

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Е.И. Грачева, Р.Р. Садыков

Казанский государственный энергетический университет
grachieva.i@bk.ru, ru059@mail.ru

Резюме: В статье излагается алгоритм моделирования вероятностей состояния систем электроснабжения. Разработана модель оценки вероятностных характеристик элементов систем электроснабжения с восстановлением и профилактикой.

Ключевые слова: надежность, система электроснабжения, вероятности состояний, моделирование, стационарный режим.

THE STUDY OF PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF POWER SUPPLY SYSTEMS

E.I. Gracheva, R.R. Sadykov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
grachieva.i@bk.ru, ru059@mail.ru

Abstract: The article describes the algorithm of modeling of probabilities of condition of power supply. The developed model estimates the probabilistic characteristics of the elements of power supply systems rehabilitation and prevention.

Key words: reliability, power supply system, the state probabilities, simulation, steady state mode.

Важным аспектом исследования такого свойства систем электроснабжения, как надежность, является установление количественных показателей, которыми можно измерить степень проявления этого свойства в зависимости от условий и особенностей, характерных для конкретной решаемой задачи. Умение количественно измерить надежность является одной из основных предпосылок создания системы эффективного управления надежностью электрообъекта и СЭС [1, 2].

Следует отметить, что общепромышленные стандарты не отражают специфические особенности производства и передачи электрической энергии. К наиболее существенным особенностям определения надежности СЭС можно отнести две.

Первая. Для СЭС характерна малая вероятность полного отказа работоспособности. Отказы отдельных элементов приводят в подавляющем большинстве случаев лишь к частичным отказам работоспособности СЭС.

Вторая. Для СЭС характерна работа в режимах, определяемых потребителями энергии и существенно зависящих от сезона, дня недели и времени суток.

Учет указанных особенностей СЭС привел к тому, что наряду с понятием «отказ работоспособности» для характеристики надежности объекта используется понятие «отказ функционирования», которое характеризует переход СЭС от одного уровня функционирования к другому, более низкому.

При решении задач обеспечения надежности СЭС важная роль принадлежит математическим методам, которые позволяют получить количественные оценки надежности СЭС, что является необходимой предпосылкой для ее оптимизации [3, 4].

В наиболее общем виде методы расчета должны обеспечивать возможность определения надежности СЭС, отвечающих следующим характеристикам:

- произвольная конфигурация технологической схемы и большое количество входящих в нее элементов;
- наличие в технологической схеме элементов, зависимых один от другого с точки зрения надежности их функционирования;
- наличие в технологической схеме элементов дискретного действия – выключателей, автоматов, клапанов, задвижек и т.д., и необходимость учета возможности возникновения зависимых отказов, обусловленных отказами в срабатывании, ложным и излишним срабатыванием элементов дискретного действия при отказе других элементов;
- зависимость надежности СЭС от режима ее работы [5, 6, 7].

Совершенствование проектных и эксплуатационных решений по созданию, управлению и дальнейшему развитию СЭС предполагает определение рационального уровня надежности электроснабжения потребителей на основе количественных критериев [8, 9, 10].

Исследуем модели надежности электрооборудования СЭС с восстановлением и профилактикой. Установка из одного элемента с профилактикой и восстановлением в любой момент времени может находиться в одном из трех состояний: E_1 – работоспособное состояние; E_0 – аварийный простой и восстановление; E_2 – плановый простой для профилактического обслуживания или ремонта. Граф переходов из состояния в состояние для такой установки показан на рис. 1, где λ и $\lambda_{пл}$ – интенсивность аварийных и плановых отключений, переводящих установку в состояние E_0 или E_2 ; μ и $\mu_{пл}$ – интенсивность восстановления и окончания планового обслуживания, переводящих установку в состояние E_1 .

