

УДК 621.315

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ГЛАВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ СОЕДИНЕНИЙ ПОДСТАНЦИЙ

Драко*М.А., Старжинский А.Л.

Аннотация

Рассмотрены типовые упрощенные и сложные схемы подстанций напряжением 110 и 330 кВ. Проанализирован математический аппарат, используемый для расчета главных схем электрических соединений подстанций. Рассмотрена модель надежности главных схем электрических соединений на основе таблично-логического метода, которая является наиболее полной в настоящее время.

На основе расчетов показано количественное соотношение показателей надежности для групп упрощенных и сложных схем подстанций.

Ключевые слова: надёжность, коэффициент неготовности, непараметрическая оценка надежности, подстанция.

Введение

Интенсивное старение и износ оборудования подстанций (ПС) и электрических сетей, усложнение условий их работы стали определяющими факторами снижения надежности электроэнергетических систем (ЭЭС) в современных условиях.

Основными способами обеспечения надежности электрических сетей являются: резервирование элементов, резервирование структуры и пропускной способности сети, включая схемы ПС, а также устройств релейной защиты и автоматики (РЗ и А), таких как автоматическое повторное включение (АПВ) и др.

В настоящее время появилось новое оборудование, существенно влияющие на обеспечение надежности ЭЭС. К нему можно отнести новое поколение коммутационной аппаратуры (вакуумные и элегазовые выключатели) с большим рабочим ресурсом и повышенной надежностью, что позволяет упростить схемы распределительных устройств ПС.

При эксплуатации надежность обеспечивается путем текущих и капитальных ремонтов, а также за счет применения высоконадежных выключателей и распределительных устройств (РУ) [1].

Выбор главной электрической схемы ПС является важным этапом при проектировании, от которого зависят свойства, особенности и технические характеристики ПС [2].

Оценка надежности схем электрических соединений ПС необходима при выборе схемы подключения к энергосистеме различных потре-

* РУП “Белэнергосетьпроект”, Минск, Республика Беларусь, m.drako@besp.by

лей, электростанций, линий электропередачи, выборе числа и мощности трансформаторов, выборе формы обслуживания ПС.

1. Исходные положения

К показателям надежности ПС за рассматриваемый промежуток времени относятся: среднее число погашений сборных шин различных номинальных напряжений, отдельных секций и присоединений, разрыва транзита, средняя длительность восстановления электроснабжения и транзита. Отказы ПС в функционировании наступают вследствие отказов трансформаторов, коммутационной аппаратуры (КА), ошибочных действий персонала, отказов устройств регулирования напряжения и реактивной мощности, а также устройств РЗ и А [3].

При исследованиях надежности ПС может рассматриваться как элемент электропередачи в качестве конечного или переключательного устройства либо как элемент системы электроснабжения. При этом сопоставление вариантов главных схем электрических соединений ПС не может производиться без учета надежности подключенных к ним линий. Следует также учитывать, что восстановление функционирования зависит от возможности быстрых оперативных переключений.

Под расчетом надежности понимается метод получения численных значений показателей надежности объекта по известным характеристикам надежности его элементов (оборудования), по известному их структурному и функциональному взаимодействию [4].

Информация об усредненных значениях параметра потока отказов для единицы одного и того же оборудования и среднем времени его восстановления в течении определенного периода может существенно различаться, что объясняется изменением условий эксплуатации, режимами работы технологических систем, принятой системой обслуживания и ремонта электроустановок и другими факторами [5, 6].

Для расчета надежности схем типовых ПС применяют различные методы. К основным методам относятся: аналитический, таблично-аналитический, таблично-логический, метод использующий теорию марковских процессов, метод дерева отказов, модифицированный метод путей и сечений и др. [6, 7].

Применение тех или иных методов определяется: уровнем допущений, полнотой учитываемых факторов, структурой и содержанием требуемой исходной информации. При этом различные методы применяемые для оценки надежности одной и той же схемы ПС могут приводить к существенно различающимся результатам.

