

## Методика расчета показателей надежности городских электрических сетей петлевого типа

Слышалов В.К., д-р техн. наук, Бушуева О.А., канд. техн. наук, Дауди С., Чекан Г.В., аспиранты

Предложена методика расчета показателей надежности городских электрических сетей на примере петлевой схемы. Сформулированы ее основные положения и проиллюстрированы конкретными расчетами на примере схемы сети города Борж Бу Арарыдж (Алжир).

Ключевые слова: отказ, работоспособность, восстановление, готовность.

### Design procedure of reliability indexes of urban electric systems of serpentine type

In this article the design methodology of reliability indexes of urban electric systems on an example of the serpentine scheme is offered. Its substantive provisions illustrated by concrete outcomes of accounts on an example of the system city scheme of Bordj Bu Ararrydj (Algeria) are formulated.

Keywords: failure, working capacity, restoration, availability.

**Введение.** Для электроснабжения крупных городов в настоящее время наиболее употребительными являются двухступенчатые петлевые сети, построенные по принципу глубокого секционирования с применением секционных выключателей и автоматического включения резерва (АВР) как на распределительных пунктах (РП) сетей 6–35 кВ, так и на районных подстанциях [7].

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведена схема электрической сети города Борж Бу Арарыдж (республика Алжир, ~200 тыс. чел.), имеющая все типовые особенности петлевых сетей с глубоким секционированием.

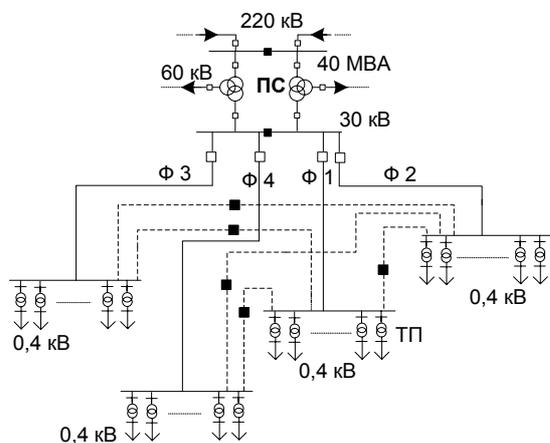


Рис. 1. Схема питающей и распределительной сетей 30 кВ

Эта сеть работает с нормально разомкнутыми секционными выключателями, что позволяет уменьшить потери энергии. К отдельным секциям распределительной линии присоединено не более 10 трансформаторных подстанций (ТП). На подстанциях, питающих потребителей 1-й категории, предусмотрено резервирование замещением (холодный резерв) отказавшего трансформатора. Территориальное размещение ТП предположительно соответствует их равномерной загрузке. Следует заметить, что более рациональным, согласно требованиям надежно-

сти, является равномерное распределение нагрузок ТП по техногенным рискам [2, 4], предполагающее, что подстанции, питающие потребителей разных категорий, должны иметь соответствующие показатели надежности.

Ниже предлагается методика определения показателей надежности петлевых сетей электроснабжения, позволяющая для существующих сетей получить расчетным путем количественную оценку их надежности, а при разработке и проектировании выполнить обоснованный выбор структурно-элементного варианта требуемой электрической схемы.

В качестве основных показателей надежности системы электроснабжения, представленной на рис. 1, выбираем коэффициенты готовности и эффективности для основных питающих линий (фидеры 1, 2, 3, 4), обеспечивающих электроснабжение отдельных городских районов. Коэффициенты эффективности для линий  $W_k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ) будем рассчитывать по формуле [4]

$$W_k = \sum_{i=1}^{n_k} K_{Гi} R_{ki} \delta_{ki}, \quad (1)$$

где  $K_{Гi}$  – коэффициент готовности  $i$ -го исполнительного элемента (подстанции);  $R_{ki}$  – произведение коэффициентов готовности элементов в цепочке управления  $i$ -м элементом (линия, коммутационная аппаратура и т.д.);  $\delta_{ki}$  – комплексно характеризует мощность, время работы и стоимость электроэнергии, потребляемой  $i$ -м элементом.

