

УДК 621.31

А.Ю. Ефимов, А.О. Алехин

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ КАТЕГОРИИ

Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева

В статье рассмотрены вопросы оценки надежности электрооборудования и электрических сетей, применяемых для электроснабжения потребителей первой и второй категории. Проанализированы основные причины повреждения воздушных и кабельных линий, трансформаторных подстанций и распределительных пунктов. Приведены расчеты показателей надежности: вероятности безотказной работы, среднего времени восстановления и коэффициента готовности для потребителей первой и второй категории без использования автономного источника и совместно с ним (в течение года). Представлены функциональные схемы участка электрической сети и показаны этапы упрощения расчетной схемы. Сделан вывод о влиянии на безотказную работу системы электроснабжения автономного источника питания.

Ключевые слова: автономный источник питания, надежность, система электроснабжения, электрическая сеть.

1. Введение

Одной из основных задач электроэнергетики является оценка надежности электрических сетей, т.е., получение детальной количественной информации о свойствах системы, характеризующих ее безотказность, ремонтпригодность, долговечность и т.д. Под надежностью системы электроснабжения (СЭС) будем понимать, прежде всего, бесперебойное питание потребителя в заданные промежутки времени с заданными показателями.

II. Показатели надежности

Важным фактором, непосредственно влияющим на надежность СЭС, является «отказ». Можно выделить следующие типы отказов элементов СЭС:

- 1) короткое замыкание;
- 2) обрыв цепи;
- 3) несрабатывание.

Для оценки СЭС с точки зрения бесперебойной работы используются показатели надежности. Под показателями надежности понимают количественные характеристики СЭС, определяющие ее способность обеспе-

чивать электроэнергией потребителей. Значения показателей надежности могут быть получены с помощью испытаний или по результатам эксплуатации. Показатели надежности можно классифицировать на показатели для невосстанавливаемых изделий и для восстанавливаемых. Также могут быть использованы комплексные показатели. Оценку надежности элементов СЭС можно осуществлять на основе всех показателей или выбранной совокупности показателей.

К единичным показателям надежности невосстанавливаемых элементов относят:

$P(t)$ – вероятность безотказной работы;

$Q(t)$ – вероятность отказа;

$a(t)$ – частота отказов;

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов;

T_{cp} – среднее время безотказной работы.

К единичным показателям надежности восстанавливаемых элементов относят:

$S(t)$ – вероятность восстановления;

$G(t)$ – вероятность невосстановления;

Va – частота восстановления;

$\mu(t)$ – интенсивность восстановления;

$T(t)$ – среднее время восстановления;

$\omega(t)$ – параметр потока отказов.

К комплексным показателям надежности восстанавливаемых элементов относят:

K_r – коэффициент готовности;

K_n – коэффициент неготовности (вынужденного простоя);

$K_{ог}$ – коэффициент оперативной готовности;

$T_{и}$ – коэффициент технического использования.

Вследствие достаточно сложной структуры, включающей большое количество элементов, оценка надежности электротехнических комплексов является, как правило, трудоемким процессом. Предлагаемые методы оценки надежности ориентированы в основном на конкретные случаи и не могут быть использованы применительно к распределительным сетям. Оценка надежности электроснабжения (ЭС) требует анализа возможных причин отказов элементов системы. При резервировании необходимо принимать во внимание время ввода резерва. Это позволит избежать нарушений в технологических процессах и возникновений аварийных ситуаций. Важным является правильный выбор электрооборудования и своевременное проведение ремонтов при эксплуатации электрооборудования.

В настоящее время не существует универсального метода расчета надежности схем электрических соединений, хотя имеется большое число

частных методов, основными из которых являются: аналитический, таблично-логический, метод, использующий теорию Марковских процессов; метод дерева отказов и др. Отличительные особенности методов определяются уровнем допущений, полнотой учитываемых факторов, структурой и содержанием требуемой исходной информации.

III. Оценка надежности

Для оценки надежности электрических сетей широкое распространение получили элементные методы расчетов. Энергосистемы представляют собой сочетание последовательно и параллельно соединенных элементов. Определение показателей надежности таких структур производится поэтапным объединением (эквивалентированием) элементов по формулам для последовательно и параллельно соединенных элементов.