2. Методика выполнения расчётов

Рассмотрим модель надежности главных схем электрических соединений на основе таблично-логического метода, которая является наиболее полной в настоящее время. Анализ надежности схем электрических соединений с использованием таблично-логического метода применяется тогда, когда разнообразие отказов рассматриваемой си-

стемы велико. Метод позволяет выявить все виды возможных аварий, возникающих при наложении (совпадении) событий отказов элементов главной схемы электрических соединений ПС на ремонтные и эксплуатационные режимы, которые отличаются составом и повреждаемостью оборудования. Кроме того, выявляются все виды возможных аварий при развитии аварий из-за отказов срабатывания устройств РЗ и А и КА. Для всех выявляемых видов аварий вычисляются частоты их возникновения и определяются средние длительности их ликвидации. Вывод расчетных выражений для частоты и длительности аварий основан на последовательном применении формулы полной вероятности при рассмотрении множества возможных наложений событий.

При использовании таблично-логического метода последствия отказов элементов установки в различных режимах записываются с помощью кодов как аварии с определенной степенью нарушения работоспособности установки: трансформаторов, линий, погашения секций и различные сочетания нарушений. Последствия отказов устройств РЗ и А и КА при отказах элементов распределительных устройств в различных режимах записываются как аварии особого вида (“оперативные переключения” или “восстановительный ремонт”) [8].

На основе таблично-логического метода расчета был разработан пакет прикладных программ “TOPAS”, который позволяет проводить анализ надежности главных схем электрических соединений, включающих в себя РУ любого класса напряжения, трансформаторы, высоковольтные линии электропередачи [9]. Достоинством данной программы перед другими разработками является использование дополнительно к параметрическим оценкам надежности также и непараметрических оценок надежности, позволяющих сравнивать варианты высоконадежных главных схем в условиях неопределенности результатов параметрической оценки.

Вычисление логических показателей надежности главной схемы осуществляется на основе определения количества комбинаций событий (конъюнкций) $C(k)$, приводящих к отказу ее функционирования (аварии) k -го вида при отказе i -го элемента в j -м режиме при s -м действии устройства релейной защиты

$$C(k) = \sum_i \sum_j \sum_s L(i, j, s, k), \quad (1)$$

где $L(i, j, s, k)$ – логическая функция, принимающая значение 0 или 1.

В условиях неразличимости результатов расчета для разных вариантов схем для оценки надежности можно использовать непараметрические оценки надежности в виде числа конъюнкций [8]. Использование этих непараметрических по содержанию (они не являются ни частотами, ни вероятностями, ни наработками) оценок позволяет сравнивать варианты главных схем различной конфигурации в условиях неопределенности результатов параметрической оценки. Для нормальных условий число конъюнкций первого порядка равно $C_1(k)$, для ремонтов – число

конъюнкций второго порядка $C_2(k)$. При отказах в отключении ветвей (отказы релейной защиты или коммутационной аппаратуры) и действиях резервных защит на отключение дополнительных ветвей образуются конъюнкции третьего порядка $C_3(k)$. При этом уменьшение числа конъюнкций $C_1(k)$, $C_2(k)$ и $C_3(k)$ для особо опасных аварий свидетельствует о повышении надежности и позволяет сделать вывод в пользу решения с меньшими значениями $C_1(k)$, $C_2(k)$ и $C_3(k)$.

Вычисление частот отказов функционирования k -го вида $\lambda(k)$ и длительности аварийного восстановления $T(k)$ в общем случае осуществляется по выражениям [9]:

$$\lambda(k) = \sum_j \sum_i q(j)\lambda(i)Q(s/i)L(k); \quad (2)$$

$$T(k) = \frac{1}{\lambda(k)} \sum_j \sum_i q(j)\lambda(i) \min\left\{\frac{t(j)}{2}; t(i); t_{\text{оп}}\right\} Q(s/i)L(k), \quad (3)$$

где $q(j)$ – относительная длительность j -го ремонтного режима, о.е; $\lambda(i)$ – частота повреждения i -го элементы схемы; 1/год; $t(i)$ – длительность послеаварийного восстановления i -го элемента схемы, ч; $t(j)$ – длительность j -го ремонтного режима работы схемы; $t_{\text{оп}}$ – время оперативных переключений, ч; $Q(s/i)$ – вероятность отказа в срабатывании РЗ или КА.

Коэффициент неготовности потребителей K_n вычисляется по выражению [9]:

$$K_n = \frac{T(k)\lambda}{8760}. \quad (4)$$

В [10, 11] представлены принципиальные электрические схемы распределительных устройств 35-750 кВ в качестве типовых решений.

