

УДК 621.3.019.34

**УЧЕТ ОТКАЗОВ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ В СХЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ****Черненко Ю.В.***ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти, e-mail: ulav@tltsu.ru*

Проведен анализ состояния коммутационной аппаратуры с точки зрения надежности систем электро-снабжения. Установлено, что выключатель – один из наиболее сложных элементов коммутационной аппаратуры, поэтому необходимо учитывать отказы выключателей в схемах электроснабжения промышленных предприятий. Строится уточнение известной классификации состояний отказа за счет учета новых видов отказов элементов путем того, что дополнительно вводятся четыре новых класса. Приводятся характеристики классов и формулы для подсчета вкладов сечений дополнительных классов для расчета вероятности состояния отказов системы и среднего параметра потока отказа системы. Полученная методика позволяет оценить и проанализировать показатели структурной надежности схем электроснабжения промышленных предприятий с учетом влияния отказов коммутационной аппаратуры, провести сравнительный анализ различных вариантов схем и выбрать наиболее оптимальный вариант.

Ключевые слова: коммутационная аппаратура, выключатель, надежность схем электроснабжения, классы сечений

**THE ACCOUNT OF FAILURE OF THE SWITCHBOARD IN THE SCHEMES
ELECTRICAL SUPPLY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES****Chernenko Yu.V.***Togliatti State University, Togliatti, e-mail: ulav@tltsu.ru*

The article is devoted to the analysis of the state of switching equipment in terms of reliability of power supply systems. It is executed in the article that the circuit breaker is one of the most complex elements of switching equipment; therefore, it is necessary to take into account the failures of circuit breakers in power supply schemes of industrial enterprises. A refinement of the known classification of failure states is constructed by taking into account new types of element failures by additional introduction of four new classes. The characteristics of classes and formulas for calculating the contribution of sections of additional classes to the probability of a failure state of the system and the average parameter of the failure flow of the system are given. The received technique allows estimating and analyzing the indicators of structural reliability of electric power supply schemes of industrial enterprises taking into account the influence of switching equipment failures, to make a comparative analysis of various schemes and to choose the most optimal variant.

Keywords: switching equipment, circuit breaker, reliability of power supply schemes, section classes

В электроэнергетических системах доля отказов коммутационной аппаратуры (КА) большая и составляет свыше тридцати процентов [1]. К коммутационным аппаратам свыше тысячи вольт относят выключатели, разъединители, отделители, короткозамыкатели. Выключатель с точки зрения надежности самый сложный элемент коммутационной аппаратуры. При составлении модели отказа выключателя учитывают следующие параметры: надежность самого выключателя с различным типом привода, разъединителя; устройства релейной защиты и автоматики; условий ремонтно-эксплуатационного обслуживания и многие другие факторы [1–3]. В связи с этим при оценке показателей надежности различных схем необходимо учитывать отказы данного оборудования, приводящие к отказу электроснабжения.

Вопросам надежности посвящены исследования таких ученых, как Н.И. Воронин, Ю.Б. Гук, К.С. Демирчян, В.В. Зорин,

Н.А. Казак, А.А. Гришкевич, В.Г. Китушин, Э.А. Лосев, Л.А. Мелентьев, А.В. Мясников, И.В. Недин, В.П. Обоскалов, В.И. Попков, Б.В. Папков, М.Н. Розанов, Ю.Н. Руденко, И.А. Рябинин, Ф.И. Синьчугов, В.В. Тисленко, И.А. Ушаков, Ю.А. Фокин и многих других. Проведенный анализ научных трудов разных авторов показал, что данные в моделях отказов выключателей расходятся. Существует большое количество отказов электрооборудования, которые происходят в процессе его эксплуатации. Это могут быть отказы, возникающие по вине человека, вследствие природных явлений, из-за ошибки проектировщиков и т.д. Несмотря на это, пришли к выводу, что для удобства расчета не следует делить отказы больше чем на три вида: первый тип «короткое замыкание», второй – «обрыв цепи» и отказы срабатывания.

