

УДК 629.03:004

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

Степенко А.Н., Решетников Д.В., Андреев Е.А., Левчук А.А.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,
Санкт-Петербург, e-mail: Evgeny.979@mail.ru

В статье рассмотрена система эксплуатации системы электроснабжения опасного производственного объекта. При анализе функционирования системы электроснабжения было выявлено, что коэффициент готовности системы электроснабжения объекта не соответствует предъявленным к нему требованиям. Время, затрачиваемое на восстановление работоспособности системы электроснабжения объекта, зачастую превышает требуемое значение. Функционирование СЭС осуществляется при условии выполнения организационных и технических мероприятий, необходимых для обеспечения безопасности восстановления системы электроснабжения объекта, что в свою очередь снижает риск поражения электрическим током обслуживающего персонала. Построена структура имитационной модели функционирования с учетом поддержания коэффициента готовности в установленных значениях и реализации мероприятий по выполнению программы обеспечения безопасности. На примере устройства защитного отключения, как элемента системы электроснабжения, построен алгоритм модели функционирования элемента системы электроснабжения. Данная модель позволяет определить, в каком из технических состояний – работоспособном или неработоспособном – находится система электроснабжения в любой момент времени. В соответствии с этим даёт возможность рассчитать суммарную продолжительность восстановления системы электроснабжения за период эксплуатации. Получен закон распределения, который позволит определить значение вероятности достижения требуемой готовности системы электроснабжения с учетом обеспечения безопасности ее эксплуатации.

Ключевые слова: система электроснабжения, коэффициент готовности, модель функционирования, риск поражения электрическим током, работоспособное состояние

MODEL OF THE SYSTEM OF OPERATION OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF A HIGH-RISK OBJECT

Stepenko A.N., Reshetnikov D.V., Andreev E.A., Levchuk A.A.
Military Space Academy named after A.F. Mozhaiskiy, St. Petersburg, e-mail: Evgeny.979@mail.ru

The article discusses the system of operation of the power supply system of a hazardous production facility. When analyzing the power supply system, it was revealed that the availability factor of the facility's power supply system does not meet the requirements for it. The time spent on restoring the facility's power supply system to work often exceeds the required value. It indicated that it is necessary to perform organizational and technical measures necessary to ensure the safety of restoration of the facility's power supply system, which in turn reduces the risk of electric shock to the maintenance personnel. The structure of the simulation model of functioning is constructed taking into account the maintenance of the readiness coefficient in established values and the implementation of measures to implement the safety program. Using the example of a residual current device as an element of a power supply system, an algorithm for a model of the functioning of an element of a power supply system is built. The model allows you to determine in which of the technical states – operable or inoperative, the power supply system is at any time. In accordance with this, it makes it possible to calculate the total duration of the restoration of the power supply system for the period of operation. A distribution law has been obtained that will determine the value of the probability of achieving the required readiness of power supply systems, taking into account the safety of its operation.

Keywords: power supply systems, availability factor, functioning model, risk of electric shock, operating condition

При обеспечении поддержания объекта повышенной опасности (ОПО) в исправном и готовом к применению по назначению состоянии участвуют все системы (подсистемы), участвующие в достижении цели его функционирования. Важное место занимает система электроснабжения (СЭС), от надежной работы которой зависит надежность функционирования ОПО в целом. Под СЭС будем понимать совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией [1].

Анализ процесса функционирования СЭС позволяет сделать вывод, что коэффициент готовности (K_g) СЭС не соответствует предъявленному к нему требованию. Это обусловлено продолжительностью работ, связанных с восстановлением работоспособного состояния элементов СЭС. Вре-

мя, затрачиваемое на восстановления СЭС объекта, связано с рядом организационных и технических мероприятий, необходимых для обеспечения безопасности восстановления СЭС объекта, что в свою очередь снижает риск поражения электрическим током обслуживающего персонала.

В связи с этим возникает противоречие, связанное с поддержанием коэффициента готовности (K_g) объекта, ввиду отказа элемента СЭС, и выполнением мероприятий по восстановлению работоспособности СЭС с наименьшими рисками поражения обслуживающего персонала электрическим током. Для разрешения существующего вопроса возникает необходимость в построении модели функционирования системы эксплуатации (СЭ) СЭС объекта, позволяющей оценить зависимость коэффициента готовности

(К) СЭС от выполнения программы обеспечения безопасности (ПОБ) при восстановлении функционирования СЭС.