Была рассчитана вероятность безотказного электроснабжения потребителей первой и второй категории «П» без использования автономного источника (АИ) и совместно с ним в течение календарного года. Результаты средней наработки указаны в часах. Исходные данные представлены в табл. 1 и 2.

Схема электроснабжения без АИ представлена на рис. 1, схема электроснабжения с АИ – на рис. 2.

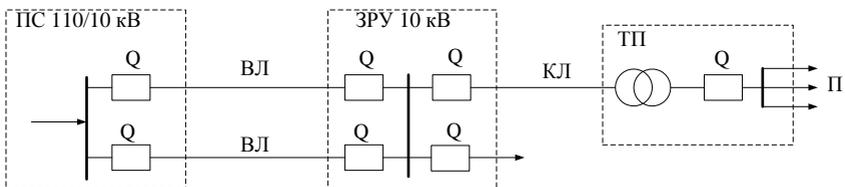


Рис. 1. Функциональная схема участка электрической сети без АИ

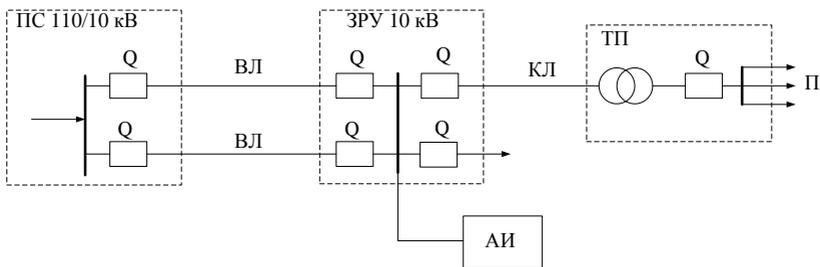


Рис. 2. Функциональная схема участка электрической сети с АИ

Таблица 1.
Среднее время аварийного простоя элементов сети

Элемент	Обозначение	Ед. из.	Значение
Линии	$t_{кл}$	(год)·10 ⁻³	1,80
Трансформатора	$t_{кт}$	(год)·10 ⁻³	0,03
Выключателя	$t_{кв}$	(год)·10 ⁻³	1,70
Сборных шин	$t_{кш}$	(год)·10 ⁻³	0,80

Таблица 2.
Интенсивность отказа элементов сети

Элемент	Обозначение	Ед. из.	Значение
Линии	$\lambda_{л}$	1/год	0,25
Трансформатора	$\lambda_{т}$	1/год	0,10
Выключателя	$\lambda_{в}$	1/год	0,15
Сборных шин	$\lambda_{ш}$	1/год	0,01

При выполнении расчетов учитывалось, что всем выключателям соответствуют два вида отказов: «короткое замыкание» и «обрыв». Интенсивность отказов равна $\lambda_{кз} = \lambda_{об} = 0,5 \cdot \lambda_{в}$. Последствиями отказа типа «короткое замыкание» являются короткое замыкание на сборных шинах и нарушение электроснабжения потребителей.

В расчетной схеме приняты следующие обозначения. Одной звездочкой (*) обозначен отказ выключателя, приводящий к короткому замыканию на сборных шинах. Двумя звездочками (**) обозначен отказ выключателя, приводящий к обрыву цепи.

Составим схему замещения сети без АИ (рис. 3).

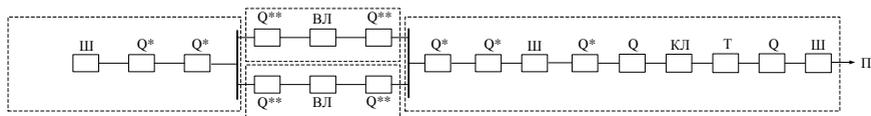


Рис. 3. Схема замещения электросети

Интенсивность отказов для узлов с последовательно соединенными элементами:

$$\lambda_A = 3 \cdot \lambda_{ш} + 5 \cdot \lambda_{кз} + 2 \cdot \lambda_{в} + \lambda_{кл} + \lambda_{т}; \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{Б}} = \lambda_{\text{В}} = \lambda_{\text{Д}} + 2 \cdot \lambda_{\text{об}}. \quad (2)$$

Определим интенсивность отказов для узлов А, Б и В:

$$\lambda_{\text{А}} = 3 \cdot 0,01 + 5 \cdot 0,075 + 0,15 + 0,03 = 0,835 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_{\text{Б}} = \lambda_{\text{В}} = 2 \cdot 0,25 + 0,075 = 0,4 \text{ год}^{-1}.$$

В расчетной схеме все последовательно соединенные элементы объединим в узлы А, Б и В (рис. 4).