В российских энергосистемах продолжают эксплуатироваться выключатели, которые физически и морально устарели – это масляные и воздушные. К недо-

статкам масляных выключателей можно отнести пожаро- и взрывоопасность, содержание специального масляного хозяйства. Недостатки воздушного выключателя – это необходимость компрессорной установки, сложность конструкции ряда деталей и узлов. Постепенно устаревшие выключатели меняют на элегазовые и вакуумные. Однако эксплуатация масляных и воздушных выключателей может привести к снижению надежности системы электроснабжения, поэтому учет отказов коммутационной аппаратуры, а именно выключателей, при оценке показателей надежности схем электроснабжения промышленных предприятий является одной из актуальнейших задач.

Один из наиболее сложных видов отказов – это отказ срабатывания, сложность которого заключается в том, что это скрытый отказ и он обнаруживается только тогда, когда появляется необходимость в работе выключателя. В связи с этим возникает необходимость при расчетах показателей надежности учитывать данный вид отказа.

Рассмотрим основные предположения о работе электроэнергетической системы, в дальнейшем используемые при определении показателей надежности различных схем электроснабжения [4, 5].

Предположим, что каждый элемент I (к элементам относятся силовые трансформаторы, выключатели, разъединители и т.д.) электроэнергетической системы может быть в одном из состояний I_α , $\alpha \in \{C, V, N, R, S\}$, где I_N – нормальная работа элемента I электроэнергетической системы L , I_S – состояние между отказом рассматриваемого элемента I и окончанием оперативных переключений, I_R – аварийный ремонт элемента I , I_C – капитальный ремонт элемента (заранее спланированное отключение) I , I_V – текущий ремонт элемента (преднамеренное отключение) I . Переходы от

одного состояния к другому для одного из элементов электроэнергетической системы могут быть описаны марковской моделью, которая показана на рис. 1. Для элемента I в соответствии со схемой $\lambda_{NC}(I)$ – интенсивность отказа, $\lambda_{NC}(I)$ и $\lambda_{NV}(I)$ – интенсивность капитальных и текущих ремонтов, $T_{SR}(I) = 1/\mu_{SR}(I)$ – среднее время переключений, $T_{RN}(I) = 1/\mu_{RN}(I)$ – среднее время аварийного ремонта, $T_{CN}(I) = 1/\mu_{CN}(I)$ – среднее время капитального ремонта, $T_{VN}(I) = 1/\mu_{VN}(I)$ – среднее время текущего ремонта элемента I .

Для учета отказов коммутационной аппаратуры при расчете показателей надежности схем электроснабжения проанализируем модель отказа выключателя. Для этого рассмотрим

$$Z_{I_N} = \emptyset, Z_{I_R} = \{I\}, Z_{I_S} \subseteq L \quad (I \in Z_{I_S}) \quad (1)$$

– зоны влияния элементов в разных состояниях N, R, S . Обычное влияние отказа типа R элемента заключается в выводе из работы данного элемента. Допустим, что если элемент I находится в состоянии S , то это эквивалентно тому, что множества $Z_{I_S} \subseteq L$ элементов находятся в состоянии R . Обозначим $Z_X = \{I : I \in L, x \in Z_{I_S}, x \in L\}$.

Дополнительно введем в рассмотрение новое множество $Q \subseteq L$. Любой элемент $Q \subseteq L$ при переходе элемента I в состояние S с вероятностью q_b тоже переходит в состояние S (в состоянии R переходят элементы множества Z_{b_S}), и

$$Z_{I_S} \subseteq Z_{I_S b_S} = Z_{I_S} \cup Z_{b_S}. \quad (2)$$

Данное состояние элемента b обозначим b_Q (переход отказа элемента I типа «короткое замыкание» через зону влияния I_S элемента I), $Z_{I_S b_Q} = Z_{I_S b_S}$. Показанное состояние Q , т.е. отказ в срабатывании, также отнесем к состояниям отказа, допустив, что оно не совместимо с такими состояниями R и S .

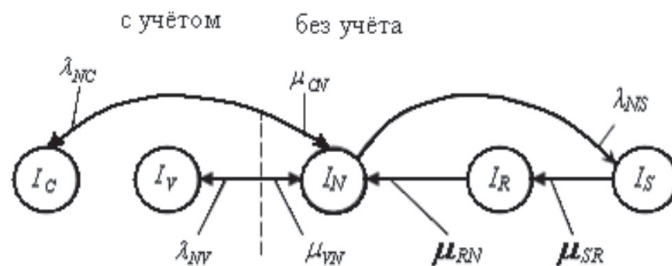


Рис. 1. Марковская модель для элемента I электроэнергетической системы с учетом и без учета планово-предупредительных ремонтов