Упрощенные схемы с количеством выключателей меньшим или равным количеству присоединений – блочные, комбинирование блочных схем, мостики, сдвоенный мостик, заход – выход, треугольник, четырехугольник, пятиугольник, шестиугольник представлены на рис. 1.

Сложные схемы распределительных устройств типовых ПС с количеством выключателей большим или равным количеству присоединений – одна рабочая секционированная выключателем система шин, одна рабочая секционированная система шин с подключением ответственных присоединений через “полуторную” цепочку, две рабочие системы шин, трансформаторы – шины с присоединением линий через два выключателя, трансформаторы – шины с полуторным присоединением линий, полуторная схема представлены на рис. 2.

На рис. 2 не приведены схемы с обходной системой шин, т.к. обеспечение гибкости автоматической работы таких схем требует устройств автоматики со сложной логикой работы и большим количеством элементов управления, что снижает их надежность и усложняет работу оперативного персонала. В настоящее время их применение с учетом высоконадежного элегазового оборудования требует специального обоснования [12].

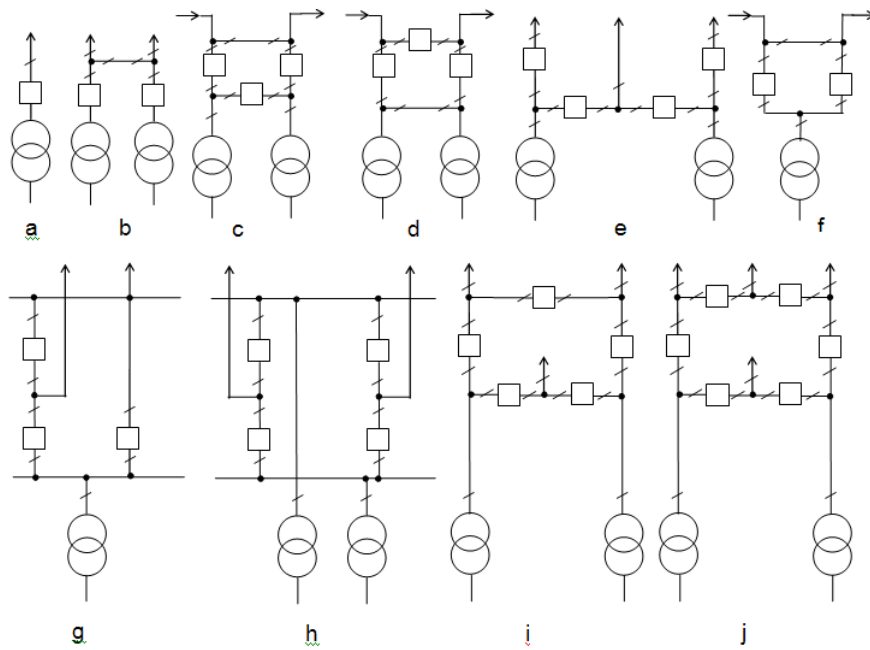


Рис. 1 – Упрощенные схемы типовых подстанций:

a – блок (линия - трансформатор) с выключателем; b – два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий; c – мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий; d – мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов; e – сдвоенный мостик; f – заход – выход; g – треугольник; h – четырехугольник; i – пятиугольник; j – шестиугольник.

