

## **ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ ПИТАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ВТОРОЙ И ТРЕТЬЕЙ КАТЕГОРИЙ**

**Докт. техн. наук, проф. КОРОТКЕВИЧ М. А.,  
канд. техн. наук. СТАРЖИНСКИЙ А. Л.**

*Белорусский национальный технический университет*

Схемы городской электрической сети должны обеспечивать электроснабжение коммунально-бытовых потребителей с заданной Правилами устройства электроустановок степенью надежности. Основной схемой распределительной городской электрической сети для электроснабжения потребителей первой категории служит двухлучевая схема с двусторонним питанием с автоматическим вводом резерва (АВР) на напряжении 0,38 кВ двухтрансформаторных подстанций при условии подключения взаимно резервируемых линий 6–20 кВ к разным независимым источникам питания.

Для обеспечения надежного электроснабжения потребителей второй категории схемы сети имеют резервные элементы, которые вводятся в работу (после повреждения основных элементов) оперативным персоналом. При этом может быть непосредственное резервирование линий напряжением 6–20 кВ, трансформаторов и линий 0,38 кВ, а также взаимное резервирование отдельных элементов сети (трансформаторов через сеть 0,38 кВ, резервирование линий 6–20 кВ и трансформаторов через сеть 0,38 кВ).

Городские электрические сети для питания потребителей третьей категории выполняются по радиальным нерезервируемым линиям напряжением 6–20 и 0,38 кВ, а также по петлевым резервируемым линиям напряжением 6–20 кВ с целью обеспечения двустороннего питания каждой трансформаторной подстанции и радиальным нерезервируемым линиям напряжением 0,38 кВ к потребителям.

Системы электроснабжения ответственных потребителей городской электрической сети имеют, как правило, иерархическую структуру, которая предполагает, что отключение любого элемента или группы элементов производится одним коммутационным аппаратом, и в схеме нет нормально включенных поперечных связей. Поэтому электроснабжение любого узла в любой момент времени возможно лишь от одного из нескольких источников питания по единственному пути. Выбор этого пути определяется действиями противоаварийной автоматики и оперативного персонала. Отказы системы электроснабжения какой-либо из секций или групп секций наступают при разрыве всех возможных путей: рабочих, резервных и аварийных. Дадим количественную оценку уровня надежности схемам электроснабжения потребителей второй и третьей категорий. В качестве такого критерия примем коэффициент неготовности схемы нести нагрузку из-за внезапных отказов ее элементов.

Программа REISS, разработанная в Санкт-Петербургском государственном техническом университете на кафедре «Электрические станции», полностью автоматизирует процесс анализа схемы и вычисление показате-

лей структурной надежности иерархических систем электроснабжения. Программа предназначена для вычисления частоты и длительности пере-рывов электроснабжения одновременно произвольного количества входящих в систему электроснабжения потребителей, а также коэффициента не-готовности данных потребителей в отношении такого события [1].

Реализованная в программе модель анализа структурной надежности системы электроснабжения позволяет вычислять частоты  $\lambda$  и длительно-сти  $T$  погашений потребителей в нормальном режиме и в режимах аварий-ного простоя оборудования систем резервного и рабочего электроснабже-ния с учетом повреждений оборудования системы электроснабжения, воз-можности отказов в срабатывании устройств релейной защиты (РЗ) и ком-мутационной аппаратуры (КА) при отключении коротких замыканий, а также отказов в переключении на резервное электроснабжение из-за от-казов в срабатывании АВР и коммутационных аппаратов вводов рабочего и резервного питания. Значения  $\lambda$  и  $T$  в общем виде определяются по вы-ражениям [1]:

$$\lambda = \sum_{k=1} \lambda(k); \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{\lambda} \sum_k T(k)\lambda(k), \quad (2)$$

где  $\lambda(k)$  и  $T(k)$  – соответственно частоты и длительности смоделированных аварий  $k$ -го вида, приводящих к расчетному погашению:

$$\lambda(k) = q(k, j)\lambda(k, m) \prod_s Q(k, s); \quad (3)$$

$$T(k) = q(k, j)\lambda(k, m) \min \left\{ \frac{t(k, j)}{2}; t(k, m); t_{o.n} \right\} \prod_s Q(k, s). \quad (4)$$

Здесь  $q(k, j)$  – относительная длительность ремонтного простоя  $j$ -го элемента, о. е.;  $\lambda(k, m)$  – частота повреждения  $m$ -го элемента схемы, 1/год;  $t(k, m)$  и  $t(k, j)$  – длительности послеаварийного восстановления  $m$ -го и  $j$ -го элементов схемы, ч;  $t_{o.n}$  – время оперативных переключений, ч;  $Q(k, s)$  – вероятность отказа в срабатывании  $s$ -го устройства РЗ, КА или АВР.