Таким образом, каждый из элементов I электроэнергетической системы L может находиться в одном из следующих состояний I_α , $\alpha \in \{N, R, S, Q\}$. Состояние системы ω определяется состоянием каждого из элементов и описывается как множество

$$\omega = \omega(L) = \{I_\alpha^l : I^l \in L, \alpha_l \in \{N, R, S, Q\}, l = 1, 2, \dots, n\}. \quad (3)$$

Рассмотрение отказов типа Q позволяет дополнительно выделить следующие классы $[J]\Theta$, $i = 16, 17, 18, 19$, для которых

$$\begin{aligned} MC(J_{16}) &= \{I_S b_Q\}, \quad MC(J_{17}) = \{I_S c_Q b_Q\}, \\ MC(J_{18}) &= \{K_R I_S b_Q\}, \quad MC(J_{19}) = \{K_S I_S b_Q\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для выделенных классов предлагается использовать следующие формулы для вычисления вклада элементов представленных классов в результирующие показатели надежности электроэнергетической системы, т.е. оценивают вероятности состояний отказов системы P и средний параметр потока отказа электроэнергетической системы f , полученные на основе марковской модели выключателя.

$$\begin{aligned} P_{16} &= P(I_S b_Q) = q_B \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I), \\ f_{16} &= f(I_S b_Q) = q_B \lambda_{NS}(I), \\ P_{17} &= P(I_S c_Q b_Q) = q_B q_C \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I), \\ f_{17} &= f(I_S c_Q b_Q) = q_B q_C \lambda_{NS}(I), \\ P_{18} &= P(K_R I_S b_Q) + \{P(K_C I_S b_Q) + P(K_V I_S b_Q)\} = \\ &= q_B \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{RN}(K) + \\ &+ \{q_B \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NC}(K) T_{CN}^2(K) / (T_{CN}(K) + T_{SR}(I)) + \\ &+ q_B \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NV}(K) T_{VN}^2(K) / (T_{VN}(K) + T_{SR}(I))\}, \\ f_{18} &= f(K_R I_S b_Q) + \{f(K_C I_S b_Q) + f(K_V I_S b_Q)\} = \\ &= q_B \lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) (T_{SR}(I) + T_{RN}(K)) + \{q_B \lambda_{NS}(I) \lambda_{NC}(K) T_{CN}(K) + \\ &+ q_B \lambda_{NS}(I) \lambda_{NV}(K) T_{VN}(K)\}, \\ P_{19} &= P(K_S I_S b_Q) = q_B \lambda_{NS}(I) T_{SR}(I) \lambda_{NS}(K) T_{SR}(K), \\ f_{19} &= f(K_S I_S b_Q) = q_B \lambda_{NS}(I) \lambda_{NS}(K) (T_{SR}(I) + T_{SR}(K)). \end{aligned} \quad (5)$$

Исходные данные о показателях надежности элементов можно взять из справочников или получить значения на основе статистических методов.

Оценка показателей надежности состоит не только из получения формул, а также из формирования разных классов сечений. Далее рассмотрим алгоритм формирования классов сечений с учетом новых типов отказов.

Формирование классов сечений делается на основе множеств R , Q и Z_{I_S} , $I \in L$. Множествами M_i аппроксимируются классы $[J_i]\Theta$ ($M_i = [J_i]\Theta$), $i = 16, 17, 18, 19$. $Q_{i_\alpha}^k(M_i)$ – признак вспомогательного множества, где k – число элементов в сечении,

на основе которого происходит формирование данного множества, i – класс формируемого сечения, α – номер вспомогательного множества.

Работа алгоритма состоит из последовательного формирования следующих множеств Q_{16} , Q_{17} , Q_{18} , Q_{19} .

Формирование множеств Q_{16} показано на рис. 2, а–д. Способ формирования множеств Q_{16} обеспечивает $I_S b_Q \in \Omega_F$.

Формирование множеств Q_{17} показано на рис. 3, а–и. Способ формирования множеств Q_{17} обеспечивает $I_S c_Q b_Q \in \Omega_F$.

Формирование множеств Q_{18} показано на рис. 4, а–г. Способ формирования множеств Q_{18} обеспечивает $K_R I_S b_Q \in \Omega_F$.