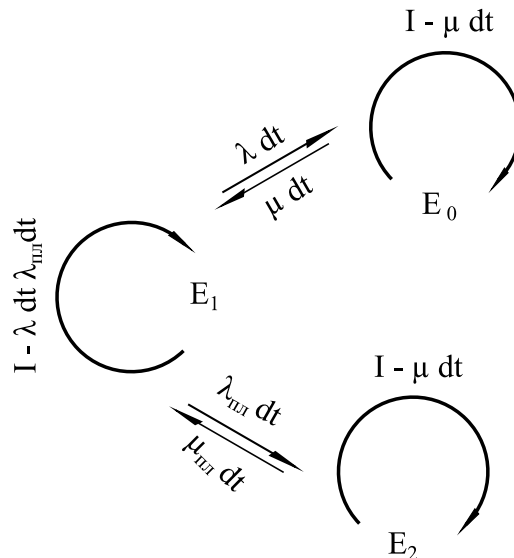


Рис. 1. Моделирование элементов с восстановлением и профилактикой

Система уравнений для вероятностей состояний СЭС, отвечающая этому графу, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} P_1'(t) &= -(\lambda + \lambda_{\text{пл}})P_1(t) + \mu P_0(t) + \mu_{\text{пл}}P_2(t); \\ P_0'(t) &= \lambda P_1(t) + \mu P_0(t); \\ P_2'(t) &= \lambda_{\text{пл}}P_1(t) + \mu_{\text{пл}}P_2(t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Полагая, что в момент $t = 0$ элемент работоспособен, т.е. $P_1(t) = 1$; $P_0(t) = 0$; $P_2(t) = 0$; $P_1(t) + P_2(t) + P_0(t) = 1$, и применяя преобразование Лапласа, получим

$$\left. \begin{aligned} P_1(t) &= \frac{\mu\mu_{\text{пл}}}{\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}}} + \frac{(\mu + k_1)(\mu_{\text{пл}} + k_1)}{k_1(k_1 + k_2)} \exp k_1 t + \\ &+ \frac{(\mu + k_2)(\mu_{\text{пл}} + k_2)}{k_2(k_1 + k_2)} \exp k_2 t; \\ P_0(t) &= \frac{\lambda\mu_{\text{пл}}}{\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}}} + \frac{\lambda(\mu_{\text{пл}} + k_1)}{k_1(k_1 + k_2)} \exp k_1 t + \\ &+ \frac{\lambda(\mu_{\text{пл}} + k_2)}{k_2(k_1 + k_2)} \exp k_2 t; \\ P_2(t) &= \frac{\mu\lambda_{\text{пл}}}{\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}}} + \frac{\lambda_{\text{пл}}(\mu + k_1)}{k_1(k_1 + k_2)} \exp k_1 t + \\ &+ \frac{\lambda_{\text{пл}}(\mu + k_2)}{k_2(k_1 + k_2)} \exp k_2 t, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

$$k_{1,2} = 0,5 \left[-(\lambda + \lambda_{\text{пл}} + \mu + \mu_{\text{пл}}) \pm \sqrt{(\lambda + \lambda_{\text{пл}} + \mu + \mu_{\text{пл}})^2 + 4(\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}})} \right]. \quad (3)$$

С течением времени начальные условия перестают влиять на распределение вероятностей состояний. Устанавливается равновесный или стационарный режим. Чем больше промежутки времени между отказами, по сравнению с временем восстановления, тем скорее установка войдет в стационарный режим. Для элементов СЭС стационарный режим наступает уже при значениях t от одного месяца до года. Для стационарного режима справедливы соотношения

$$\left. \begin{aligned} P_1(t) &= \frac{\mu\mu_{\text{пл}}}{\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}}} = \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{\text{пл}}\mu_{\text{пл}}\right)^{-1} = K_{\Gamma}; \\ P_0(t) &= \frac{\lambda\mu_{\text{пл}}}{\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}}} = \lambda\mu \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{\text{пл}}\mu_{\text{пл}}\right)^{-1} = q_{\text{ав}}; \\ P_2(t) &= \frac{\mu\lambda_{\text{пл}}}{\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}}} = \lambda_{\text{пл}}\mu_{\text{пл}} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{\text{пл}}\mu_{\text{пл}}\right)^{-1} = q_{\text{пл}}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где K_{Γ} – коэффициент готовности; $q_{\text{ав}}$ – вероятность аварийного простоя; $q_{\text{пл}}$ – вероятность планового простоя.

