

О. И. Карпенко, преподаватель, А. Н. Шилин, д-р техн. наук

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Волгоградский государственный технический университет

(e-mail: eltech@vstu.ru)

Приведены основные показатели надежности отдельных элементов электрических сетей. Показаны основные формулы для расчета показателей надежности электрических сетей и методика расчета. Приведены пример расчета надежности системы электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: надежность электрической сети, показатели надежности, отказ, простой, время восстановления.

The article analyzes reliability parameters and calculation of reliability of Power Supply System. The calculation example of reliability of Power Supply System are presented.

Keywords: reliability of Power Supply System, reliability parameters, refusal, idle, restoration time.

Одной из главных проблем в энергетике является энергосбережение и экономия ресурсов. Основным резервом экономии электроэнергии является повышение надежности электрической сети. Надежность участка сети определяется надежностью и параметрами входящих в ее состав элементов (трансформаторов, коммутационной аппаратуры, линий электропередачи и др.) и схемой их соединения.

Методы расчета, которые применяются для оценки надежности технических объектов, весьма разнообразны [1]. Все они базируются на теории вероятности, при этом отказы в работе объекта, рассматриваются как случайные события, которые во времени образуют случайный процесс. В ряде случаев могут дополнительно потребоваться расчеты количественных показателей надежности, в частности, для решения следующих вопросов:

сопоставления различных мероприятий, предусматриваемых для обеспечения требуемого потребителем уровня надежности;

обоснования экономической целесообразности повышения надежности (степени резервирования) сверх нормативных требований.

В качестве показателей, количественно характеризующих надежность участка сети и ее элементов, принимаются:

параметр потока отказов (среднее количество отказов в год) ω , 1/год;

частота плановых ремонтов, $\omega_{\text{п}}$, 1/год;

среднее время восстановления (средняя продолжительность послеаварийного ремонта или замены объекта в долях года) $T_{\text{в}}$, лет;

среднее время простоя при преднамеренных отключениях, $T_{\text{р}}$, лет;

коэффициент готовности (вероятность работоспособного состояния объекта в промежутках между плановыми простоями) $K_{\text{г}}$, о. е.;

вероятность вынужденного простоя (вероятность неработоспособного состояния объекта в промежутках между плановыми простоями) $K_{\text{в}}$, о. е.;

вероятность безотказной работы в течение года (вероятность того, что за год не произойдет ни одного отказа объекта) $P_{m=0}$.

Перечисленные показатели надежности являются техническими характеристиками надежности и позволяют сопоставлять между собой надежность нескольких объектов, а также проверять соответствие рассматриваемых вариантов схем требуемому уровню надежности, если он задан количественно.

Показатели надежности электрооборудования и линий электропередачи, находящихся в эксплуатации, оцениваются по материалам ОАО «Фирма ОРГРЭС» [2]. Эти показатели предназначены для сравнительных расчетов и оценок электрических сетей, энергосистем, систем электроснабжения потребителей и узлов нагрузки, оценки уровня надежности различных схем, определения целесообразности и эф-

фективности мероприятий и средств повышения надежности и не предназначены для определения надежности отдельных видов оборудования и включения в технические задания на разработку нового оборудования.

Показатели надежности определены ОРГРЭС по данным об отказах действующего электрооборудования и линий электропередачи, содержащихся в картах отказов за период 1983–1989 гг., актах расследований технологических нарушений в работе за период 1990–1994 гг., а также в «Указаниях по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками», утвержденных Минэнерго СССР 03.09.1984 г. Была установлена достаточность и представительность выборки данных за 7-летний период, поскольку за этот период не выявлено существенных изменений показателей надежности.

Расчет показателей надежности электроснабжения нагрузочного узла анализируется по схеме замещения сети на участке между источниками питания и рассматриваемым узлом. В схеме с последовательно соединенными элементами, отказ любого элемента вызывает отказ всей ветви, а в схеме с параллельно соеди-

ненными ветвями, отключение любой ветви не приводит к отказу всей сети. В последовательную цепь кроме элементов ветви вводятся также смежные выключатели, повреждение которых с развитием аварии приводит к отключению рассматриваемой цепи.