Допустимость использования формулы (1), предназначенной для систем с аддитивным выходным эффектом, обусловлена тем, что при всех режимах функционирования, т. е. при использовании основных или резервных питающих линий, данная система электроснабжения имеет ветвящуюся иерархическую структуру по надежности.

Таким образом, основной задачей научно-методических разработок является определение коэффициентов готовности отдельных исполнительных элементов  $K_{Гi}$ , группы этих элементов, коэффициентов готовности исполнительных эле-

ментов  $R_{ki}$  и вычисление полной вероятности, характеризующей обобщенный режим электро-снабжения, соответствующий использованию основных и резервных линий.

**Расчет коэффициентов готовности элементов на основе Марковских процессов.** Решение задачи расчета надежности схем электро-снабжения – это определение ее показателей надежности ( $P, Q, K_T$ ) по известным интенсивностям отказов и восстановлений ( $\lambda, \mu$ ) [1].

Поскольку события отказа и восстановления элементов СЭС статистически характеризуются одним параметром и имеют, соответственно, экспоненциальный закон распределения вероятностей, при условии неучета старения этих элементов случайный процесс отказов и восстановлений при эксплуатации будет описываться уравнениями Маркова [2, 3].

**Динамическая модель надежности ТП с нерезервированным трансформатором.** Данный метод построен на использовании теории вероятностей и структурно-функционального представления системы в виде графа состояний и переходов. На рис. 2,а приведена схема городской ТП с одним трансформатором, предназначенная для потребителей 2-й и 3-й категории. Расчетная схема надежности системы приведена на рис. 2,б. Расчетные значения показателей надежности эквивалентного блока системы последовательных элементов  $l = (1-2-3-4-5)$  (рис. 2,в) оценены приближенно. Значения планового ремонта принимаются следующими:

$$\mu_{Пл} = \mu_{Пл,Тр}, \quad \lambda_{Пл} = \lambda_{Пл,Тр};$$

$$\mu_C = 1/T_{B,C}, \quad \lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \tag{2}$$

$$T_C = 1/\lambda_C, \quad T_{B,C} = \frac{1}{\lambda_C} \sum_{i=1}^b T_{B,i} \lambda_i.$$

Система ТП может находиться в трех состояниях:

- 1) работоспособное состояние;
- 2) аварийный простой;
- 3) плановый простой.

Граф переходов и состояний показан на рис. 2,г.

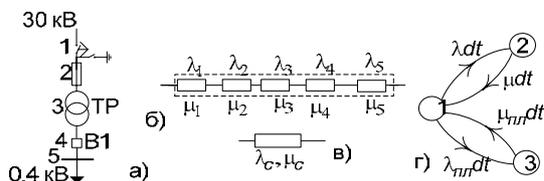


Рис. 2. ТП 2-й и 3-й категории; а – система; б – расчетная схема элементов системы; в – эквивалентный блок системы; г – граф переходов и состояний системы ТП

Графу соответствует система дифференциальных уравнений вероятностей состояний

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP^{(1)}(t)}{dt} &= -(\lambda + \lambda_{Пл})P^{(1)}(t) + \mu P^{(2)}(t) + \mu_{Пл}P^{(3)}(t), \\ \frac{dP^{(2)}(t)}{dt} &= \lambda P^{(1)}(t) - \mu P^{(2)}(t), \\ \frac{dP^{(3)}(t)}{dt} &= \lambda_{Пл}P^{(1)}(t) - \mu_{Пл}P^{(3)}(t) \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

при начальных условиях

$$\sum P^{(i)}(0) = 1. \tag{4}$$

Для решения системы (3) используется операторный метод, основанный на преобразовании Лапласа. Комплексная переменная в изображениях искомых функций обозначается через  $s$ :

$$\varphi(s) = \int_0^{\infty} P(t) e^{-st} dt, \tag{5}$$

где  $\varphi(s)$  называется Лапласовым изображением функции  $P(t)$ . Производная  $\frac{dP(t)}{dt}$  равна нулю при  $t = 0$ :

$$L \left\{ \frac{dP(t)}{dt} \right\} = s\varphi(s). \tag{6}$$

Система дифференциальных уравнений (3) при замене ее первой группы по (4) в преобразовании Лапласа имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \lambda\varphi^{(1)}(s) - (\mu + s)\varphi^{(2)}(s) &= 0, \\ \lambda_{Пл}\varphi^{(1)}(s) - (\mu_{Пл} + s)\varphi^{(3)}(s) &= 0, \\ \varphi^{(1)}(s) + \varphi^{(2)}(s) + \varphi^{(3)}(s) &= 1/s. \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