Коэффициент неготовности потребителей  $K_n$  вычисляется по выраже-нию [1]

$$K_n = \frac{T\lambda}{8760}. \quad (5)$$

Подготовка исходных данных для расчета структурной надежности схемы сети сводится к нумерации элементов схемы в определенной после-довательности. Затем составляется матрица связности [В]. Здесь для каж-дого коммутационного аппарата в порядке следования их номеров записы-ваются номера примыкающих к ним узлов (источников питания, транс-форматоров, секций шин, линий и отдельных потребителей).

С помощью программы REISS выполним расчет надежности городской распределительной электрической сети второй категории одного из жилых

микрорайонов г. Минска (рис. 1), а именно определим надежность электроснабжения потребителей, питающихся от шин трансформаторной подстанции напряжением 0,38 кВ (в нормальном режиме секционный выключатель на распределительном пункте РП-10 кВ отключен, секционные разъединители напряжением 10 кВ и секционные рубильники напряжением 0,38 кВ на трансформаторных подстанциях отключены; в случае повреждения питающей линии на РП-10 кВ срабатывает АВР). Также произведем расчет надежности схемы потребителей третьей категории при различных местах разрыва питающей сети 10 кВ (рис. 2).

Данные о надежности отдельных элементов, подключенных к сети напряжением 0,38 кВ системы электроснабжения [2–4], представлены в табл. 1.

Результаты расчетов надежности схемы электроснабжения потребителей второй категории с вакуумными и маломасляными выключателями (рис. 1) представлены в табл. 2, а потребителей третьей категории с вакуумными выключателями на РП-10 кВ (рис. 2) – в табл. 3.

Таблица 1

Показатели надежности элементов городской электрической сети

Элемент	Номинальное напряжение $U_n$ , кВ	$\lambda_i$ , 1/год	$t_b$ , ч/отказ	$\lambda_{пл}$ , 1/год	$t_{пл}$ , ч/откл.
Масляные выключатели	6–10	0,01500	9,0	0,140	6,8
Вакуумные выключатели	10	0,00400	8,0	0,200	15,4
Силовые трансформаторы	6–10	0,01400	42,0	0,250	6,0
Кабельные линии на 1 км	6–10	0,00500	4,4	1,000	2,0
Сборные шины	6–10	0,09000	2,0	0,498	15,0
	0,38	0,00200	0,9	0,498	15,0
Предохранители	6–10	0,02000	2,0	0,166	4,0
Автоматические выключатели	0,38	0,00130	1,3	0	0,0
Рубильники	0,38	0,00005	2,0	0,166	1,8

Таблица 2

Показатели надежности схемы электроснабжения потребителей второй категории на РП-10 кВ

Показатель надежности	Частота отказов $\lambda$ , 1/год	Длительность погашения потребителей $T$ , ч	Коэффициент неготовности $K_n$ , $10^{-3}$ , о. е.
Секция шин I 0,38 кВ ТП-1	0,6276/0,6496	2,2960/2,388	0,1645/0,1771
Секция шин I 0,38 кВ ТП-2	0,6276/0,6496	2,5950/2,678	0,1859/0,1986
Секция шин I 0,38 кВ ТП-3	0,6256/0,6476	2,8333/2,908	0,2023/0,2149

**Примечание.** Числитель – вакуумные выключатели, знаменатель – маломасляные.

Таблица 3

Показатели надежности схемы электроснабжения потребителей третьей категории на РП-10 кВ

Показатель	Отключен разъединитель номер					
	1	2	3	4	5	6
Шины 0,38 кВ ТП 1						
$\lambda$ , 1/год	0,3185	0,4514	0,5834	0,7139	0,8459	0,9793
$t$ , ч	3,3380	2,5610	2,1400	1,8770	1,6930	1,5580
$K_n \cdot 10^{-3}$ , о. е.	0,1213	0,1320	0,1425	0,1530	0,1635	0,1742