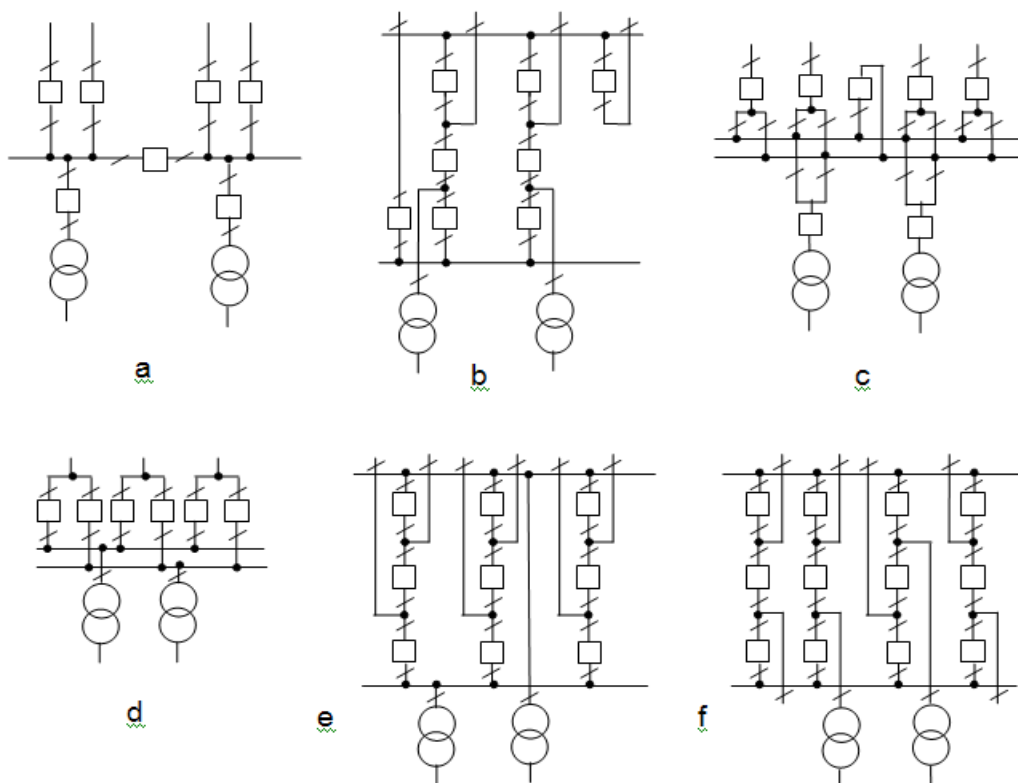


Рис. 2 – Сложные схемы типовых подстанций:

a – одна рабочая секционированная выключателем система шин; b – одна рабочая секционированная система шин с подключением ответственных присоединений через “полупортную” цепочку; c – две рабочие системы шин; d – трансформаторы - шины с присоединением линий через два выключателя; e – трансформаторы - шины с полупортным присоединением линий; f – полупортная схема.

Произведем расчет надежности схем электрических соединений распределительных устройств типовых ПС представленных на рис. 1 и рис. 2 с помощью программы "ТОPAS". Отличительной особенностью производимых расчетов является использование в схемах распределительных устройств высоконадежных элегазовых выключателей.

В табл. 1 приведены данные по надёжности элементов распределительных устройств напряжением 110 и 330 кВ [6, 13, 14].

Таблица 1. Показатели надежности оборудования понижающих подстанций

Элемент РУ	Частота отказа λ , 1/год	Время послеаварийного восстановления $T_{в}$, ч	Частота планового ремонта $\lambda_{рем}$, 1/год	Длительность планового ремонта $T_{рем}$, ч
Трансформатор 330 кВ мощностью более 80 МВ·А	0,041	74	1,00	30
Трансформатор 110 кВ мощностью 10-80 МВА	0,014	76	0,75	28
Элегазовый выключатель напряжением 330 кВ	0,015	36,8	0,08	200
Элегазовый выключатель напряжением 110 кВ	0,01	30,7	0,08	100
Сборные шины 330 кВ (на одно присоединение)	0,013	5	0,166	3
Сборные шины 110 кВ (на одно присоединение)	0,016	5	0,166	4
Линия электропередачи 110 кВ на 1 км	0,013	14,4	2,0	14,5
Линия электропередачи 330 кВ на 1 км	0,0025	13,6	0,35	20

Вероятность отказа выключателя при отключении короткого замыкания была принята 0,002. Время оперативных переключений в расчетах принимаем равным 0,5 ч. Длина воздушных линий принята в расчетах 40 км. Под полным погашением схемы будем понимать одновременное отключение всех трансформаторов и линий электропередач на подстанции.

В схеме две рабочие системы шин, время послеаварийного восстановления для обеих систем шин задается равным длительности оперативных переключений [9].

Результаты расчета упрощенных типовых схем электрических соединений ПС при полном погашении схемы представлены в табл. 2., а результаты расчета сложных типовых схем электрических соединений ПС при полном погашении схемы представлены в табл. 3.