Систему уравнений (6) для функций Лапласа удобно представить в матричном виде:

$$\begin{vmatrix} \varphi^{(1)}(s) & \lambda & -\mu - s & 0 \\ \varphi^{(2)}(s) & \lambda_{Пл} & 0 & -\mu_{Пл} - s \\ \varphi^{(3)}(s) & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}. \tag{8}$$

Целесообразно воспользоваться правилом Крамера для решения функции  $\varphi^{(k)}(s)$ :

$$\varphi^{(k)}(s) = \frac{\Delta_k(s)}{\Delta(s)}. \tag{9}$$

Функция  $\varphi^{(k)}(s)$  получается в двух формах:

$$\varphi^{(k)}(t) = \frac{F_1^{(k)}(s)}{sF_2(s)} \tag{10}$$

$$\text{или } \varphi^{(k)}(t) = \frac{F_1^{(k)}(s)}{F_2(s)}.$$

Им соответствуют функции времени  $P^{(k)}(t)$  согласно теореме разложения [13]:

$$P^{(k)}(t) = \frac{F_1^{(k)}(0)}{F_2(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{F_1^{(k)}(s_i)}{s_i F_2'(s_i)} e^{s_i t} \tag{11}$$

$$\text{или } P^{(k)}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{F_1^{(k)}(s_i)}{F_2'(s_i)} e^{s_i t},$$

где  $s_i$  – корни уравнения  $F_2(s) = 0$ .

В данном примере имеем 2 различных корня уравнения  $F_2(s) = 0$ :  $s_1 = -1460,4$ ;  $s_2 = -1059,55$ . После подстановки значений интенсивностей  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  и обратного преобразования Лапласа получим, по теореме разложения ( $n = 2$ ), вид функции вероятности каждого состояния в зависимости от времени:

$$P^{(1)}(t) = 0,99964875 + 2,74 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-1460,4t} + 7,72 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-1059,55t}; \quad (12)$$

$$P^{(2)}(t) = 7,73 \cdot 10^{-5} - 5,6 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-1460,4t} - 7,73 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-1059,55t}; \quad (13)$$

$$P^{(3)}(t) = 2,739 \cdot 10^{-4} - 2,739 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-1460,4t} + 7,71 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-1059,55t}. \quad (14)$$

Вероятности безотказной работы и отказа системы:

$$K_T(t) = P^{(1)}(t), \quad (15)$$

$$Q(t) = P^{(2)}(t) + P^{(3)}(t).$$

На рис. 3 представлены графики функций вероятности безотказной работы  $P(t)$  и отказа  $Q(t)$  системы.

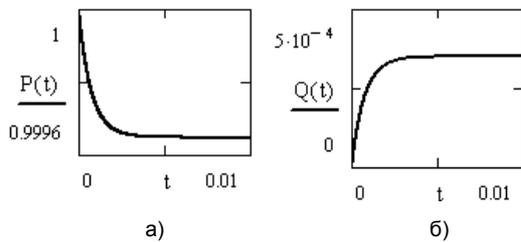


Рис. 3. функции вероятности: а – безотказной работы  $P(t)$ ; б – отказа  $Q(t)$  системы

**Динамическая модель надежности ТП с резервированием замещением.** Распределительная электрическая сеть города имеет ТП, предназначенную для потребителей 1-й категории (рис. 4,а). На ТП находятся два параллельных трансформатора: один работает, а другой в холодном резерве. Расчетная схема дублированной системы с ненагруженным (замещением) резервом изображена на рис. 4,б.

