СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копылов, И.П.* Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

2. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением / Л.П. Петров, В.А. Ладензон, Р.Г. Подзолов, А.В. Яковлев. – М.: Энергия, 1977. – 200 с.

3. *Бандурин, А.Н.* Моделирование динамики рабочего органа скребкового конвейера // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 1999. – №2. – С. 46-49.

4. *Петров, Л.П.* Управление пуском и торможением асинхронного двигателя. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.

5. Способ пуска асинхронного электродвигателя / Е.К. Ещин, В.Г. Каширских, И.А. Соколов, С.С. Переверзев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-18: Сб. трудов 18-й Международ. науч. конф.: в 10 т. Т.5. Секция 5 / Под общ. ред. В.С. Балакирева. – Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 200 – 204.

6. *Каширских, В.Г.* Формирование алгоритма управления плавным пуском асинхронного электродвигателя на основе метода скоростного градиента / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов, С.С. Переверзев // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2005. – № 2 – С. 7 – 9.

Авторы статьи:

Переверзев
Сергей Сергеевич
- канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и автоматизации
КузГТУ, Email: pss1980@tut.by,
Тел.8(3842) 39-63-54.

Нестеровский
Александр Владимирович
- к канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и автоматизации
КузГТУ, Email: nsky@tut.by,
Тел.8(3842) 39-63-54.

УДК 628: 621.316.31.019.3

Г.И. Разгильдеев, Е.В. Ногин

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 10-6-0,4 кВ

Из [1,2] известно, что распределительные электросети (РЭС) напряжением 10-6-0,4 кВ на территории нашей области общей протяженностью более 21 тыс. км (от 1,2 до 68,5 км) с подстанциями обслуживают три производственных сетевых предприятия: Северо-Восточные, Центральные, Южные электросети (соответственно СВЭС, ЦЭС, ЮЭС), входящие в состав “Кузбассэнерго – РЭС” – филиал ОАО “МРСК Сибири”, СВЭС обслуживает 71,7 % всех электросетей и подстанций, ЦЭС – 16,7 и ЮЭС – 12 %.

Статистика показывает, что при эксплуатации электрооборудования (ЭО) РЭС на территории Кемеровской области ежегодно в среднем имеет место до 18000 аварийных отключений линий электропередачи (ЛЭП) по разнообразным причинам с разной длительностью, а среднегодовой недоотпуск электроэнергии (ЭЭ) из-за этих отключений составляет около 295 тыс. кВт·ч.

Эти данные свидетельствуют об актуальности задачи исследования с целью повышения надежности РЭС и их ЭО.

Анализ аварийных отключений РЭС напряжением 10-6-0,4 кВ за пять лет показал, что они возникают по следующим причинам (в среднем в процентах от общего числа отключений):

- повреждение ЭО РЭС – 18,5;
- повреждение при грозах – 27,5;
- причины неизвестны – 54.

Повреждение ЭО РЭС проявляются в виде механических повреждений кабелей, в дефектах монтажа концевых и соединительных муфт, в разрушениях изоляторов воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), в поломках деревянных и железобетонных опор, в повреждении коммутационной аппаратуры и трансформаторов питающих подстанций (ТП), в повреждении проходных изоляторов ТП и другого электрооборудования.

Пути повышения надежности электроснабжения из-за отказов ЭО известны:

- замена устаревшего ЭО на соответствующее современным требованиям по надежности и безопасности;
- повышение надежности ЭО РЭС за счет применения научно обоснованной периодичности и улучшения качества его технического обслуживания.

Реализация первого из этих направлений определяется состоянием экономики как отдельных предприятий – владельцев ЭО РЭС, так и общей экономической ситуацией в стране и в предмет обсуждения настоящей статьи не входит.

Вторая задача может быть решена применением методов теории массового обслуживания (ТМО) к планированию технического обслуживания ЭО РЭС.

Для этой цели необходимо выполнить два условия:

- знать характер потока отказов ЭО РЭС;
- располагать показателями надежности отдельных видов ЭО в РЭС.