Эксплуатация СЭС характеризуется тем, что переход элементов СЭС из одного состояния в другое в общем случае возможен в любой момент времени. Отказ элемента СЭС вследствие возникновения аварийного режима работы самой СЭС может повлиять на технические средства защиты, применяемые в СЭС [2].

В целях снижения риска поражения обслуживающего персонала электрическим током в СЭС используется такой аппарат защиты, как устройство защитного отключения (УЗО). Это устройство осуществляет автоматическое отключение СЭС при возникновении в ней токов утечки, чем обеспечивает защиту обслуживающего персонала от поражения смертельным значением электрического тока и от возникновения пожара с СЭС. Защита осуществляется ограничением времени протекания через тело человека опасных значений токов и протекания токов утечки в электрических проводниках.

Для оценивания влияния мероприятий ПОБ на коэффициент готовности СЭС была разработана имитационная модель функционирования ее СЭ, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Исходными данными для модели являются:

Str – структурная схема надежности СЭС ОПО;

$\lambda_i, i = 1, I$ – интенсивность отказов i -го элемента СЭС;

$t_{vi}, i = 1, I$ – продолжительность восстановления i -го элемента СЭС;

Θ – период эксплуатации СЭС;

$x = [x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_J]^T | x_i \in \{0, \lambda^{y_{30}}\}, x_j \in \{0, t_j\}$,

$j = 2, J$ – вектор, характеризующий мероприятия ПОБ, где $\lambda^{y_{30}}$ – интенсивность отказов УЗО. В перечень выполнения ПОБ при эксплуатации СЭС будем включать организационные и технические мероприятия, а также технические способы и средства защиты ОП от действия электрического тока.

К организационным мероприятиям отнесем:

- обучение ОП;
- проверку, согласно занимаемой должности, требуемых знаний;
- проведение инструктажей;
- назначение ответственных лиц;
- документальное оформление работы;
- планирование своевременного проведения плановых технических осмотров и профилактических ремонтов СЭС;
- наличие инструкций на рабочем месте.