Система может находиться в 5-ти состояниях:

- 1) оба элемента в работоспособном состоянии, основной трансформатор работает, а резервный готов к работе;
- 2) отказ основного трансформатора, мгновенное включение резервного;
- 3) вывод основного трансформатора в плановый ремонт, включение резервного;
- 4) основной трансформатор в плановом ремонте, отказ резервного. Отказ системы ЭС. В зависимости от дисциплины обслуживания, например в случае FIFO (First In, First Out) [4], имеем при завершении планового ремонта переход в состояние(2);
- 5) оба трансформатора в аварийном отказе. Отказ системы ЭС.

Граф переходов и состояний изображен на рис. 4,в.

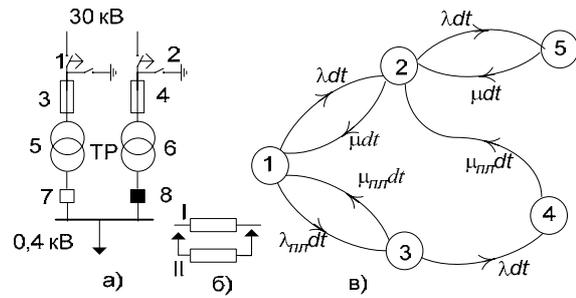


Рис. 4. ТП 1-й категории: а – система; б – расчетная схема эквивалентного блока системы; в – граф переходов и состояний системы ТП

Значения интенсивностей отказа и восстановления при плановом ремонте основного и резервного трансформатора считаем одинаковыми:

$$\lambda_I = \lambda_{II}, \mu_I = \mu_{II}, \lambda_{\Gamma nI} = \lambda_{\Gamma nII}, \mu_{\Gamma nI} = \mu_{\Gamma nII}.$$

Этому графу (рис. 4,в) соответствует система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP^{(1)}(t)}{dt} &= -(\lambda + \lambda_{nn})P^{(1)}(t) + \mu P^{(2)}(t) + \mu_{nn}P^{(3)}(t), \\ \frac{dP^{(2)}(t)}{dt} &= \lambda P^{(1)}(t) - (\mu + \lambda)P^{(2)}(t) + \mu_{nn}P^{(4)}(t) + \mu P^{(5)}(t), \\ \frac{dP^{(3)}(t)}{dt} &= \lambda_{nn}P^{(1)}(t) - (\mu_{nn} + \lambda)P^{(3)}(t), \\ \frac{dP^{(4)}(t)}{dt} &= \lambda P^{(3)}(t) - \mu_{nn}P^{(4)}(t), \\ \frac{dP^{(5)}(t)}{dt} &= \lambda P^{(2)}(t) - \mu P^{(5)}(t) \end{aligned} \right\} (16)$$

при начальных условиях  $\sum P^{(i)}(0) = 1$ .

После преобразования Лапласа [13] функции готовности и вероятности отказа системы для стационарного режима имеют следующие значения:

$$P_\infty = K_{T\infty} = P_\infty^{(1)} + P_\infty^{(2)} + P_\infty^{(3)} = 0,9999999786;$$

$$Q_\infty = P_\infty^{(4)} + P_\infty^{(5)} = 2,137 \cdot 10^{-8}.$$

На рис. 5. приведено сравнение функций вероятностей безотказной работы и отказа структурно резервированной системы где  $P_{\text{noc}}(t)$ ,  $Q_{\text{noc}}(t)$  – функция безотказной работы и функция отказа системы городской ТП с постоянным резервом и двумя бригадами по обслуживанию;  $P_{\text{замщ}}(t)$ ,  $Q_{\text{замщ}}(t)$  – то же с резервированием и двумя бригадами по обслуживанию и ремонту оборудования;  $P_{\text{FIFO}}(t)$ ,  $Q_{\text{FIFO}}(t)$  – то же с резервированием и одной бригадой.

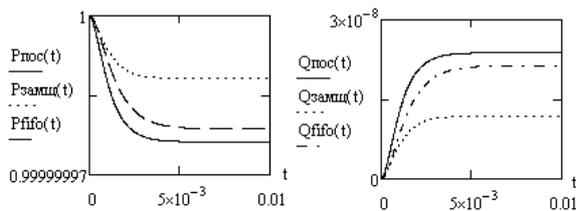


Рис. 5. Сравнение функций безотказной работы и отказа системы по типу резерва

**Статическая модель надежности обобщенного элемента (питающей линии) СЭС.** На рис. 6 приведена схема одного питающего фидера распределительной сети 30 кВ (рис. 1), предназначенная для питания городских ТП. Она включает в себя выключатель (В), питающий фидер (Ф), участка ВЛ и КЛ, распределительную линию (РЛ), секционирующие устройства (С), группы нерезервированных ТП (29ТП) и группы ТП с резервированием (ЗТП).