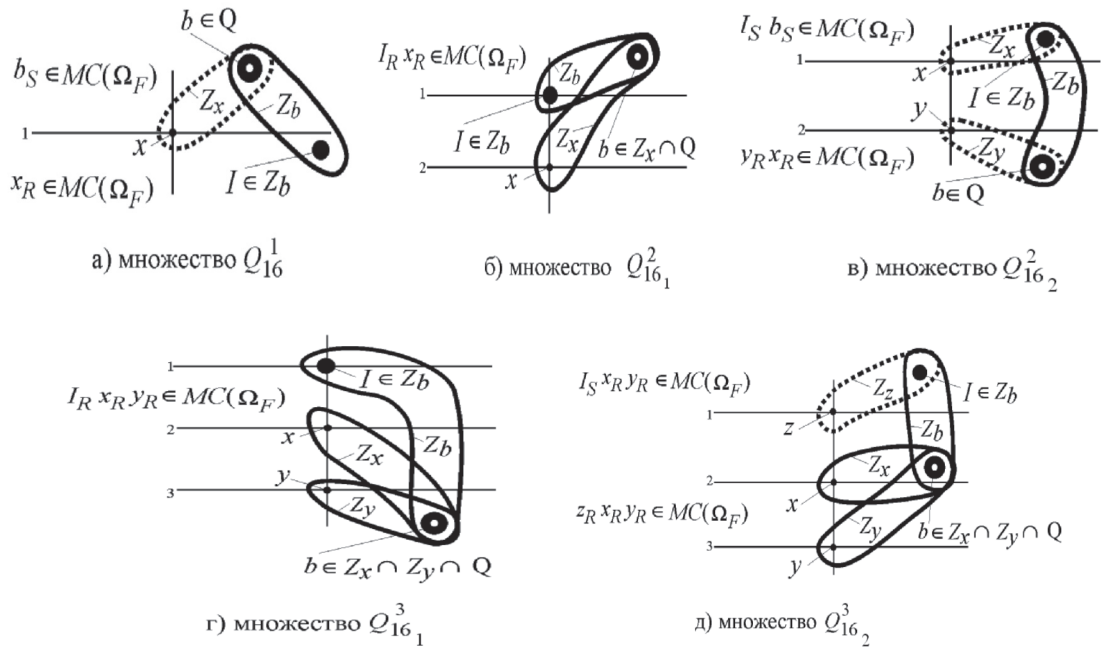


Рис. 2. Формирование множества $Q_{16} = \{(I, b): I, b \in \Omega_F\}$

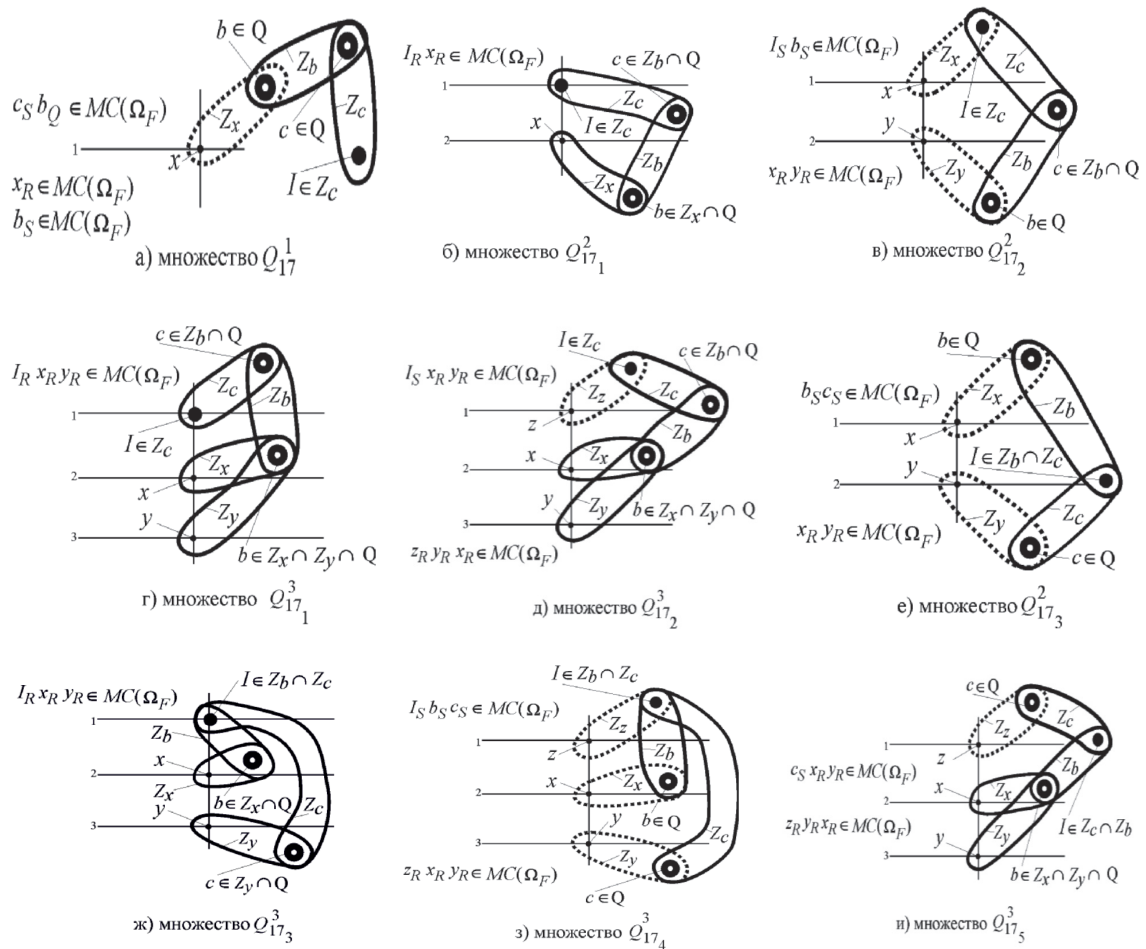