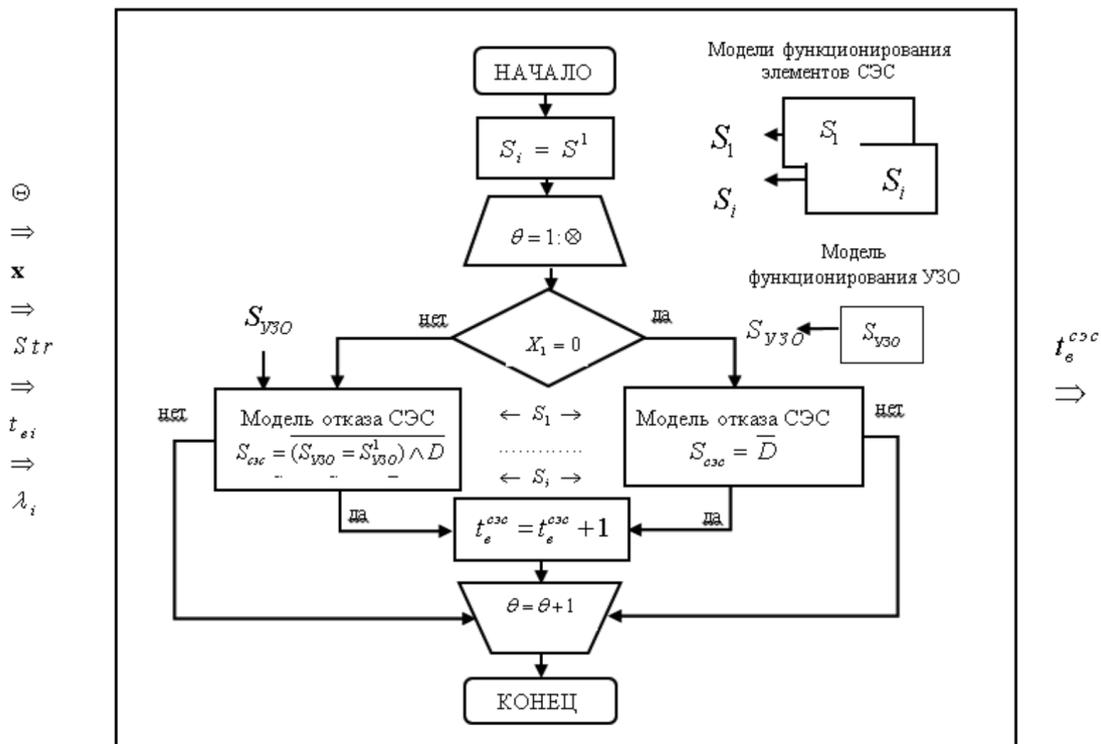


Рис. 1. Структура имитационной модели функционирования СЭ СЭС

К техническим мероприятиям отнесем:
– выполнение отключений;
– проверку отсутствия или наличия напряжения на токоведущих частях;
– применение защитного отключения;
– применение ОП средств индивидуальной защиты и электрозащитных средств.

Полный перечень мероприятий указан в [3].

Как указано в [4], в зависимости от специфики своей деятельности и исходя из оценки уровня профессионального риска ответственный за безопасность вправе устанавливать дополнительные требования безопасности, не противоречащие Правилам. Данный комплекс мероприятий направлен на обеспечение безопасности.

t_j – продолжительность j -го мероприятия ПОБ.

Структурными элементами модели функционирования СЭ СЭС являются агре-

гированные соответствующим образом модели функционирования элементов СЭС, модель функционирования УЗО, модель отказа СЭС.

Рассмотрим подробнее эти модели.

Модель функционирования i -го элемента СЭС является алгоритмической. Блок-схема ее алгоритма представлена на рис. 2.

На этом рисунке: $S_i = \{S_i^1, S_i^2\}$ | S_i^1 – работоспособное состояние,

S_i^2 – неработоспособное состояние – техническое состояние i -го элемента СЭС;

$a = \theta + t_{\text{мер}} + t_{\text{ви}}$ – признак восстановления работоспособности элемента СЭС, где

$t_{\text{мер}} = \sum_{j=2}^j x_j$ – продолжительность мероприятий ПОБ; \hat{Y} – случайно сгенерированное по равномерному закону число, лежащее в интервале $[0;1]$.