Характеристики надежности ветвей, состоящих из последовательно соединенных элементов, рассчитываются по формулам, приведенным в табл. 1. Свернутая схема замещения анализируется следующим образом: для случаев отказа каждой из ветвей в отдельности и одновременного отключения возможных сочетаний по две ветви определяются коэффициенты ограничения нагрузки потребителей ϵ (отношение нагрузки, вынужденно отключаемой в данном послеаварийном режиме, к нагрузке нормального режима).

Для анализа последствий отказов ветвей схемы и их сочетаний удобно воспользоваться квадратной матрицей (таблицей) ограничений, элементы которой являются коэффициентами ограничения нагрузки при одновременном отказе i -й и j -й ветвей. Элементы главной диагонали такой матрицы соответствуют коэффициентам ограничения нагрузки при отказах отдельных i -х ветвей.

Таблица 1

Формулы для расчета показателей надежности электрических сетей

Показатели	Соединения элементов	
	последовательное	параллельное
Параметр потока отказов ω , отказ/год	$\sum_{i=1}^n \omega_i$	$\omega_1 K_{B2} + \omega_2 K_{B1}$
Коэффициент вынужденного простоя K_B , о. е.	$\sum_{i=1}^n K_{B1} = \sum_{i=1}^n T_{B1} \omega_i$	$K_{B1} K_{B2} + K_{B1\Pi2} + K_{B2\Pi1}$
Коэффициент совместного вынужденного простоя одного элемента и планового ремонта второго, $K_{B1\Pi2}$, о. е.	–	$0,5\omega_1 K_{\Pi} T_{\Pi2}$ при $T_{\Pi2} \geq T_{\Pi1}$ $K_{\Pi1}(K_{\Pi2} - 0,5T_{B1}\omega_{\Pi2})$ при $T_{\Pi2} > T_{B2}$
Среднее время восстановления T_B , лет/отказ	K_B / ω	K_B / ω
Средняя частота плановых простоев Ω_{Π} , простой/год	$\Omega_{\Pi\max}$	–
Коэффициент планового простоя K_{Π} , о. е.	$\gamma \sum_{i=1}^{n-m} T_{\Pi i} (\omega_{\Pi i} - \omega_{\Pi i-1})^*$	–
Коэффициент готовности K_G , о.е.	$\frac{1 - (K_{\Pi} + K_B)}{1 - K_{\Pi}}$	$1 - K_B$
Вероятность безотказной работы в течение года $P_{m=0}$, о. е.	$e^{-\omega}$	$e^{-\omega}$
Математическое ожидание ущерба от вынужденных простоев \bar{V}_B , тыс. руб./год	$P_{\max} u K_B \epsilon$	$P_{\max} u (\sum_{i=1}^n K_{B1} \epsilon_i + \sum_{jk=1}^{C_n^2} K_{Bjk} \epsilon_{jk})^{**}$

Параметры потока отказов и коэффициенты вынужденного простоя определяются по формулам табл. 1 для случаев отказа отдельных ветвей и их сочетаний по две, при которых $\varepsilon = 1$ (что соответствует полному отключению нагрузки потребителей). Для схемы в целом указанные показатели суммируются. Аналогично могут быть определены такие же показатели для отказов, приводящих к частичному ограничению нагрузки ($0 < \varepsilon < 1$).

Обозначения:

*Элементы i в сумме располагаются в порядке убывания T_{Pi} . Слагаемые, для которых $\omega_{Pi} - \omega_{Pi-1} \leq 0$, в сумму не включаются (их количество обозначено m). Коэффициент $\gamma = 1,2$ при $n > 3$; $\gamma = 1$ при $n \leq 3$; $\omega_{по} = 0$.

**При $\varepsilon_i \neq 0$ вторая сумма формулы может не учитываться.

u – удельная стоимость компенсации от ущерба аварийных ограничений;

c_n^2 – число сочетаний из n по 2.