Приближенно можно принимать $q_{\text{ав}} = \lambda\tau$; $q_{\text{пл}} = \lambda_{\text{пл}}\tau_{\text{пл}}$, где τ – время аварийного простоя; $\tau_{\text{пл}}$ – время планового простоя.

Вероятность работоспособного состояния P_1 не есть вероятность безотказной работы $P(t)$. Вероятность $P(t)$ определяется при введении в модель запрета на переход из состояния E_0 в любое другое, т.е. при $\mu = \mu_{\text{пл}} = \lambda_{\text{пл}} = 0$. Тогда система уравнений для вероятностей

$$\left. \begin{aligned} P_1'(t) &= \mu P_0(t); \\ P_0'(t) &= \lambda P_1(t); \\ P_2'(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Решая систему при тех же начальных условиях, получим $P_1(t) = P(t) = \exp(-\lambda t)$.

Для определения вероятности того, что элемент будет восстановлен за время t , рассматриваем состояния E_0 и E_1 как поглощающие, т.е. считаем, что $\lambda = \mu_{\text{пл}} = \lambda_{\text{пл}} = 0$. В этом случае система уравнений запишется в виде

$$\left. \begin{aligned} P_1'(t) &= \mu P_0(t); \\ P_0'(t) &= -\mu P_1(t); \\ P_2'(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решая при начальных условиях $P_0(0) = 1$; $P_1(0) = 0$; $P_2(0) = 0$, находим $P_1(t) = 1 - \exp(-\mu t) = V(t)$, где $V(t)$ – вероятность того, что система будет отремонтирована в течение времени t после отказа.

Определим вероятности состояний СЭС при помощи моделирования в программной среде *MatLab*.

Модель *diff_urav_sost.mld*, выполненная в программном комплексе *Matlab-Simulink*, позволяет рассчитать систему дифференциальных уравнений (1) с учетом (3) для определения вероятностей состояния СЭС.

Модель позволяет задавать значения λ , $\lambda_{пл}$, μ , $\mu_{пл}$, k_1 и k_2 с последующим выводом графиков изменения P_0 , P_1 , P_2 .

Зададим следующие исходные данные:

$$\lambda = 0,005; \lambda_{пл} = 0,001; \mu = 0,5 \cdot 10^{-3}; \mu_{пл} = 0,5 \cdot 10^{-3}.$$

Расчет произведен методом Рунге-Кутты, с помощью решателя *ode 23tb*. Параметры решателя заданы через меню модели *Configuration Parameters*.

В результате расчетов при данных параметрах значение $P_1 = 0,77$; $P_2 = 0,07$; $P_0 = 0,14$.

Таким образом, предлагаемая модель (рис. 2) позволяет рассчитать вероятности состояний системы непосредственно для любого исследуемого временного интервала.