Рис. 3. Формирование множества $Q_{17} = \{(I, c, b): I, c, b \in \Omega_F\}$

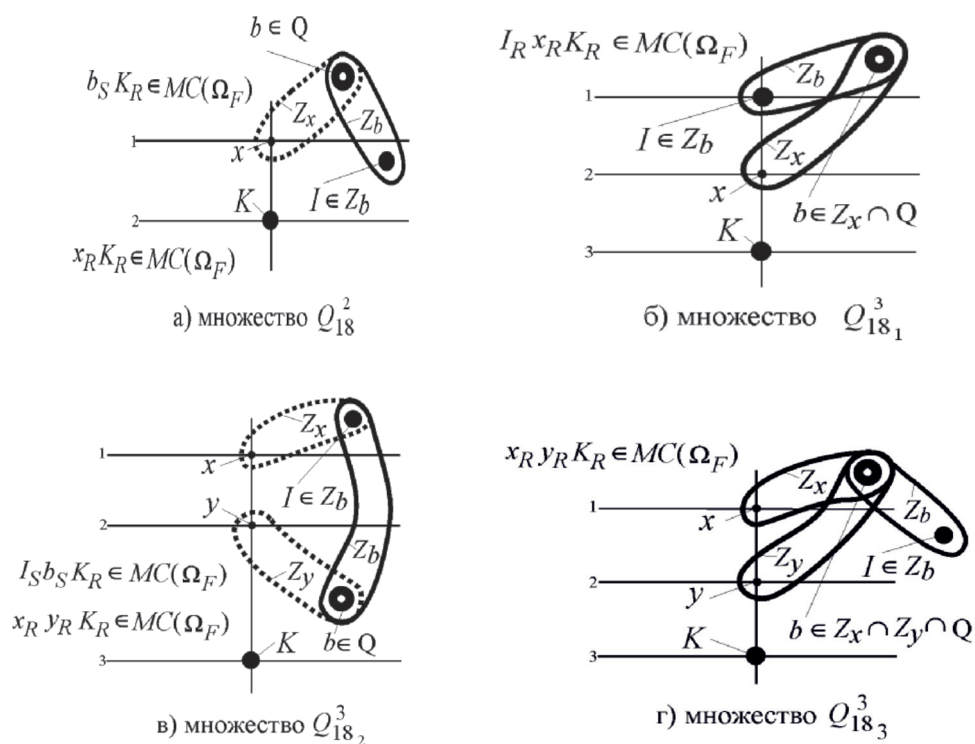


Рис. 4. Формирование множества $Q_{18} = \{(K, I, b) : K_R I_S b_Q \in \Omega_F\}$

