесс построения схем  $(X(t), \Gamma(t), H(t))$  по известным  $(X(t-1), \Gamma(t-1), H(t-1))$ , начиная с  $(t-1) = \tau_0$ , чему соответствует схема  $(X(\tau_0), \Gamma(\tau_0), H(\tau_0))$ , хранящаяся в разделе информационной базы «Текущее состояние схемы», и кончая  $t = \tau_\omega$ . Тогда схемы

$$(X(t), \Gamma(t), H(t)), t = \overline{\tau_0, \tau_\omega},$$

образуют искомую последовательность базовых ремонтных схем.

Эта последовательность хранится в разделе информационной базы «Ремонтные схемы основной сети на период планирования». Если для некоторого  $t \in \overline{\tau_0, \tau_\omega}, \bar{B}_t = \emptyset, B_t^+ = \emptyset$ , то, как следует из (4)–(7),

$$X(t) = X(t-1), \Gamma(t) = \Gamma(t-1), H(t) = H(t-1).$$

В этом случае, разумеется, не нужно дублировать схему  $(X(t-1), \Gamma(t-1), H(t-1))$  в информационной базе. Достаточно в подразделе базы, отводимом под очередную схему  $(X(t), \Gamma(t), H(t))$ , предусмотреть поле для записи счетчика повторений этой схемы в момент периода планирования, непосредственно следующий за моментом  $t$ .

Определение оптимального суточного графика отключений электро сетевого оборудования, в частности, величины недоотпуска электроэнергии потребителям, требует наличия прогнозов активных и реактивных нагрузок узлов, являющихся сборными шинами или секциями сборных шин низшего напряжения подстанций основной сети, на каждый час периода планирования. Информация о ретроспективных значениях нагрузок узлов (в различных перечисленных выше вариантах) хранится в разделе информационной базы «Статистика нагрузок», а о номинальных параметрах трансформаторов — в разделе «Перечень основного оборудования и ВЛ энергосистемы».

Так как в процессе поиска оптимального суточного графика отключений соответствующие алгоритмы будут отыскивать варианты ремонтных схем основной сети, в которых узлы, требующие двустороннего питания, не имеют такового, то для решения рассматриваемой задачи достаточно запрогнозировать на период планирования  $\tau_\alpha, \tau_\omega$  лишь нагрузки узлов, не требующих двустороннего питания, так как только для таких узлов возможен недоотпуск электроэнергии, если гарантировано наличие двустороннего питания у остальных узлов. Информация о множестве узлов, требующих двустороннего питания, хранится в соответствующем разделе информационной базы. Результаты работы данного блока алгоритма записываются в раздел информационной базы «Запрогнозированные графики нагрузок узлов на период планирования».

Таким образом, требуется для заданного размещения заявки определить величину

$$\Delta W_k(t) = \sum_{r=r_H}^{j_k} \Delta P_k^{(r)} \Delta t^{(r)}, \quad (8)$$

где  $\Delta P_k^{(r)}$  — снижение активной мощности в состоянии  $\delta^{(r)}(t) \in \sum(t)$ ,

$$\Delta t^{(r)} = \begin{cases} t^{(r+1)} - t^{(r)}, & r_H < r < r_k; \\ t^{(r+1)} - t_k, & r = r_H; \\ \tau_k - t^{(r)}, & r = r_k. \end{cases}$$

В соответствии с (8) определение критерия  $\Delta W_k(t)$  сводится к вычислению величин  $\Delta P_k^{(r)}$  для состояний  $\delta^{(r)}(t) \in \sum(t)$ ,  $r = \overline{r_H, r_k}$ .

Предварительно должно быть сформировано множество  $M_k^{(R)} \in M^{(R)}$  кортежей групп потребителей, переводимых на общие резервные источники питания в связи с отключением в ремонт элемента  $a_{j_k}$  по данной заявке, для чего:



1) принимается

$$\tilde{M}_k^{(R)} = \emptyset;$$

2) по элементу кортежа  $\tilde{\alpha}_{jk} \in \tilde{A}'$

$$\Pi^+(j) = Pr(\tilde{\alpha}_{jk})$$

определяются позиции кортежей ремонтных схем  $s(v, j)$ , соответствующих отключению  $a_{jk}$ , в массиве, отводимом для хранения схем объектов;