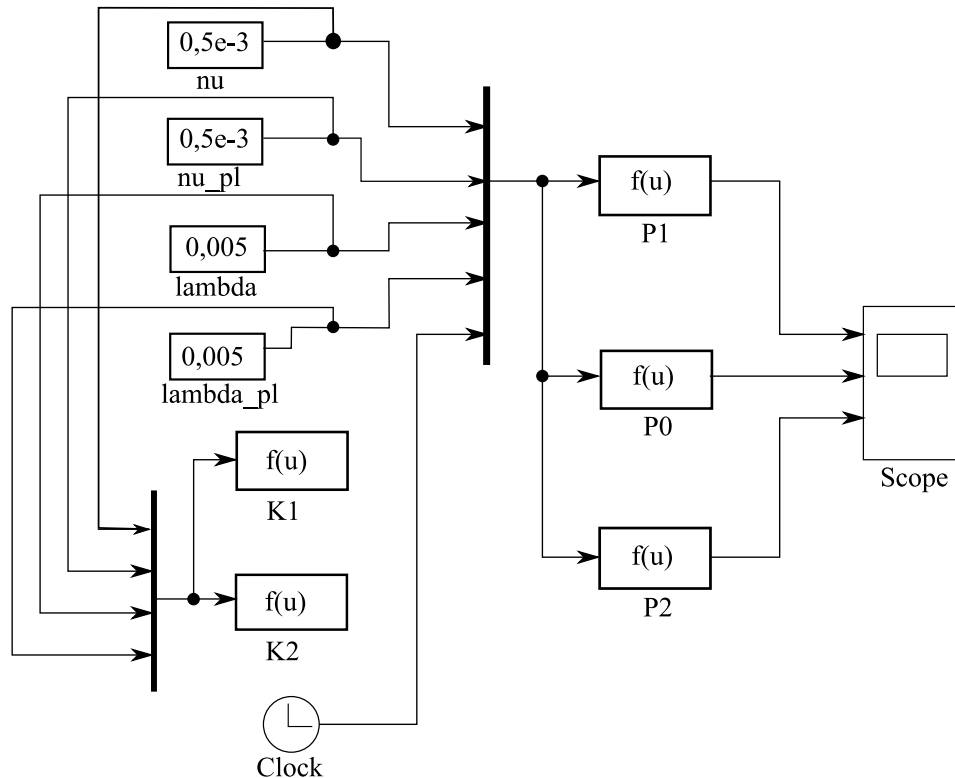


Рис. 2. Модель расчета вероятностей состояния системы электроснабжения

Выводы

1. Целенаправленный отбор и количественная оценка вкладов в ненадежность СЭС отказов элементов системы, ее состояний и режимов, а также эффективности различных противоаварийных мероприятий позволяют выявить слабые звенья СЭС и наметить конкретные пути по ее совершенствованию в процессе человеко-машинного синтеза СЭС. При проектировании на этой основе осуществляется поиск новых схемных решений, изменение структуры схемы и состава ее оборудования для усиления слабых мест, исключения излишнего или, напротив, использования более надежного оборудования.

2. В процессе эксплуатации возможно решение нескольких задач: выбор рационального варианта проведения ремонтного режима из ряда возможных вариантов; определение степени зависимости различных ремонтных режимов по влиянию на надежность электроснабжения узлов нагрузки и допустимости их совместного проведения; выбор рациональной стратегии эксплуатации (например, размещение по территории системы ремонтных бригад и дежурного персонала) в текущем режиме СЭС; оценка

целесообразности сооружения новых участков или демонтажа старых участков; выбор более надежных вариантов схем развития СЭС.