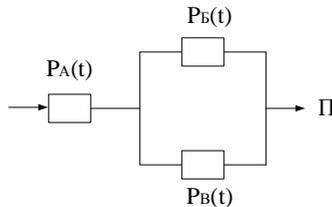


Рис. 4. Расчетная схема

Вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов узлов определяется по формуле:

$$P_{\text{А}}(t) = e^{-\lambda_{\text{А}} t}. \quad (3)$$

Определим вероятность безотказной работы узлов: А, Б и В, для момента времени $t=1$ год:

$$P_{\text{А}}(1) = e^{-0,835 \cdot 1} = 0,434;$$

$$P_{\text{Б}}(1) = P_{\text{В}}(1) = e^{-0,4 \cdot 1} = 0,670.$$

Для параллельно соединённых узлов Б и В (рис. 4) вероятность безотказной работы определим по формуле:

$$P_{\text{БВ}}(1) = 1 - (1 - P_{\text{Б}}(t)) \cdot (1 - P_{\text{В}}(t));$$

$$P_{\text{БВ}}(1) = 1 - (1 - 0,67) \cdot (1 - 0,67) = 0,891. \quad (4)$$

Дальнейшее упрощение расчетной схемы представлено на рис. 5.

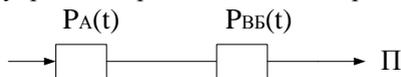


Рис. 5. Упрощение расчетной схемы

При последовательном соединении узлов вероятность безотказной работы рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} P_{\text{АБВ}}(1) &= P_{\text{А}}(t) \cdot P_{\text{БВ}}(t); \\ P_{\text{АБВ}}(1) &= 0,891 \cdot 0,434 = 0,386. \end{aligned} \quad (5)$$

Средняя наработка до отказа вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{Б}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{В}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{Б}} + \lambda_{\text{В}}}; \\ T &= \frac{1}{0,835 + 0,4} + \frac{1}{0,835 + 0,4} - \frac{1}{0,835 + 0,4 + 0,4} = 0,401 \text{ года}. \end{aligned} \quad (6)$$

или в часах:

$$T = 0,401 \cdot 8760 = 3512,792$$

Для каждого элемента сети вероятное время нахождения его в аварийном простое в течение времени $t = 1$ год, определяется:

$$T_{\text{авар}} = t_k \left(1 - e^{-\lambda_k t}\right). \quad (7)$$

Для каждого элемента определим вероятное время нахождения элемента в аварийном простое:

$$T_{\text{аварЛ}} = 0,0018 \left(1 - e^{-0,25 \cdot 1}\right) = 39,84 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$T_{\text{аварКЛ}} = 0,001 \left(1 - e^{-0,1 \cdot 1}\right) = 9,52 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$T_{\text{аварГ}} = 0,03 \left(1 - e^{-0,03 \cdot 1}\right) = 88,72 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$T_{\text{аварВ}} = 0,0017 \left(1 - e^{-0,15 \cdot 1}\right) = 23,69 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$T_{\text{аварШ}} = 0,0008 \left(1 - e^{-0,01 \cdot 1}\right) = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ г}.$$

Среднее время восстановления последовательной цепи из n элементов определяется по формуле:

$$T_B = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - T_{\text{авар.}k}). \quad (8)$$

Определим среднее время восстановления:

$$T_B = 1 - (1 - 39,84 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (1 - 9,52 \cdot 10^{-5})^1 \cdot (1 - 88,72 \cdot 10^{-5})^1 \cdot (1 - 23,69 \cdot 10^{-5})^7 \cdot (1 - 0,8 \cdot 10^{-5})^3 = 0,003\text{г.}$$

или в часах:

$$T_p = 0,003 \cdot 8760 = 30,27$$

Коэффициент готовности K_Γ , т. е. вероятность того, что участок сети окажется работоспособным в любой момент времени, вычисляется по формуле:

$$K_\Gamma = \frac{T_p}{T_p + T_B}. \quad (9)$$

Определим коэффициент готовности:

$$K_\Gamma = \frac{6817,12}{6817,12 + 30,27} = 0,991.$$

Аварийные и резервные источники питания используются для восстановления электроснабжения в случае, если на основной электросети произошла авария или любая другая внештатная ситуация, которая привела к существенному сокращению количества электроэнергии в сети.