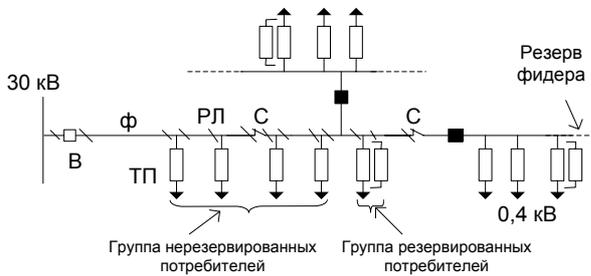


Рис. 6. Система электроснабжения фидера

Система работает при условии регулярно проведения профилактических ремонтов, а при отказе элемента восстанавливается.

Принимаем  $k$  – количество ТП с одним трансформатором и  $j$  – количество ТП с резервированием. Обозначим состояния системы обобщенного элемента:

- 1 – работают все элементы системы;
- 0 – отказ системы электроснабжения, т.е. отказ выключателя (В) или фидера (Ф);
- 2. $k$  – отказ  $k$ -й ТП нерезервированных ТП;
- 3. $k$  – плановый ремонт  $k$ -й ТП;
- 4. $j$  – авария основного трансформатора  $j$ -й ТП с резервированием;
- 5. $j$  – плановый ремонт основного трансформатора  $j$ -й ТП;
- 6. $j$  – отказ резервированного трансформатора при профилактике основного  $j$ -й ТП;
- 7. $j$  – отказ резервированного трансформатора при аварийном состоянии основного  $j$ -й ТП.

Граф переходов и состояний имеет сложный вид и представлен на рис. 7.

В данном примере значения интенсивностей отказа, восстановления и планового ремонта основного, резервного трансформатора и трансформатора без резерва одинаковые, т.е.

$$\lambda_k = \lambda_{1,j} = \lambda_{11,j}, \mu_k = \mu_{1,j} = \mu_{11,j}, \lambda_{Пл,k} = \lambda_{Пл,1,j} = \lambda_{Пл,11,j}, \mu_k = \mu_{Пл,1,j}$$

где  $\lambda_i, \mu_i$  – интенсивности отказа и восстановления системы (В, Ф, РЛ, С) (рис. 6).

Рассмотрим стационарный режим, определяя вероятности:

$$K_{Г_\infty} = P_\infty^{(1)}.$$

Систему алгебраических уравнений стационарного режима обобщенного элемента для графа (рис. 7) выражаем в виде статической модели надежности обобщенного потребителя по следующим уравнениям:

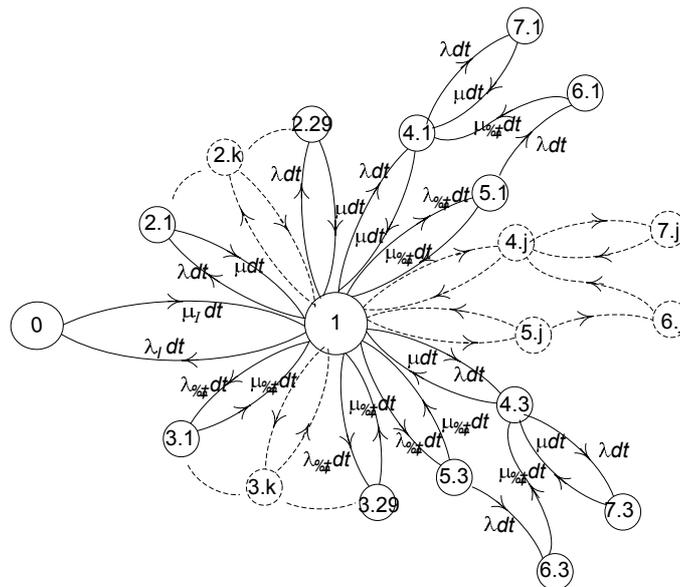


Рис. 7. Граф переходов и состояний системы фидера, изображенной на рис. 5

$$\left. \begin{aligned}
 P_{\infty}^{(0)} &= \frac{\lambda_j}{\mu_j} P_{\infty}^{(1)} \Rightarrow P_{\infty}^{(0)} = K_{\Gamma} \frac{\lambda_j}{\mu_j}, \\
 P_{K_{\infty}}^{(2)} &= \frac{\lambda_k}{\mu_k} P_{\infty}^{(1)} \Rightarrow P_{\infty}^{(2)} = K_{\Gamma} \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{\mu_i}, \\
 P_{K_{\infty}}^{(3)} &= \frac{\lambda_{\Pi n, k}}{\mu_{\Pi n, k}} P_{\infty}^{(1)} \Rightarrow P_{\infty}^{(3)} = K_{\Gamma} \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_{\Pi n, i}}{\mu_{\Pi n, i}}, \\
 &\text{-----} k = \text{число ТП одного Тр-ра} \text{-----} \\
 P_{j_{\infty}}^{(4)} &= \frac{\lambda_j}{\mu_j} + \frac{\lambda_j \lambda_{\Pi n, j}}{\mu_j (\mu_{\Pi n, j} + \lambda_j)} P_{\infty}^{(1)} \Rightarrow P_{\infty}^{(4)} = K_{\Gamma} \sum_{i=1}^j \left( \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \frac{\lambda_i \lambda_{\Pi n, i}}{\mu_i (\mu_{\Pi n, i} + \lambda_i)} \right), \\
 P_{j_{\infty}}^{(5)} &= \left( \frac{\lambda_{\Pi n, j}}{\mu_{\Pi n, j} + \lambda_j} \right) P_{\infty}^{(1)} \Rightarrow P_{\infty}^{(5)} = K_{\Gamma} \sum_{i=1}^j \left( \frac{\lambda_{\Pi n, i}}{\mu_{\Pi n, i} + \lambda_i} \right), \\
 P_{j_{\infty}}^{(6)} &= \frac{\lambda_j \lambda_{\Pi n, j}}{\mu_{\Pi n, j} (\mu_{\Pi n, j} + \lambda_j)} P_{\infty}^{(1)} \Rightarrow P_{\infty}^{(6)} = K_{\Gamma} \sum_{i=1}^j \left( \frac{\lambda_i \lambda_{\Pi n, i}}{\mu_{\Pi n, i} (\mu_{\Pi n, i} + \lambda_i)} \right), \\
 P_{j_{\infty}}^{(7)} &= \frac{\lambda_j^2}{\mu_j^2} \left( 1 + \frac{\lambda_{\Pi n, j}}{(\mu_{\Pi n, j} + \lambda_j)} \right) P_{\infty}^{(1)} \Rightarrow P_{\infty}^{(7)} = K_{\Gamma} \sum_{i=1}^j \left( \frac{\lambda_i^2}{\mu_i^2} \left( 1 + \frac{\lambda_{\Pi n, i}}{(\mu_{\Pi n, i} + \lambda_i)} \right) \right), \\
 &\text{-----} j = \text{число ТП с резервированием} \text{-----}
 \end{aligned} \right\} \tag{17}$$

$$K_{\Gamma} = 1 / \left( 1 + \frac{\lambda_j}{\mu_j} + \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_{\Pi n, i}}{\mu_{\Pi n, i}} + \sum_{i=1}^j \left( \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \frac{\lambda_i \lambda_{\Pi n, i}}{\mu_i (\mu_{\Pi n, i} + \lambda_i)} \right) + \sum_{i=1}^j \left( \frac{\lambda_{\Pi n, i}}{\mu_{\Pi n, i} + \lambda_i} \right) + \sum_{i=1}^j \left( \frac{\lambda_i \lambda_{\Pi n, i}}{\mu_{\Pi n, i} (\mu_{\Pi n, i} + \lambda_i)} \right) + \sum_{i=1}^j \left( \frac{\lambda_i^2}{\mu_i^2} \left( 1 + \frac{\lambda_{\Pi n, i}}{(\mu_{\Pi n, i} + \lambda_i)} \right) \right) \right). \tag{18}$$

При использовании условий полноты состояний системы  $\sum P_{\infty}^{(i)} = 1$  получим коэффициент готовности, который определяется выражением (18).