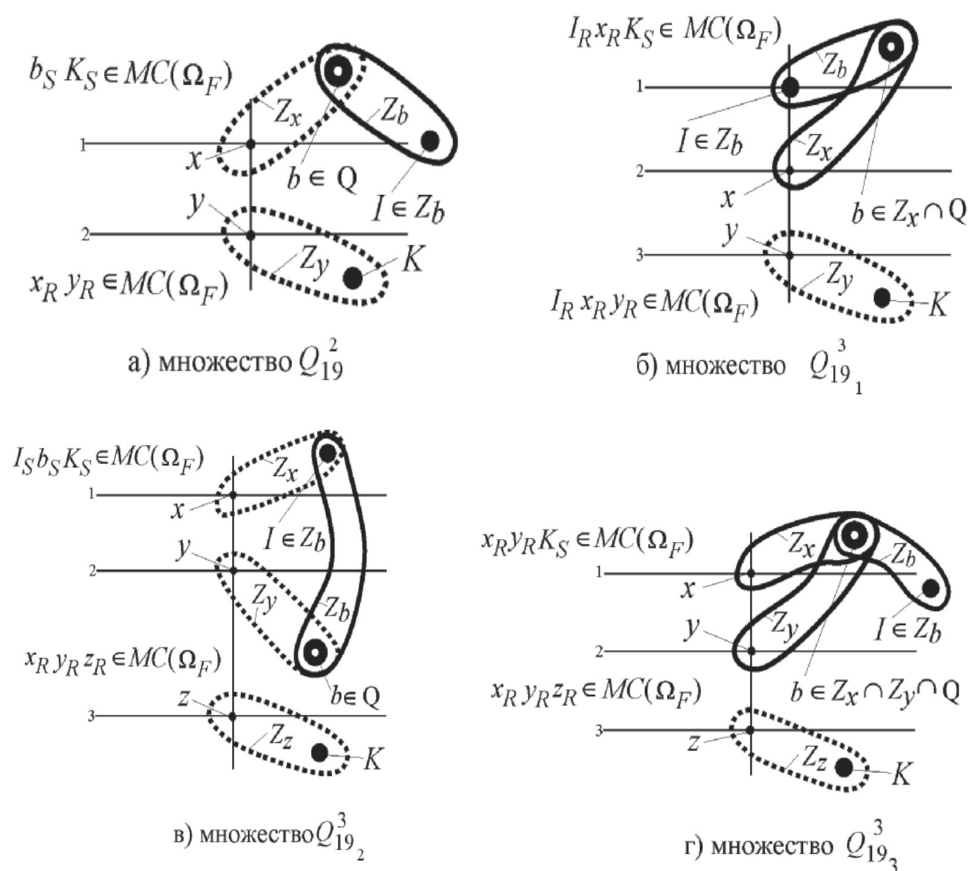


Рис. 5. Формирование множества $Q_{19} = \{(K, I, b) : K_S I_S b_Q \in \Omega_F\}$

Формирование множеств Q_{19} показано на рис. 5, а–г. Способ формирования множеств Q_{19} обеспечивает $K_S I_S b_Q \in \Omega_F$.

Таким образом, с помощью представленной методики можно оценить и проанализировать показатели структурной надежности схем электроснабжения промышленных предприятий с учетом влияния отказов коммутационной аппаратуры, провести сравнительный анализ различных вариантов схем и выбрать наиболее оптимальный вариант.

Список литературы

1. Абдурахманов А.М. Анализ моделей отказа выключателей в схемах коммутации электроустановок / А.М. Абдурахманов, М.Ш. Мисриханов, А.В. Шунтов // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 2–11.
2. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем / В.Г. Китушин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 256 с.
3. Степкина Ю.В. Сравнительный анализ надежности типовых схем подстанций, применяемых на промышленных предприятиях / Ю.В. Степкина, А.А. Гришкевич // Вестник СамГТУ. Серия Технические науки. – 2005. – № 37. – С. 206–211.
4. Степкина Ю.В. Надежность систем электроснабжения: учебное пособие / Ю.В. Степкина, А.А. Гришкевич. – Тольятти: ТГУ, 2007. – 85 с.
5. Степкина Ю.В. Анализ повреждаемости коммутационной аппаратуры в электроэнергетических системах // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: сборник трудов IV Международной научно-технической конференции: в 2 ч. – Тольятти: ТГУ, 2012. – Ч. 2. – С. 116–119.