При использовании автономного источника схема принимает следующий вид (рис. 6).

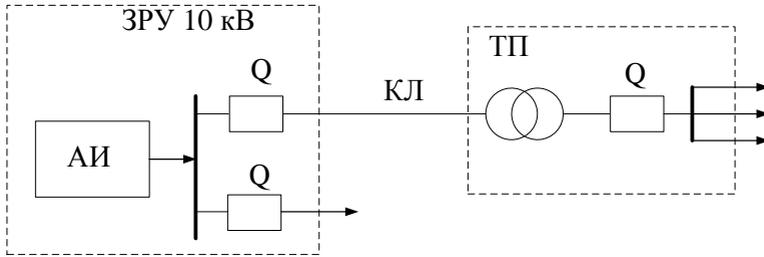


Рис. 6. Функциональная схема участка электрической сети, питающейся от автономного источника

Составим схему замещения сети с АИ (рис. 7).



Рис. 7. Схема замещения электросети с аварийным источником

Интенсивность отказов для узлов с последовательно соединенными элементами вычисляется по формуле:

$$\lambda = 3 \cdot \lambda_{Ш} + 5 \cdot \lambda_{КЗ} + 2 \cdot \lambda_{В} + \lambda_{КЛ} + \lambda_{Т};$$

$$\lambda = 2 \cdot 0,01 + 1 \cdot 0,075 + 2 \cdot 0,15 + 0,1 + 0,03 = 0,525 \text{ год}^{-1} \quad (10)$$

Вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов узлов определяется по формуле 3.

$$P = e^{-0,525 \cdot 1} = 0,591.$$

Средняя наработка до отказа вычисляется по формуле:

$$T = \frac{1}{\lambda};$$

$$T = \frac{1}{0,525} = 1,9 \text{ года} \quad (11)$$

или в часах:

$$T = 1,9 \cdot 8760 = 16685,714$$

Для каждого элемента сети вероятное время нахождения его в аварийном простое в течение времени $t=1$ год, определяется по формуле 7.

$$T_{\text{аварКЛ}} = 9,52 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$T_{\text{аварГ}} = 88,72 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$T_{\text{аварВ}} = 23,69 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$T_{\text{аварШ}} = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ г}.$$

Среднее время восстановления последовательной цепи из n элементов определяется по формуле 8.

$$T_{\text{в}} = 1 - \left(1 - 9,56 \cdot 10^{-5}\right)^1 \cdot \left(1 - 23,69 \cdot 10^{-5}\right)^2 \cdot \left(1 - 0,8 \cdot 10^{-5}\right)^2 \cdot \left(1 - 88,72 \cdot 10^{-5}\right)^1 = 0,001 \text{ г}.$$

или, в часах:

$$T_{\text{р}} = 0,001 \cdot 8760 = 12,891$$

Коэффициент готовности $K_{\text{Г}}$, т.е., вероятность того, что участок сети окажется работоспособным в любой момент времени, вычисляется по формуле 9:

$$K_{\text{Г}} = \frac{16685,714}{16685,714 + 12,89} = 0,999.$$

IV. Выводы

Исследования показали, что вероятность безотказной работы Р системы электроснабжения без АИ меньше, чем в системе с АИ, $0,386 < 0,591$ соответственно. При этом среднее время восстановления $T_{\text{в}}$ системы электроснабжения без АИ больше, чем в системе с АИ, $30,27 > 12,89$ соответственно. Коэффициент готовности $K_{\text{Г}}$ системы электроснабжения без АИ меньше, чем в системе с АИ, $0,991 < 0,999$ соответственно. Это показывает, что использование аварийного источника питания положительно сказывается на надежности системы электроснабжения потребителей первой и второй категории надежности. Обеспечивается защита подключенной

электротехники от любых перепадов напряжения в штатном режиме работы, что, в свою очередь, имеет следствием:

- 1) уменьшение опасности для жизни людей;
- 2) снижение риска поломки сложного и дорогостоящего оборудования;
- 3) уменьшение времени простоя оборудования, рабочих и технологического процесса на производстве;
- 4) снижение риска массового возникновения брака или недоотпуска продукции.