Для применения методов ТМО к планированию технического обслуживания ЭО необходимо, чтобы потоки отказов были простейшими (пуассоновскими), т.е. чтобы они обладали тремя основными свойствами: стационарностью, отсутствием последствия и ординарностью.

Стационарность потока означает, что вероятность появления некоторого числа отказов в течение определенного отрезка времени зависит от его длительности и не зависит от начала отсчета на оси времени.

Отсутствие последствия состоит в том, что вероятность возникновения на некотором отрезке времени определенного числа отказов не зависит от того, сколько отказов уже возникло, т.е. не зависит от предыстории явления.

Ординарность потока отказов означает практическую невозможность появления двух и более отказов в один и тот же момент времени.

Важной характеристикой простейшего потока отказов является его интенсивность. Математическое ожидание k числа отказов за время (0;t) равно:

$$M_i[k] = \Sigma k \cdot p_k(t) = e^{-\lambda t}\Sigma k(\lambda t)^k / k! = \lambda t \quad (1)$$

Математическое ожидание числа отказов в единицу времени или интенсивность отказов, которая получается при t=1, равно:

$$M_1[k] = \lambda = const \quad (2)$$

Постоянной интенсивностью отказов характеризуется экспоненциальное распределение наработки на отказ.

Для выявления закономерностей, присущих РЭС, были проанализированы 628 отключений за

Таблица 1. Расчет показателей надежности РЭС 6-10 кВ

Интервал времени Δt_i	$\frac{\Delta t_i}{2}$	m_i	$P_i = \frac{m_i}{n}$	$F_i = \frac{\sum_1^i m_i}{n}$	$f_i(t) = \frac{m_i}{n \cdot \frac{\Delta t}{2}_i}$	$\lambda_i(t) = \frac{f_i(t)}{P_i}$	T_{CPi}
0 - 2816	1408	362	0,576	0,576	0,0004094	0,00071	811,61783
2816 - 5632	4224	140	0,223	0,799	0,0000792	0,000355	627,7707
5632 - 8448	7040	51	0,081	0,881	0,0000192	0,000237	343,03185
8448 - 11264	9856	31	0,049	0,930	0,0000088	0,000178	278,01274
11264 - 14080	12672	19	0,030	0,960	0,0000043	0,000142	212,99363
14080 - 16896	15488	15	0,024	0,984	0,0000028	0,000118	201,78344
16896 - 19712	18304	10	0,016	1,000	0,0000016	0,000101	156,94268

n =628 – общее число отключений;