3) из соответствующих позиций извлекаются значения переменных

$$\gamma(v, j) = Pr(s(\gamma, j))$$

и проверяется условие

$$\gamma(v, j) = 1.$$

Если оно выполняется, то

$$\tilde{M}_k^{(R)} := \tilde{M}_k^{(R)} \cup \{\mu(v, j)\}.$$

Затем проводится разбиение множества резервируемых при отключении  $a_{jk}$  групп потребителей

$$M_k^{(R)} = \{\mu_i | (\mu_i, w_i, x_i^H, X_i^P) \in \mu(v, j), \tilde{\mu}(v, j) \in \tilde{M}_k^{(R)}\}$$

на непересекающиеся подмножества

$$M_k^{(R)} = M_{k,1}^{(R)} \cup M_{k,2}^{(R)} \cup M_{k,3}^{(R)} \cup M_{k,4}^{(R)},$$

где

$$M_{k,1}^{(R)} = \{\mu_i | \mu_i \in M_k^{(R)}, w_i = 0, X_i^P \neq (\Lambda, \Lambda)\};$$

$$M_{k,2}^{(R)} = \{\mu_i | \mu_i \in M_k^{(R)}, w_i = 0, X_i^P = (\Lambda, \Lambda)\};$$

$$M_{k,3}^{(R)} = \{\mu_i | \mu_i \in M_k^{(R)}, w_i = 1, X_i^P \neq (\Lambda, \Lambda)\};$$

$$M_{k,4}^{(R)} = \{\mu_i | \mu_i \in M_k^{(R)}, w_i = 1, X_i^P = (\Lambda, \Lambda)\},$$

и выделяются множества  $Y_{k,1} \subset Y, Y_{k,2} \subset Y$  нагруженных потребительских узлов основной сети ЭЭС, соответственно осуществляющих нормальное и резервное питание групп потребителей  $\mu_i \in M_k^{(R)}$ ,

$$Y_{k,1} = \{h | h = x_i^H, \mu_i \in \tilde{M}_k^{(R)}\};$$

$$Y_{k,2} = \{f | f = Pr_i(X_i^P), \mu_i \in \tilde{M}_k^{(R)}\}.$$

Алгоритм определения величины  $\Delta P_k^{(r)}$  для очередного  $t^{(r)}$  заключается в коррекции активных и реактивных нагрузок в узлах:

1)  $h \in Y_{k,1}$  –

$$p_h(t^{(r)}) := p_h(t^{(r)}) - \sum_{\mu_i \in \Delta M^H(h)} p_{\mu_i}(t^{(r)});$$

$$q_h(t^{(r)}) := q_h(t^{(r)}) - \sum_{\mu_i \in \Delta M^H(h)} q_{\mu_i}(t^{(r)}),$$

где

$$\Delta M^H(h) = \{\mu_i | \mu_i \in M_k^{(R)}, x_i^H = h\};$$

2)  $h \in Y_{k,2}$  –

$$p_f(t^{(r)}) := p_f(t^{(r)}) + \sum_{\mu_i \in \Delta M_1^P(f)} p_{\mu_i}(t^{(r)});$$

$$q_f(t^{(r)}) := q_f(t^{(r)}) + \sum_{\mu_i \in \Delta M_1^P(f)} q_{\mu_i}(t^{(r)}),$$

где

$$\Delta M_1^P(f) = \{\mu_i | \mu_i \in M_{k,1}^{(R)}, P_1(X_i^P = f)\};$$

3)  $f \in Y^{(l)}$  –

$$p_f(t^{(r)}) := p_f(t^{(r)}) + P[f, t^{(r)}, M_{k,2}^{(R)}] \sum_{\mu_i \in M_{k,2}^{(R)}} p_{\mu_i}(t^{(r)});$$

$$q_f(t^{(r)}) := q_f(t^{(r)}) + P[f, t^{(r)}, M_{k,2}^{(R)}] \sum_{\mu_i \in M_{k,2}^{(R)}} q_{\mu_i}(t^{(r)}),$$

где  $P[f, t^{(r)}, M_{k,2}^{(R)}]$  – вероятность того, что произвольная группа потребителей  $\mu_i \in M_{k,2}^{(R)}$  в состоянии  $\delta(t^{(r)}) \in \sum(t)$  в результате регулировочных мероприятий по изменению схемы сети, не входящей в состав основной сети ЭЭС, запитана от узла  $f \in Y^{(l)}$ . Эта вероятность априорно оценивается как

$$P[f, t^{(r)}, M_{k,2}^{(R)}] = \frac{\sqrt{S_f^2 - (p_f(t^{(r)}))^2 - (q_f(t^{(r)}))^2}}{\sum_{x \in Y^{(l)}} \sqrt{S_x^2 - (p_x(t^{(r)}))^2 - (q_x(t^{(r)}))^2}},$$