Таблица 2. Результаты расчета надежности упрощенных типовых схем электрических соединений понижающих подстанций при полном погашении схемы

Название схемы	Частота отказа $\lambda_{\text{сум}}$, 1/год	Время после-аварийного восстановления $T_{\text{в}}$, ч	Коэффициент неготовности, $K_{\text{н}}$, о.е.	Число конъюнкций $C_1(k)/C_2(k)/C_3(k)$
Блок (линия-трансформатор) с выключателем	0,544	16,78	$1,042 \cdot 10^{-3}$	2/2/0
Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий	1,12	0,50	$6,393 \cdot 10^{-5}$	3/9/12
Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий	1,17	0,50	$6,678 \cdot 10^{-5}$	0/9/27
Мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов	0,162	0,51	$9,4315 \cdot 10^{-6}$	0/6/21
Сдвоенный мостик	0,000578	0,50	$3,299 \cdot 10^{-8}$	0/0/24
Заход-выход	1,22	1,57	$2,1865 \cdot 10^{-4}$	1/8/6
Треугольник	0,0993	13,64	$1,5462 \cdot 10^{-4}$	1/6/14
Четырехугольник	0,00124	0,50	$7,078 \cdot 10^{-8}$	0/0/37
Пятиугольник	0,000579	0,50	$3,305 \cdot 10^{-8}$	0/0/30
Шестиугольник	0,000578	0,50	$3,299 \cdot 10^{-8}$	0/0/24

Как видно из результатов расчета упрощенных схем понижающих ПС (табл. 2) схема два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий (рис. 1, б) значительно надежнее схемы блок (линия – трансформатор) с выключателем (рис. 1, а). Схема мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов (рис. 1, д) повышает надежность более, чем в 7 раз по сравнению с размещением мостика в цепях линий и ремонтной перемычки со стороны линий (рис. 1, с). Схема сдвоенный мостик (рис. 1, е) обеспечивает еще большую надежность по сравнению со схемой: мостик с выключателями в цепях трансформаторов и ремонтной перемычкой со стороны трансформаторов (рис. 1, д). Применение схем пятиугольника (рис. 1, и) и шестиугольника (рис. 1, j) приводит к дальнейшему повышению надежности более чем в два раза в сравнении со схемой четырехугольника (рис. 1, h), также для этих схем характерно и меньшее число конъюнкций $C_3(k)$ опасных аварий. Для однотрансформаторных ПС схема заход-выход (рис. 1, f) повышает надежность более чем в 4,7 раза в сравнении со схемой блок (линия – трансформатор) с выключателем (рис. 1, а). Применение схемы треугольник (рис. 1, g) приводит к повышению надежности схемы более чем в 1,41 раз в срав-

нении со схемой заход-выход (рис. 1, f). Наиболее надежные схемы характеризуются большим количеством выключателей. Значения коэффициента неготовности для двухтрансформаторной ПС схема четырехугольник (4 выключателя) составляет $7,08 \cdot 10^{-8}$, для однострансформаторной ПС схема треугольник (три выключателя) составляет $1,55 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 3. Результаты расчета надежности сложных типовых схем электрических соединений понижающих подстанций при полном погашении схемы

Название схемы	Частота отказа $\lambda_{\text{сум}}, 1/\text{год}$	Время после-аварийного восстановления $T_{в, ч}$	Коэффициент неготовности, $K_n, \text{о.е.}$	Число конъюнкций $C_1(k)/C_2(k)/C_3(k)$
Одна рабочая секционированная выключателем система шин	$0,106 \cdot 10^{-1}$	0,73	$8,833 \cdot 10^{-7}$	3/9/27
Одна рабочая секционированная система шин с подключением ответственных присоединений через “полупуторную” цепочку	$0,592 \cdot 10^{-4}$	0,5	$3,3789 \cdot 10^{-9}$	0/0/20
Две рабочие системы шин	$0,109 \cdot 10^{-1}$	0,68	$8,461 \cdot 10^{-7}$	3/9/27
Трансформаторы-шины с присоединением линий через два выключателя	$0,479 \cdot 10^{-3}$	0,5	$2,734 \cdot 10^{-8}$	0/0/25
Трансформаторы – шины с полупуторным присоединением линий	$0,43 \cdot 10^{-5}$	0,5	$2,454 \cdot 10^{-10}$	0/0/63
Полупуторная схема	$0,828 \cdot 10^{-6}$	0,5	$4,726 \cdot 10^{-11}$	0/0/10

Как видно из результатов расчета показателей надежности сложных схем электрических соединений ПС (табл. 3), наиболее надежными схемами являются схемы с полупуторными присоединениями, которые характеризуются большим количеством применяемых выключателей, чем другие рассмотренные схемы.