m_i – число отключений на интервале времени Δt_i

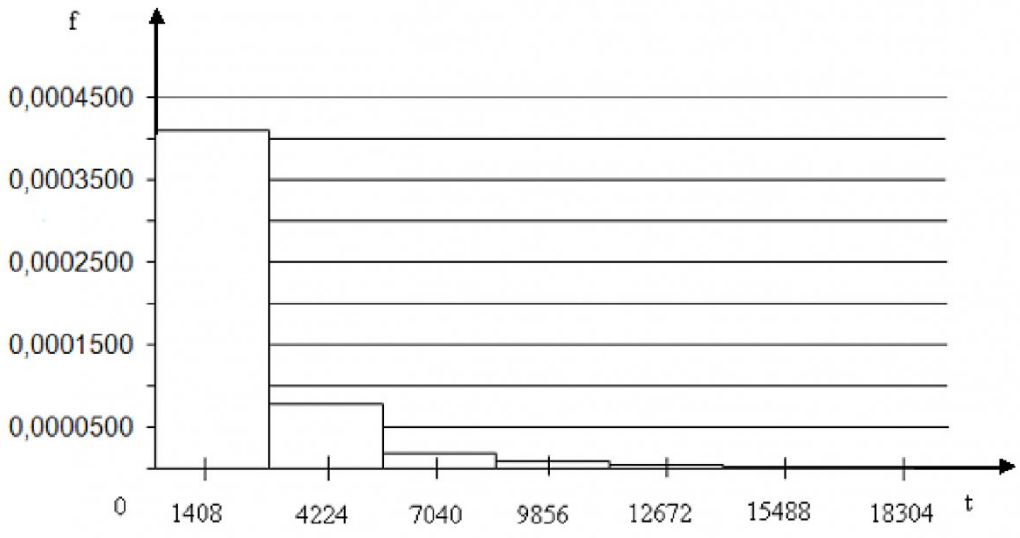

Рис. 1. Плотность распределения вероятностей

пять лет двадцати двух РЭС длиной от 4,1 до 56,18 км со средней длиной 21,6 км. При этом фиксировали наработку на отключение, ч, и длительность простоя без электроэнергии, ч. Расчеты плотностей распределения вероятностей $f_i(t)$ для каждого *i*-го интервала, интенсивности отказов (отключений) $\lambda_i(t)$, функции распределения $F_i(t)$ и функции надежности $P_i(t)$ произведены по формулам, приведенным в табл. 1.

По результатам расчетов, представленным в табл. 1, построена плотность распределения вероятностей на рис.1, откуда видно, что она может соответствовать экспоненциальному закону с плотностью распределения $f_i(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$.

Для рассматриваемых в данном случае РЭС 6-10 кВ средняя наработка на отказ (отключение) составила 3316 ч, интенсивность отказов $\lambda_\Sigma = \frac{1}{\Sigma T_{CP\,i}} = 3{,}38 \cdot 10^{-4}$, 1/ч. время простоя на один отказ также подчиняется экспоненциальному распределению, а среднее значение $t_{a.cp} = T_B = 1/\mu_{cp} = 3{,}4, ч$.

Соответствие экспериментального распределения с теоретическим экспоненциальным при большом объеме выборки (в данном случае n=628) удобно проверить с помощью критерия согласия

Таблица 3. Средние значения показателей надежности электрооборудования РЭС

№ п/п	Наименование электрооборудования	Интенсивность отказов $\lambda, 10^{-5}$,1/ч	Среднее время простоя $t_{ia.cp}$,ч	Вероятность простоя $P_i(Э)\ 10^{-5}$
1	Трансформаторы 6-10 кВ до 1000 кВА в ТП	0,263	1,4	0,368
2	ВЛ 6-10 кВ на деревянных опорах на 1 км	3,33	3,4	11,32
3	ВЛ 6-10 кВ на железобетонных опорах на 1 км	4,66	3,4	15,844
4	ВЛ 0,4 кВ на деревянных опорах на 1 км	24,3	1,7	41,31
5	Разъединители 6-10 кВ на ВЛ на один комплект (3 фазы)	1,48	3,2	4,736
6	Разрядники 6-10 кВ трубчатые на ВЛ на один комплект (3 фазы)	1,43	2,4	1,032
7	Разрядники 6-10 кВ трубчатые на ТП (3 фазы)	0,43	2,2	0,946
8	Кабельные вставки 6-10 кВ на ТП на 100м	1,72	4,3	7,396
9	Кабельные вставки 6-10 кВ на ВЛ на 100м	5,22	14,2	74,124

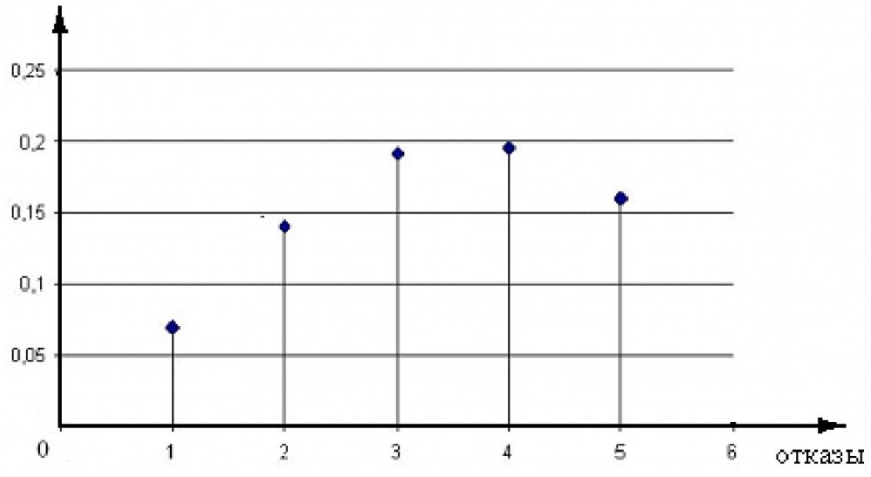

Рис. 2. Вероятности появления отказов для ВЛ на ЖБ опорах

Колмогорова. В этом случае в качестве меры расхождения теоретического и экспериментального распределений принимают максимальное абсолютное значение разности модуля теоретической $F_T(t)$ и статической $F_i(t)$ функций:

$$\lambda = D \cdot \sqrt{n} . \quad (3)$$

Проверку проведем для уровня значимости α =0,0005.

Таблица 2. Расчет модулей функций по критерию Колмогорова

F_i	F_T	$F_T - F_i$
0,576	0,657	0,081
0,799	0,882	0,083
0,881	0,960	0,079
0,930	0,986	0,056
0,960	0,995	0,035
0,984	0,998	0,014
1,000	0,999	-0,001

В табл. 2 $F_T = 1 - e^{-\lambda_\Sigma \cdot t}$ - теоретическая функция распределения для экспоненциального закона распределения. Модуль максимального отклонения теоретического значения F_T от фактического значения F_i составил D=0,08.

Из таблиц для α=0,01 критическое значение критерия Колмогорова λ_α=2,03. [4]

Для 628 отказов значение

$$\lambda = D \cdot \sqrt{n} = 0{,}08 \cdot \sqrt{628} = 2{,}005 .$$

Поскольку $\lambda < \lambda_\alpha$, гипотеза о принадлежности выборки к экспоненциальному закону принимается.

В соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятности возможно допущение о том, что если закон случайной величины системы известен, то входящие в нее элементы имеют такие же законы распределения такой же случайной величины. В данном случае экспоненциальный закон распределения наработок (времени безотказной работы) имеет электрооборудование, составляющее РЭС: трансформаторы, коммутационные аппараты (разъединители, выключатели), опоры ЛЭП, кабельные вставки, изоляторы и др., а интенсивность отказов РЭС λ_Σ есть сумма интенсивностей отказов входящих в эту систему i-х элементов:

$$\lambda_\Sigma = \Sigma \lambda_i . \quad (4)$$

Таблица 4. Действия АПВ распределительных сетей 6-10 кВ

№ п/п	Наименование	Обозначение	Год наблюдения			Среднее значение за три года наблюдений	Отклонение от среднего значения, %
			1-й год	2-й год	3-й год		
1	Успешные АПВ	У	1395	1089	1392	1292	+7,9; -15,7
2	Неуспешные АПВ	Н	1216	920	1230	1122	+9,6; -18,0
3	Учтенные действия АПВ	У+Н	2611	2009	2622	2414	+8,6; -16,7
4	Число отказов устройств АПВ во время срабатывания	О	127	61	139	109	–
5	Неуспешные АПВ при грозах	НГ	367	220	328	305	–
6	Число отказов устройств АПВ при грозах	ОГ	19	3	19	13,6	–
7	Вероятность успешного АПВ	У У+Н	0,534	0,542	0,531	0,535	+1,3; -0,7
8	Вероятность неуспешного АПВ	Н У+Н	0,465		0,469	0,465	+0,8; -1,7
9	Вероятность отказа устройства АПВ при срабатывании	О У+Н	0,048	0,030	0,053	0,0436	–
10	Вероятность неуспешного АПВ при грозах	НГ У+Н	0,140	0,109	0,125	0,124	–
11	Вероятность устройства АПВ при грозах	ОГ У+Н	0,00727	0,00149	0,00724	0,0053	–

Применительно к поверхностным воздушным ЛЭП угольных шахт и входящего в него ЭО наличие экспоненциального закона распределения времени безотказной работы и времени восстановления было доказано в [3].

Исходя из этого, были рассчитаны приводимые в табл. 3 показатели надежности ЭО РЭС: средняя интенсивность отказов $\lambda_{i.cp}$, среднее время аварийного простоя $t_{i.a.cp}$ и средняя вероятность простоя (аварийного простоя)

$$P_i(Э) = \mu_i / \lambda_i + \mu_i \approx \lambda_{i.cp} \cdot t_{i.a.cp},$$

где $\mu_i = 1/t_{a.cp} \approx 1/T_B$- интенсивность восстановления, 1/ч.