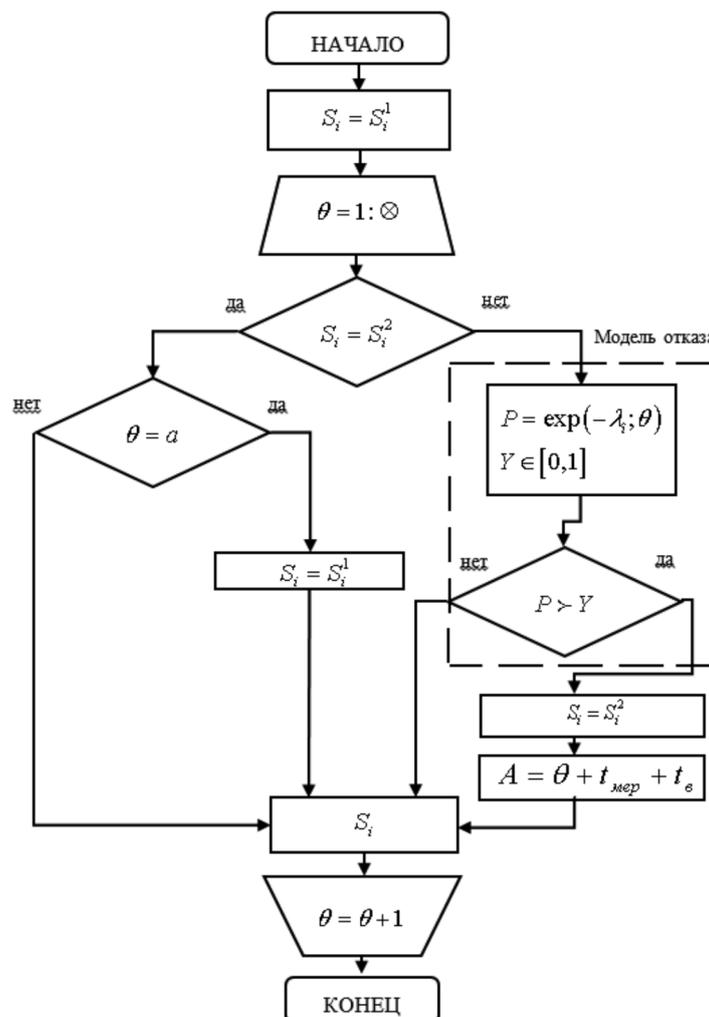


Рис. 2. Блок-схема алгоритма модели функционирования i -го элемента СЭС

Входными данными для модели функционирования элемента СЭС являются $\lambda_p, t_{вр}, t_{мер}$. Модель позволяет определить, в каком техническом состоянии S_i находится элемент СЭС в θ -ый момент модельного времени, $\theta = 1, \overline{\Theta}$ [5].

Составной частью модели функционирования элемента СЭС является модель его отказа. В модели отказа генерируется возможность наступления отказа элемента СЭС в любой момент его функционирования.

Модель функционирования УЗО аналогична модели функционирования элемента СЭС.

Данные о техническом состоянии элементов СЭС, УЗО (если его наличие предусмотрено ПОБ) в каждый момент модельного времени, полученные от рассмотренных выше моделей, а также данные о структуре СЭС являются исходными для модели ее отказа. Данная модель позволяет определить,

в каком из технических состояний – работоспособном или неработоспособном – находится СЭС в любой момент времени $\theta, \theta = 1, \overline{\Theta}$, и соответственно рассчитать суммарную продолжительность восстановления СЭС за период эксплуатации – $t_{в}^{СЭС}$.

Состояние СЭС считается работоспособным, если не выполняется следующее логическое условие:

$$S_{СЭС} = \overline{D}, \quad (1)$$

где D – признак работоспособности СЭС; « \rightarrow » – логический оператор отрицания; и неработоспособным, если условие (1) выполняется.

Исходными данными для определения признака работоспособности СЭС является ее структура. Для примера рассмотрим СЭС, состоящую из пяти элементов, структура которой представлена на рис. 3.

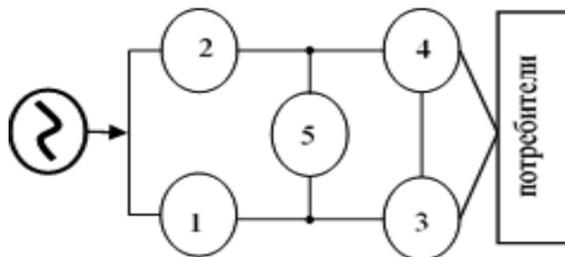


Рис. 3. Структурная схема простейшей СЭС
где Ⓢ – источник электрической энергии;
 Ⓛ – 1 – элементы СЭС.

Для такой СЭС признак работоспособности будет иметь следующий вид:

$$D = ((S_1 = S_1^1) \wedge (S_3 = S_3^1)) \vee ((S_2 = S_2^1) \wedge (S_4 = S_4^1)) \vee ((S_1 = S_1^1) \wedge (S_5 = S_5^1) \wedge (S_4 = S_4^1)) \vee ((S_2 = S_2^1) \wedge (S_5 = S_5^1) \wedge (S_3 = S_3^1)), \quad (2)$$

где S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 – техническое состояние 1–5 элементов СЭС соответственно в любой момент времени [4].

При этом, если ПОБ предусмотрено наличие УЗО, условие (1) будет представлено в следующем виде:

$$S_{СЭС} = \overline{(S_{УЗО} = S_{УЗО}^1)} \wedge D, \quad (3)$$

где $S_{УЗО}$ – техническое состояние УЗО в любой момент времени $\theta, \theta = 1, \overline{\Theta}$.

Это обстоятельство обусловлено тем, что отказ УЗО вызывает отказ всей СЭС.