Литература

1. Шпиганович А.Н. Оценка оборудования по уровню надежности на примере систем электроснабжения сталеплавильных производств / А.Н. Шпиганович, Е.П. Зацепин // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. №4. С. 3–9.
2. Шпиганович А.Н. Функционирование систем электроснабжения / А.Н. Шпиганович, Е.П. Зацепин, В.И. Зацепина. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2015. 212 с.
3. Шпиганович А.Н. Безотказность систем монография / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович. Елец: ЕГУ, 2016. 344 с.
4. Sadykov, R. R. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters / R. R. Sadykov, E. I. Gracheva, O. V. Naumov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 24.
5. Дубицкий М. А. Надежность основного оборудования электроэнергетических систем / М. А. Дубицкий // Современные технологии и научно-технический прогресс: межвузовская научно-техническая конференция «Современные технологии и научно-технический прогресс». 2012. Т. 1, № 1. С. 12.
6. Сазыкин, В. Г. Повышение надежности элементов электрической сети / В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков, Г.А. Султанов, Е.А. Кочубей // Наука XXI века: сборник научных статей по итогам Международной научно-практической конференции. 2016. С. 80–82.
7. Мамонтов А.Н. Тепловизионный контроль трансформаторов тока и трансформаторов напряжения / А.Н. Мамонтов, А.В. Рычков, С.С. Астанин // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. №4. С. 9–18.
8. Шпиганович А.А. Анализ влияния вероятностных параметров электрооборудования на эффективность функционирования систем электроснабжения / А.А. Шпиганович // Вести вузов Черноземья. 2013. № 2. С. 25–32.
9. Шпиганович А.Н. Оценка эффективности безотказности систем / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович // Вести вузов Черноземья. 2013. № 1. С. 25–33.
10. Яшков В.А. Надежность систем промышленного электроснабжения, функционирующих в условиях влияния метеофакторов / В.А. Яшков, А.А. Конарбаева, Г.К. Кабдешова // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2, № 4. С. 68–71.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: grachieva.i@bk.ru,

Садыков Руслан Рустемович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ru059@mail.ru

References

1. Spiranovic, A. N. Assessment of equipment in terms of reliability on the example of power supply systems of steel-smelting plants [Text] / A. N. Spiranovic, Zatsepin E. P. // News of higher educational institutions of the region. – 2016. - No. 4. – P. 3-9.
2. Spiranovic, A. N. The operation of power systems [Text] / A. N. Spiranovic, E. P. Zatsepin, V. I. Zatsepin. – Lipetsk: publishing house of LGTU, 2015. – 212 p.
3. Spiranovic, A. N. Reliability of systems [Text]: monograph / A. N. Spiranovic, A. A. Spiranovic. – Yelets: EGU. – 2016. – 344 p.

4. Sadykov, R. R. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters / R. R. Sadykov, E. I. Gracheva, O. V. Naumov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 24.

5. Dubicki, M. A. Reliability of the main equipment of electric power systems / M. A. dubicki // Modern technologies and scientific-technical progress: interuniversity scientific and technical conference "Modern technologies and scientific-technical progress". – 2012. – Vol. 1. – No. 1. – S. 12.

6. Sazykin, V. G. Enhancement of reliability of elements of electric networks / V. G. Sazykin, A. G. Kudryakov, G. A. Sultanov, E. A., Kochubey // science of the XXI century: collection of scientific articles on the results of International scientific-practical conference. – 2016. – Pp. 80-82.

7. Mamontov A. N. Thermal control of current transformers and voltage transformers [Text] / A. N. Mamontov, A. V. Rychkov, S. S. Astanin // News of higher educational institutions of the region. – 2016. - No. 4. – P. 9-18.

8. Spiranovic, A. probabilistic Analysis of the influence of electrical parameters on the efficiency of power supply systems / A. A. Spiranovic // News of universities of the region. – 2013. – No. 2. – S. 25-32.

9. Spiranovic, A. N. Efficiency assessment of reliability of systems / A. N. Spiranovic, A. A. Spiranovic // News of universities of the region. – 2013. – No. 1. – P. 25-33.

10. Yashkov, V. A. Reliability of industrial power supply that operates under the influence of weather factors / V. A. Yashkov, A. A. Konarbaeva, G. K. Kardasova // Electrical engineering: network electronic scientific journal. – 2015. – T. 2. – No. 4. – P. 68-71.

Authors of the publication

Gracheva Elena Ivanovna - doctor of engineering sciences, Professor of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU). E-mail: grachieva.i@bk.ru,

Sadykov Ruslan Rustemovich – postgraduate student, Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU). E-mail: ru059@mail.ru

Поступила в редакцию

20 февраля 2016 г.