При расчете вероятности безотказной работы ТП с резервированием можно не учитывать вероятности состояний 6.j и 7.j, которые соответствуют отказу резервированного трансформатора во время ремонта основного трансформатора при аварии или при плановом ремонте, т.е.  $P_j^{(6)}$  и  $P_j^{(7)}$  (рис. 7) аналогичны  $P^{(4)}$  и  $P^{(5)}$  (рис. 4, в).

Эти состояния в практике редко встречаются, поэтому при расчетах ими можно пренебречь.

Итак, коэффициент готовности системы электроснабжения (рис. 7) приблизительно определяется по выражению

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_j}{\mu_j} + \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_{\Pi n, i}}{\mu_{\Pi n, i}} + \sum_{i=1}^j \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \sum_{i=1}^j \frac{\lambda_{\Pi n, i}}{\mu_{\Pi n, i}}}. \tag{19}$$

**Расчет коэффициента эффективности системы.** Коэффициент эффективности функционирования определяет средний уровень качества функционирования системы. СЭС (рис. 1) имеет ветвящуюся структуру (рис. 8), состоит из исполнительных элементов (ТП), которые управляются элементами высшего уровня иерархии управления (фидеры); те, в свою очередь, – элементами следующего уровня управления (ГП) и т.д. Отказ управляющего элемента приводит к

отказу всех подчиненных ему исполнительных элементов, даже если они работоспособны.

Исполнительный элемент (ТП) нормально функционирует, если он работоспособен сам и нормально функционируют все управляющие им элементы, т.е. имеется цепочка связей этого элемента до управляющего элемента самого высокого уровня (рис. 8).

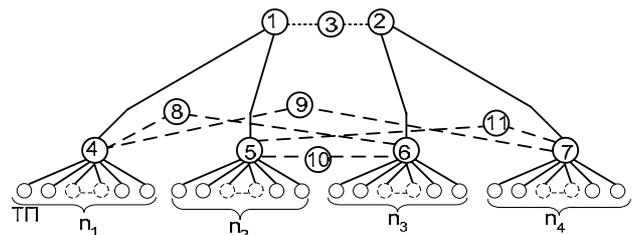


Рис. 8. Система с ветвящейся структурой распределительной сети

Для системы, структура которой изображена на рис. 8, коэффициент эффективности записывается в виде

$$W_{\text{сист}} = \rho_4 \rho_5 \left( \sum_{i=1}^{n1} \rho_{\Pi i} \delta_{\Pi i} \right) + \rho_4 \rho_5 \left( \sum_{i=1}^{n2} \rho_{\Pi i} \delta_{\Pi i} \right) + \rho_2 \rho_6 \left( \sum_{i=1}^{n3} \rho_{\Pi i} \delta_{\Pi i} \right) + \rho_2 \rho_7 \left( \sum_{i=1}^{n4} \rho_{\Pi i} \delta_{\Pi i} \right). \tag{20}$$

В случае резервирования замещением происходит автоматическое отключение отказавшего элемента и включение резервного с помощью АВР.

Рассмотрим случай отключения (отказа) элемента №4, когда включается резервный элемент №8. Коэффициент эффективности будет равен

$$W_{\text{акст}} = \rho_2 \rho_6 \rho_8 \left( \sum_{i=1}^{n1} \rho_{\text{ТП},i} \delta_{\text{ТП},i} \right) + \rho_4 \rho_5 \left( \sum_{i=1}^{n2} \rho_{\text{ТП},i} \delta_{\text{ТП},i} \right) + \rho_2 \rho_6 \left( \sum_{i=1}^{n3} \rho_{\text{ТП},i} \delta_{\text{ТП},i} \right) + \rho_2 \rho_7 \left( \sum_{i=1}^{n4} \rho_{\text{ТП},i} \delta_{\text{ТП},i} \right). \quad (21)$$

**Учет аварийных состояний.** При отказе фидера №1 возможны, например, такие ситуации (гипотезы):

- событие  $A_1$  – нормальное функционирование системы;
- событие  $A_2$  – функционирование по первому резерву (системы фидера №3);
- событие  $A_3$  – функционирование по второму резерву (системы фидера №4).