Удельные показатели ущерба от аварийных ограничений зависят от структурного состава потребителей (удельного веса промышленности, быта и сферы обслуживания, сельского хозяйства, транспорта и строительства) и степени их ограничения. В настоящее время в России отсутствует рекомендованная регулируемыми органами удельная стоимость компенсации ущерба от аварийных ограничений потребителей электроэнергии. В зарубежной литературе удельные ущербы от внезапных ограничений принимаются в диапазоне 2–4,5 долл./кВт·ч в зависимости от их типа и длительности применительно к условиям той или иной страны. Наиболее часто дифференциацию удельных ущербов выполняют для трех групп потребителей: промышленных, коммерческих и бытовых.

Предложенный анализ надежности сети может применяться для различных процессов проектирования и реконструкции различных объектов сети электроснабжения Камышинского района. Результаты анализа надежности могут быть использованы для оптимизации общего жизненного цикла затрат по всем компонентам сети.

Параметр потока отказов системы относительно узла нагрузки П

$$\begin{aligned} \lambda_{сП} &= \lambda_{Т1} + \lambda_{Л1}(q_{Л2} + q_{Л3}) + (\lambda_{Л2} + \lambda_{Л3})q_{Л1} + \lambda_{Т2}q_{Т2} = \\ &= \lambda_{Т1} + \lambda_{сЛ1}l_{Л1}(\lambda_{сЛ2}l_{Л2}\bar{T}_{ВЛ2} + \lambda_{сЛ3}l_{Л3}\bar{T}_{ВЛ3}) + \lambda_{сЛ1}l_{Л1}\bar{T}_{ВЛ1}(\lambda_{сЛ2}l_{Л2} + \lambda_{сЛ3}l_{Л3}) + 2\lambda_{Т2}^2\bar{T}_{ВТ2} = \\ &= 0,02 + 0,006 \cdot 150(0,006 \cdot 180 \cdot 10 + 0,006 \cdot 120 \cdot 10)/8760 + \\ &+ 0,006 \cdot 150 \cdot 10(0,006 \cdot 180 + 0,006 \cdot 120)/8760 + 2 \cdot 0,02^2 \cdot 60/8760 = 0,0236 \quad 1/\text{Год}. \end{aligned}$$

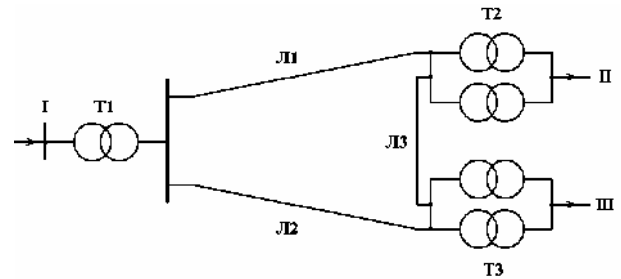


Рис. 1. Схема системы электроснабжения потребителей

Пример анализа надежности. Определить параметры потоков отказов и средние времена восстановления относительно шин низшего напряжения понижающих подстанций II и III, а также суммарный недоотпуск электроэнергии потребителям II и III систем (рис. 1) без учета преднамеренных отключений элементов [3]. Среднегодовая потребляемая мощность каждой подстанции составляет 100 МВт (табл. 2).

Таблица 2

Показатели надежности

Показатель надежности	Элемент сети					
	Л1	Л2	Л3	Т1	Т2	Т3
λ_0 , 1/(км·год)	0,006	0,006	0,006	–	–	–
λ , 1/год	–	–	–	0,02	0,02/0,02	0,02/0,02
l , км	150	180	120	–	–	–
$T_{в}$, ч	10	10	10	100	60/60	100/100

Пропускная способность каждого элемента системы достаточна для пропуска всей необходимой мощности потребителям. Расчетная схема для определения показателей надежности схемы относительно узла II нагрузки приведена на рис. 2, а.

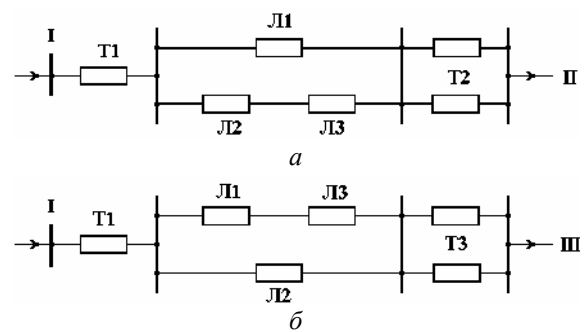


Рис. 2. Расчетная схема для вычисления показателей надежности:

а – для узла II; б – для узла III

Средняя вероятность отказа системы, питающей нагрузку узла II,

$$q_{сII} = q_{T1} + q_{Л1}(q_{Л2} + q_{Л3}) + q_{T2}^2 = \lambda_{T1}\bar{T}_{BT1} + \lambda_{Л1}\bar{T}_{ВЛ1}(\lambda_{Л2}\bar{T}_{ВЛ2} + \lambda_{Л3}\bar{T}_{ВЛ3}) + (\lambda_{T2}\bar{T}_{BT2})^2 = 0,02 \cdot 100/8760 + 0,9 \cdot 10(1,08 \cdot 10 + 0,72 \cdot 10)/8760 + (0,02 \cdot 60)^2 / 8760^2 = 2,34 \cdot 10^{-4}.$$

Среднее время аварийного восстановления системы относительно узла II

$$\bar{T}_{ВСII} = \frac{q_{сII}}{\lambda_{сII}} = \frac{2,34 \cdot 10^{-4}}{0,0236} = 0,0099 \text{ года, т. е. } 86,9 \text{ ч.}$$

Недоотпущенная потребителям подстанции электроэнергия в узле II

$$\Delta \mathcal{E}_{II} = \bar{P}_{II}\bar{T}_{Г}q_{сII} = 100 \cdot 10^3 \cdot 8760 \cdot 2,34 \cdot 10^{-4} = 204984 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Расчетная схема показателей надежности относительно узла III нагрузки приведена на рис. 2, б:

$$\lambda_{сIII} = \lambda_{T1} + \lambda_{Л2}(q_{Л1} + q_{Л3}) + (\lambda_{Л1} + \lambda_{Л3})q_{Л2} + 2\lambda_{T2}q_{T2} = 0,02 + 1,08(1,027 \cdot 10^3 + 0,82 \cdot 10^{-3}) + 1,23 \cdot 10^{-3}(0,9 + 0,72) + 2 \cdot 0,02 \cdot 1,37 \cdot 10^{-4} = 0,024 \text{ 1/год};$$

$$q_{сIII} = q_{T1} + q_{Л2}(q_{Л1} + q_{Л3}) + q_{T2}^2 = 2,28 \cdot 10^{-4} + 2,28 \cdot 10^{-6} + 1,88 \cdot 10^{-8} = 2,3 \cdot 10^{-4};$$

$$\bar{T}_{ВСIII} = \frac{q_{сIII}}{\lambda_{сIII}} = \frac{2,3 \cdot 10^{-4}}{0,024} = 0,0096 \text{ года, т. е. } 84 \text{ ч.}$$

$$\Delta \mathcal{E}_{III} = \bar{P}_{III}\bar{T}_{Г}q_{сIII} = 100 \cdot 10^3 \cdot 8760 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} = 201480 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Таблица 3

Результаты расчета показателей надежности

Степень учета элементов схемы	Показатели надежности						
	$\lambda_{сII}$, 1/год	$\lambda_{сIII}$, 1/год	$\bar{T}_{ВСII}$, ч	$\bar{T}_{ВСIII}$, ч	$\Delta \mathcal{E}_{II}$, кВт·ч	$\Delta \mathcal{E}_{III}$, кВт·ч	$\Delta \mathcal{E}_I$, кВт·ч
Учет всех элементов	0,0236	0,024	86,9	84	204984	201480	406464
Учет только T1	0,02	0,02	100	100	200000	200000	400000
Разница, %	15,3	16,7	15,1	19,1	2,4	0,7	1,6

Из анализа алгоритмов и результатов расчетов следует, что основное влияние на показатели надежности оказывает нерезервированный

элемент схемы – трансформатор T1. В табл. 3 приведены результаты расчетов показателей надежности схемы от недоотпуска электроэнергии с учетом и без учета резервированной части схемы (т. е. учтен только T1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИ СПИСОК

1. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
2. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 2-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007. – 352 с.
3. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях: учеб. пособие для электроэнерг. спец. / В. В. Ежков, Г. К. Зарудский, Э. Н. Зуев; под. ред. В. А. Строева. – М.: Высшая школа, 1999. – 352 с.