На основе полученного в результате моделирования процесса функционирования СЭС значения суммарной продолжительности восстановления ее работоспособного состояния, вычисление коэффициента готовности СЭС производится с помощью выражения

$$K_r = \frac{\Theta - t_{в}^{СЭС}}{\Theta}. \quad (4)$$

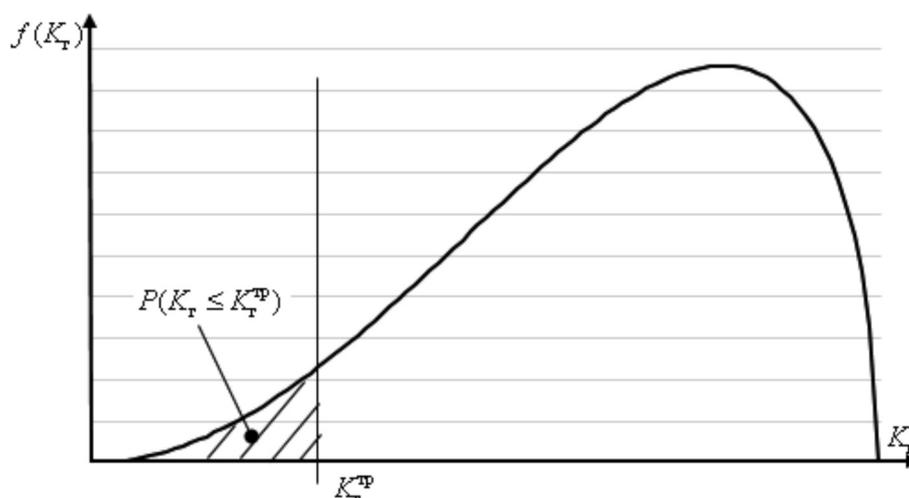


Рис. 4. Плотность вероятности коэффициента готовности СЭС

Обработка результатов многократной имитации процесса функционирования СЭС позволит получить закон распределения ее коэффициента готовности, представленный на рис. 4.

Полученный закон распределения позволит определить значение вероятности $P[K_T \leq K_T^{\text{оп}}]$, которая является показателем совокупного риска решений, направленных на достижение требуемой готовности СЭС с учетом обеспечения безопасности ее эксплуатации.

Данный показатель является критерием для дальнейшего обоснования оптимальной ПОБ.

Финальной стадией создания любой модели является проверка ее адекватности. Для оценивания адекватности разработанной имитационной модели был использован подход, описанный в [6]. Суть этого подхода заключается в оценивании меры близости результатов, полученных при моделировании процесса функционирования системы эксплуатации ОПО, и результатов, полученных из статистических данных о функционировании этой системы.

Заключение

В настоящее время особую актуальность приобретает задача поддержания высокой готовности СЭС ОПО с наименьшими рисками поражения обслуживающего персонала электрическим током. Для этого

необходим аппарат, позволяющий оценить влияние мероприятий ПОБ на готовность СЭС ОПО.

В качестве такого аппарата была предложена имитационная модель функционирования СЭС ОПО, отличающаяся от известных учетом обеспечения безопасности ее эксплуатации.

Использование предложенной модели позволит в дальнейшем обосновать оптимальные решения по разработке ПОБ эксплуатации СЭС ОПО.

Список литературы

1. Правило устройств электроустановок (утв. Приказом Минэнерго РФ от 08.07.2002 № 204). 6-ое и 7-ое изд. // Вестник Госэнергонадзора. 2002. № 3.
2. Вишняков Е.П., Авсеенко А.И., Шуневич Н.А. Модель функционирования систем электроснабжения сложных объектов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2–2. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=23009> (дата обращения: 17.11.2021).
3. ГОСТ 12.1.019-2017 Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.
4. Правила об охране труда при эксплуатации электроустановок (утв. Приказом Минтруда РФ от 15.12.2020 № 903Н) // Российская газета. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2020/12/31/mintrud-prikaz903-site-dok.html> (дата обращения: 17.11.2021).
5. Рябинин И.А. Логико-вероятностный метод и его практическое использование // Труды Международной научной школы МА БР – 2015. СПб., 2015. С. 19–26.
6. Микони С.В., Соколов Б.С., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. М.: РАН, 2018. 314 с.