При этом вероятность отказа системы определяется формулой полной вероятности:

$$Q_c = Q_c(S/A_1) \cdot P(A_1) + Q_c(S/A_2) \cdot P(A_2) + Q_c(S/A_3) \cdot P(A_3), \quad (22)$$

где  $P(A_1)$ ,  $P(A_2)$ ,  $P(A_3)$  – вероятности перечисленных событий;  $Q(S/A_1)$ ,  $Q(S/A_2)$ ,  $Q(S/A_3)$  – условные вероятности отказа системы при событиях  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ .

Вычисляем вероятность безотказной работы:  $P_c = 1 - Q_c$ .

Классификация отказов выполняется по условиям эксплуатации оборудования в схеме с учетом категоричности потребителей, длительности расчетного периода оценки надежности и других инженерных требований, являясь, таким образом, итогом анализа практических требований к схеме электроснабжения. Эффективность функционирования электрической сети, обеспечение ее безотказности и долговечности связаны с анализом и оценкой показателей надежности отдельных элементов ЭС. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика определения показателей надежности схем петлевых сетей электроснабжения допускает распространение и на схемы других типов, в частности радиальные и магистральные.

Слышалов Владимир Константинович,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
доктор технических наук, профессор кафедры электрических систем,  
e-mail: zav\_es@es.ispu.ru

Бушуева Ольга Александровна,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
кандидат технических наук, профессор кафедры электрических систем,  
e-mail: zav\_es@es.ispu.ru

2. Возможно дальнейшее уточнение расчетов путем введения параметров коммутационной аппаратуры: времени переключения при резервировании замещением; отказов и повторных действий АВР и тому подобных случайных событий, не имеющих принципиального влияния на показатели надежности системы в целом.

3. Метод, использующий Марковские процессы, позволяет строго и в общем виде получать вероятности всех состояний и их изменения во времени для элементов СЭС и для системы в целом как обобщенного элемента.

4. Основными составляющими предлагаемой методики расчета коэффициента готовности системы  $K_T(t)$  и других критериев надежности являются: разбивка системы на подмножество модулей, соответствующих отдельным категориям потребителей и различающихся способом резервирования; применение метода декомпозиции структуры для преобразования схемы к последовательно-параллельному соединению в целях увеличения надежности; определение модели надежности обобщенного элемента. Данная методика может быть использована в системах электроснабжения при проектировании на краткосрочную и долгосрочную перспективы развития.

#### Список литературы

1. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006.
2. Слышалов В.К., Тышкевич И.В. Основы расчета надежности систем электроснабжения: Учеб. пособие / ГОУВПО ИГЭУ. – Иваново, 2007.
3. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. Ч. 1. Теоретические основы: Учеб. пособие. – Новосибирск: НГТУ, 2003.
4. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем: Учеб. пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2008.
5. Гук Ю.Б. Теория и расчет надежности систем электроснабжения. – М.: Энергия, 1970.
6. Розанов М.Н. Управление надежностью электроэнергетических систем. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991.
7. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Технопринт, 2004.
8. Гук Ю.Б. Оценка надежности электроустановок / Под ред. проф. Б.А. Константинова. – М.: Энергия, 1974.
9. Гук Ю.Б., Синенко М.М., Тремясов В.А. Расчет надежности схем электроснабжения. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990.
10. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: Учеб. пособие. – М.: Логос, 2008.
11. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова [и др.]. 9-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.
12. Надежность систем электроснабжения / В.В. Зорин, В.В. Тисленко, Ф. Клеппель, Ч. Адлер. – Киев: Вышш. шк., 1984.
13. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. Изд. 4-е, перераб. – М.: Энергия, 1975.

Дауди Салим,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
аспирант кафедры электрических систем,  
e-mail: zav\_es@es.ispu.ru

Чекан Георгий Василевич,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
аспирант кафедры электрических систем,  
e-mail: zav\_es@es.ispu.ru