© Ефимов А.Ю., 2019

© Алехин А.О., 2019

Библиографический список

- [1] Агеев В.А. Сравнительный анализ методов расчета режимов электрических сетей // Сельский механизатор. 2018. № 1. С. 30-33.
- [2] Воротницкий В.Э. Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. Динамика, структура, методы анализа и мероприятия // Энергосбережение. 2005. № 2. С. 90-94; № 3. С. 92-97.
- [3] Малафеев С.И. Надежность электроснабжения: учеб.пос.. СПб.: Лань, 2017. – 368 с.
- [4] Слышалов В.К. Расчет показателей надежности распределительных электрических сетей при наличии автоматического включения резерва. Омск: Изд-во ГОУВПО, 2011. – 4 с.
- [5] Ефимов А.Ю. Математическое моделирование сельских электрических сетей с целью повышения их безотказной работы: автореф. дис. канд. техн. наук, Мордовский гос. ун-т им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия, 2000. – 20 с.
- [6] Ефимов А.Ю., Кузнецов Д.В., Келейников С.А. и др. Оценка надежности систем теплоснабжения // Техническое обеспечение перспективных технологий. Сборник научных трудов. Саранск: Изд-во НИ МГУ им. Н.П. Огарева, 2001. С. 101-103.

A.Yu. Efimov, A.O. Alehin

**ASSESSMENT OF RELIABILITY OF POWER SUPPLY
CONSUMERS OF THE FIRST
AND SECOND CATEGORY**

Ogarev Mordovia State University
Saransk, Russia

Abstract. One of the most important tasks in the design and operation of electrical complexes and systems is to assess their reliability. The article is devoted to assessing the reliability of electrical equipment and electrical networks used to supply consumers of the first and second categories. An analysis of the main causes of damage to overhead and cable lines, transformer substations and distribution points was carried out. Calculations of reliability indicators (probability of failure-free operation, average recovery time, availability factor) for consumers of the first and second categories without using an autonomous source and together with it (during the year) were carried out. The functional diagrams of the electric network section are presented and the steps to simplify the design scheme are shown. It is concluded that the autonomous power source is wagging on the trouble-free operation of the power supply system.

Keywords: autonomous power supply, reliability, power supply system, electrical network.

References

- [1] V.A. Ageev, «Sravnitel'nyy analiz metodov rascheta rezhimov elektricheskikh setey», *Sel'skiy mekhanizator*, vol. 1, pp. 30-33, 2018 (in Russian).
- [2] V.E. Vorotnitsky, «Snizheniye poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh. Dinamika, struktura, metody analiza i meropriyatiya», *Energoberezheniye*, vol. 2, pp. 90-94, 2005 and vol. 3, pp. 92-97 (in Russian).
- [3] S.I. Malafeev, *Nadezhnost' elektrosnabzheniya: uch.posob.* St. Petersburg: Lan, 2017, P. 368 (in Russian).
- [4] V.K. Slyshalov, *Raschet pokazateley nadezhnosti raspredelitel'nykh elektricheskikh setey pri nalichii avtomaticheskogo vklucheniya rezerva.* Omsk: Izd-vo GOUVPO, 2011, P. 4 (in Russian).
- [5] A.Yu. Efimov, «*Matematicheskoye modelirovaniye sel'skikh elektricheskikh setey s tsel'yu povysheniya ikh bezotkaznoy raboty*», Cand. of Tech. S. thesis, Mordovia State University n.a. N.P. Ogareva, Saransk, Russia, 2000, P. 20 (in Russian).
- [6] A.Yu. Efimov, «*Otsenka nadezhnosti sistem teplosnabzheniya: stat'ya v sbornike statey kandidata tekhnicheskikh nauk*» Mordovia State University n.a. N.P. Ogareva, Saransk, Russia, pp. 101-103, 2001 (in Russian).