где  $S_f$  – суммарная номинальная мощность трансформаторов, подключенных в нормальной схеме соответствующего объекта к узлу  $f \in Y^{(l)}$ ;

4) по идентификатору  $l$ -го подразделения ЭЭС, в принадлежности которого находится  $\nu$ -й объект, определяется множество  $Y^{(l)} \subset Y$  нагруженных потребительских узлов основной сети ЭЭС, относящихся к этому подразделению и не принадлежащих объектам, по которым имеются открытые заявки  $\alpha'_{jk} \in A'$  в состоянии  $\delta(t^{(r)}) \in \sum(t)$ , а также сум-

марные номинальные мощности  $S_f$  трансформаторов, нормально питающих узлы  $f \in Y^{(l)}$ ;

5) для каждой группы потребителей  $\mu_i \in M_{k,3}^{(R)}$  выполняются следующие действия:

определяется величина недоотпуска мощности  $\Delta P(\mu_i, t^{(r)})$ , для чего решается уравнение

$$[p_f(t^{(r)}) + \nu p_{\mu_i}(t^{(r)})]^2 + [q_f(t^{(r)}) + \nu q_{\mu_i}(t^{(r)})]^2 = s_f^2,$$

где

$$f = Pr_1(X_i^P), \quad s_f = Pr_2(X_i^P). \quad (9)$$

Если оба корня этого уравнения отрицательные или комплексно-сопряженные, то

$$\Delta P(\mu_i, t^{(r)}) = p_{\mu_i}(t^{(r)}),$$

в противном случае —

$$\nu \geq 1 \rightarrow \Delta P(\mu_i, t^{(r)}) = 0;$$

$$0 \leq \nu < 1 \rightarrow \Delta P(\mu_i, t^{(r)}) = (1 - \nu) p_{\mu_i}(t^{(r)});$$

и корректируется активная и реактивная нагрузки в узле  $f$ , определяемом в соответствии с (9):

$$p_f(t^{(r)}) := p_f(t^{(r)}) + p_{\mu_i}(t^{(r)}) - \Delta P(\mu_i, t^{(r)});$$

$$q_f(t^{(r)}) := q_f(t^{(r)}) + q_{\mu_i}(t^{(r)}) \left[ 1 - \frac{\Delta P(\mu_i, t^{(r)})}{p_{\mu_i}(t^{(r)})} \right];$$

6) вычисляется суммарная величина недоотпуска для групп потребителей  $\mu_i \in M_{k,3}^{(R)}$

$$\Delta P_{k,3} = \sum_{\mu_i \in M_{k,3}^{(R)}} \Delta P(\mu_i, t^{(r)});$$

7) определяется суммарный резерв полной мощности трансформаторов нормально питающих узлы  $f \in Y^{(l)}$

$$\Delta S^{(l)} = \sum_{f \in Y^{(l)}} \sqrt{(\Delta S_f)^2 - [(\Delta S_f)^2]},$$

где

$$(\Delta S_f)^2 = S_f^2 - (p_f(t^{(r)}))^2 - (q_f(t^{(r)}))^2;$$

$$1[(\Delta S_f)^2] = \begin{cases} 0, (\Delta S_f)^2 \leq 0; \\ 1, (\Delta S_f)^2 > 0 \end{cases}$$

– единичная ступенчатая функция;

8) определяются суммарная активная и реактивная нагрузки в узлах  $f \in Y^{(l)}$

$$p^{(l)} = \sum_{f \in Y^{(l)}} p_f(t^{(r)}) 1[(\Delta S_f)^2]; \quad q^{(l)} = \sum_{f \in Y^{(l)}} q_f(t^{(r)}) 1[(\Delta S_f)^2];$$

9) рассчитываются суммарные активная и реактивная мощности групп потребителей  $\mu_i \in M_{k,4}^{(R)}$

$$P_{k,4} = \sum_{\mu_i \in M_{k,4}^{(R)}} p_{\mu_i}(t^{(r)}), \quad Q_{k,4} = \sum_{\mu_i \in M_{k,4}^{(R)}} q_{\mu_i}(t^{(r)});$$