Вероятность простоя (аварийного простоя) Р(Э) является удобной величиной для расчетов экономического выражения надежности [3].

С помощью приведенных в табл. 2 интенсивностей отказов можно рассчитать вероятность появления любого k=1,2,3,... числа отказов вида электрооборудования, входящего в состав некоторой РЭС за время t по формуле Пуассона.

$$P_k = \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda t} \qquad (5)$$

По формуле (5) рассчитаны вероятности появления различного числа отказов для ВЛ на ЖБ опорах, разъединителей 6-10 кВ на ВЛ и кабельных вставок 6-10 кВ на ВЛ в течение года. На основании этих данных для примера построен график вероятности появления отказов для ВЛ на ЖБ опорах (рис.2)

Отключения РЭС во время гроз, как показано выше, занимают от общего их числа немногим менее 30%. Причины отключений – это обрывы и схлестывания проводов при сильных и порывистых ветрах, разрушения разрядников при токах, превышающих расчетные значения, разрушения разрядников при близких от опор разрядах молнии, прогибы и поломки опор, разрушение разъединителей, установленных на ВЛ и др.

Время аварийного простоя при таких отключениях формируется следующим образом: в 80 % длительность не превышает 3,5 ч, 10 % случаев приходится на промежуток 3,5 – 6 часов, на простои более 24 ч приходится менее 1 % всех отключений.

Отключения при грозах сопровождаются действием АПВ (автоматического повторного включения), что в ряде случаев не ведет к успеху. В табл. 4 приведены результаты обработки действий АПВ 6-10 кВ за три года наблюдений из которых можно сделать следующие выводы:

- вероятностный режим успешных и неуспешных действий АПВ за 3 года наблюдений оставался практически стационарным (отклонения от среднего значения не превышают +1,3 и – 0,7 % для успешных и +0,8 и – 1,7 % для неуспешных АПВ);
- вероятность отказов устройств АПВ при срабатывании относительно невелика (в среднем 4,36 % от общего числа устройств, находившихся под наблюдением);
- потоки успешных (неуспешных) АПВ с достаточной для практики точностью можно считать простейшими, т.е. пуассоновскими, а для расчетов периодичности технического обслуживания применять аппарат теории массового обслуживания;
- бесперебойность электроснабжения может быть существенно улучшена за счет применения средств определения характера и места повреждения, вызывающих неуспешные АПВ;
- существующие устройства АПВ, установленные на питающих РЭС подстанциях, характеризуются относительно высокой вероятностью неуспешных действий при грозах.

Ранее было отмечено, что более 50 % всех отключений приходится на невыясненные причины. Практика показывает, что такого рода перерывы электроснабжения являются следствием отсутствия на РЭС регистраторов аварийных событий. В связи с этим в большинстве случаев оказывается невозможно определить характер отказа и причину его возникновения, как и указать хотя бы приблизительно область обхода ВЛ. Эти трудности особенно проявляются при эксплуатации протяженных ВЛ, проходящих в труднодоступной местности, особенно в зимнее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://www.kuzbassenergo-rsk.ru
2. *Разгильдеев, Г.И.* Характеристика распределительных сетей системы электроснабжения Кемеровской области / Г.И. Разгильдеев, Е.В. Ногин // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. 2009, № 5, с. 65-69
3. *Разгильдеев, Г.И.* Надежность электрооборудования и электроснабжения угольных шахт: дис. докт. тех. наук: 05.281. – Л.1971. – 245 с.
4. *Кремер, Н.Ш.* Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Юнити, 2007, с.364-366

Авторы статьи:

Разгильдеев
Геннадий Иннокентьевич
– докт. техн. наук, проф. каф. электроснабжения горных и промышленных предп. КузГТУ, тел. 8(3842)39-63-20

Ногин
Евгений Витальевич
– соискатель каф. электроснабжения горных и промышленных предприятий КузГТУ, , тел. 8(3842)39-63-20