Шины 0,38 кВ ТП 2						
$\lambda$ , 1/год	0,8406	0,4514	0,5834	0,7139	0,8459	0,9793
$t$ , ч	2,5370	2,8910	2,3950	2,0850	1,8690	1,7100
$K_n \cdot 10^{-3}$ , о. е.	0,2434	0,1490	0,1595	0,1700	0,1805	0,1912
Шины 0,38 кВ ТП 3						
$\lambda$ , 1/год	0,7087	0,7087	0,5834	0,7139	0,8459	0,9793
$t$ , ч	2,6730	2,6740	2,6440	2,2890	2,0410	1,8580
$K_n \cdot 10^{-3}$ , о. е.	0,2163	0,2163	0,1761	0,1865	0,1971	0,2077
Шины 0,38 кВ ТП 4						
$\lambda$ , 1/год	0,5782	0,5782	0,5781	0,7139	0,8459	0,9793
$t$ , ч	2,8770	2,8770	2,8770	2,4850	2,2070	2,0010
$K_n \cdot 10^{-3}$ , о. е.	0,1899	0,1899	0,1899	0,2025	0,2131	0,2237
Шины 0,38 кВ ТП 5						
$\lambda$ , 1/год	0,4442	0,4442	0,4442	0,4442	0,8439	0,9773
$t$ , ч	3,2050	3,2050	3,2050	3,2060	2,3820	2,1520
$K_n \cdot 10^{-3}$ , о. е.	0,1625	0,1625	0,1625	0,1625	0,2294	0,2401
Шины 0,38 кВ ТП 6						
$\lambda$ , 1/год	0,3108	0,3108	0,3108	0,3108	0,3107	0,9773
$t$ , ч	3,7960	3,7960	3,7960	3,7960	3,7970	2,3060
$K_n \cdot 10^{-3}$ , о. е.	0,1347	0,1347	0,1347	0,1347	0,1347	0,2573

Как видно из табл. 2 (рис. 1), при установке маломасляных и вакуумных выключателей на РП наиболее удаленная трансформаторная подстанция имеет самый высокий коэффициент неготовности, который больше соответствующего коэффициента неготовности ближайшей трансформаторной подстанции в 1,21 и 1,23 раза соответственно. Применение вакуумных выключателей на РП вместо маломасляных приводит к незначительному снижению коэффициента неготовности (в 1,06–1,07 раза), что объясняется учетом надежности работы автоматического ввода резерва на распределительном пункте напряжением 10 кВ.

Из табл. 3 (рис. 2) видно, что надежность потребителей, питающихся от шин трансформаторной подстанции напряжением 0,38 кВ, значительно (в 1,2–1,9 раза) изменяется при изменении точки разрыва сети напряжением 10 кВ (точки 1–6). Наиболее целесообразная, с точки зрения структурной надежности точка разрыва сети для схемы рис. 2, – это точка под номером 3. Здесь при разрыве сети напряжением 10 кВ от каждой секции РП-10 кВ питается равное количество одотрансформаторных подстанций. В этом случае схема рис. 2 сопоставима по надежности со схемой рис. 1, обеспечивающей электроснабжение потребителей второй категории.

Комплексный подход к определению наилучшей точки разрыва сети напряжением 10 кВ состоит в учете минимума дисконтированных затрат, а также максимума надежности электроснабжения и минимума емкостных токов замыкания на землю, который предполагает использование метода многоцелевой оптимизации [4, 5].

## ВЫВОДЫ

Схемы городской электрической сети для электроснабжения потребителей второй и третьей категорий в определенных случаях имеют близкие по значению показатели надежности, так как оснащены автоматическими отключающими аппаратами только в центрах питания и работают в разомкнутом режиме.

Наименее надежно питание потребителей от более удаленных трансформаторных подстанций. Коэффициент неготовности схемы нести нагрузку (для петлевой линии сети от места ее нормального разрыва) увеличивается с удалением трансформаторной подстанции от источника питания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э л е м е н т ы САПР электрической части АЭС на персональных компьютерах / А. К. Черновец [и др.]. – СПб.: Санкт-Петербург. гос. техн. ун-т, 1992. – 89 с.
2. Э л е к т р о т е х н и ч е с к и й справочник: в 3 т. / редкол.: И. И. Орлов (гл. ред.) [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3, кн. 1: Производство и распределение электрической энергии. – 880 с.
3. Г у к, Ю. Б. Теория и расчет надежности систем электроснабжения / Ю. Б. Гук; под ред. Р. Я. Федосенко. – М.: Энергия, 1970. – 117 с.
4. К о р о т к е в и ч, М. А. Соотношение показателей надежности питающей городской электрической сети напряжением 6–10 кВ и системы глубокого ввода // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / М. А. Короткевич. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005. – Вып. 55. – С. 52–59.
5. К о р о т к е в и ч, М. А. Эксплуатация электрических сетей / М. А. Короткевич. – Минск: Вышэйш. шк., 2005. – 364 с.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 29.06.2012