10) находится суммарная величина недоотпуска  $\Delta P_{k,4}$  для групп потребителей  $\mu_i \in M_{k,4}^{(R)}$ , для чего решается уравнение

$$(p^{(l)} + vP_{k,4})^2 + (q^{(l)} + vQ_{k,4})^2 = (\Delta S^{(l)})^2.$$

Если оба корня этого уравнения отрицательные или комплексно-сопряженные, то

$$\Delta P_{k,4} = \sum_{\mu_i \in M_{k,4}^{(R)}} p_{\mu_i}(t^{(r)}),$$

в противном случае –

$$v \geq 1 \rightarrow \Delta P_{k,4} = 0;$$

$$0 \leq v < 1 \rightarrow \Delta P_{k,4} = (1 - v) \sum_{\mu_i \in M_{k,4}^{(R)}} p_{\mu_i}(t^{(r)});$$

11) корректируются активная и реактивная нагрузки в узлах  $f \in Y^{(l)}$ :

$$p_f(t^{(r)}) := p_f(t^{(r)}) + P[f, t^{(r)}, M_{k,4}^{(R)}](P_{k,4} - \Delta P_{k,4});$$

$$q_f(t^{(r)}) := q_f(t^{(r)}) + P[f, t^{(r)}, M_{k,4}^{(R)}]Q_{k,4}\left(1 - \frac{\Delta P_{k,4}}{P_{k,4}}\right),$$

где  $P[f, t^{(r)}, M_{k,4}^{(R)}]$  – вероятность того, что произвольная группа потребителей  $\mu_i \in M_{k,4}^{(R)}$  в состоянии  $\delta(t^{(r)}) \in \sum(t)$  в результате регулировочных мероприятий по изменению схемы сети, не входящей в состав основной сети ЭЭС, запитывается от узла  $f \in Y^{(l)}$ ,

$$P[f, t^{(r)}, M_{k,4}^{(R)}] = \frac{\Delta S_f 1[(\Delta S_f)^2]}{\Delta S^{(l)}}, \quad f \in Y^{(l)};$$

12) определяется искомая величина

$$\Delta P_k^{(r)} = \Delta P_{k,3} + \Delta P_{k,4}.$$

В ходе текущего функционирования задачи в составе АСДУ ЭЭС процедура ее решения включает выполнение двух основных функций: коррекцию базы данных и отыскания оптимального графика отключений. База данных корректируется при всех текущих изменениях схемы основной сети ЭЭС и планируемых графиков изменения управляемых режимных параметров, изменениях состава разрешенных и подлежащих разрешению заявок, накопления статистики плановых и аварийных отключений, а также статистики изменения нагрузок в узлах сети для их прогнозирования.

*Верхний уровень* для данной задачи – месячное планирование ремонтов электросетевого оборудования ЭЭС. *Нижним уровнем* во временной иерархии диспетчерского управления являются любые задачи внутрисуточного оперативного планирования и управления. Такая структура создает удобные и универсальные средства для решения этих задач в виде динамической информационной модели планируемого суточного режима. Входящие в ее состав информационные массивы копируются в базу данных, а программные модули могут использоваться для моделирования проверяемых мероприятий по внутрисуточному планированию и управлению.

## ВЫВОДЫ

1. Составлен алгоритм классификации заявок с указанием сроков просимого времени в зависимости от принципиальной возможности наличия недоотпуска электроэнергии ответственными потребителям.

2. Разработан алгоритм разрешения заявок, не связанных с возможными ограничениями потребителей. Для каждой ремонтной стратегии выявлена необходимость совмещения отдельных ремонтов и соответствующая коррекция раздела информационной базы «Журнал заявок, подлежащих разрешению».

3. Составлен алгоритм определения связанного с заданным размещением заявки недоотпуска электроэнергии ответственными потребителям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Комплекс информационных и математических моделей для пакета прикладных программ оптимального суточного планирования отключений электросетевого оборудования в электроэнергетических системах / О. И. Александров, С. К. Гурский, С. В. Домников, Б. Б. Новицкий // Приближенные методы решения операторных уравнений и их приложения: Тез. докл. регион. науч.-техн. конф. – Иркутск: ИПИ, 1982. – С. 158–170.

2. Александров О. И. Алгоритм определения недоотпуска электроэнергии при разрешении ремонтных заявок в ЭЭС // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1998. – № 4. – С. 3–13.

Представлена кафедрой  
электротехники и электроники

Поступила 20.03.2001