Так, наименьшее значение коэффициента неготовности и меньшее число конъюнкций $C_3(k)$ имеет “полупуторная схема” (рис. 2, f), далее следует схема “трансформаторы – шины с полупуторным присоединением линий” (рис. 2, e), коэффициент неготовности которой на порядок выше коэффициента неготовности полупуторной схемы, а число конъюнкций $C_3(k)$ опасных аварий выше в 6,3 раза чем в полупуторной схеме.

Наименее надежные схемы “одна рабочая секционированная выключателем система шин” (рис. 2, a) и “две рабочие системы шин” (рис. 2, c), т.к. в схемах используется один выключатель на присоеди-

ние. По результатам расчетов рассматриваемые схемы примерно равнонадежны, т.к. здесь принималось во внимание наличие небольшого количества присоединений (до 6 штук). При увеличении количества присоединений схема “одна рабочая секционированная выключателем система шин” будет более надежной, чем схема “две рабочие системы шин”, что объясняется большим количеством присоединений к системе шин в схеме “две рабочие системы шин” [6].

Применение схемы “одна рабочая секционированная система шин с подключением ответственных присоединений через “полуторную” цепочку” (рис. 2, б) повышает надежность более чем на два порядка по сравнению со схемой “одна рабочая секционированная выключателем система шин”, также для этой схемы характерно и меньшее число конъюнкций $C_3(k)$ опасных аварий.

Заключение

На основе таблично-логического метода с помощью программы “ТОPAS” проведен расчет показателей надежности упрощенных и сложных типовых схем понижающих ПС.

Указано количественное соотношение показателей надежности для группы упрощенных схем напряжением 110 кВ и для группы сложных схем напряжением 110 и 330 кВ. Наиболее надежные схемы характеризуются большим количеством выключателей.

Литература

1. Воропай Н. И., Ковалёв Г. Ф., Кучеров Ю. Н. Концепция обеспечения надёжности в электроэнергетике. М.: ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013, 212 с.
2. Скопинцев В.А. Надежность схем распределительных устройств электроподстанций / Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 62. Проблемы надежности существующих и перспективных систем энергетики и методы их решения / отв. ред. Н.И. Воропай, В.А. Савельев. Иваново: ПресСто 2011, с. 219-227.
3. Гук Ю.Б. Оценка надежности электроустановок. М.: Энергия, 1974, 200 с.
4. Воропай Н.И. Надежность систем электроснабжения. Новосибирск: Наука, 2006, 205 с.
5. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения. Ростов-на Дону «Терра Принт», 2007, 128 с.
6. Папков Б.В., Крайнов С.П. Методика оценки надежности схем электрических соединений энергообъектов / Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики Вып. 59. Вопросы исследования надежности либерализованных систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009, с. 131-140.
7. Фокин Ю.А. Вероятностно-статические методы в расчетах систем электроснабжения. М.: Энергоатомиздат, 1985, 240 с.

8. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике: учеб. пособие. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990, 208 с.

9. Черновец А.К. Элементы САПР электрической части АЭС на персональных компьютерах. СПб: Санкт-Петербург. гос. техн. ун-т, 1992, 89 с.

10. Подстанции электрические напряжением 35 кВ и выше. Нормы технологического проектирования. Стандарт ГПО «БЕЛЭНЕРГО» СТП 09110.01.2.104-15. Минск.: РУП «Белэнергосетьпроект», 2015, 191 с.

11. Балаков Ю.Н., Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. Проектирование схем электроустановок: Учебное пособие для вузов. 2-е изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2006, 288 с.

12. Дорофейчик А.Н. Пути повышения надежности электрических сетей: учебное пособие. Гродно: ГрГУ, 2007, 203 с.

13. Герасимов В.Г. и др. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3 Производство, передача и распределение электрической энергии. 9-е изд. М.: МЭИ, 2004, 964 с.

14. Васильев А.П., Гук Ю.Б., Карпов В.В. Надежность электроэнергетических установок и систем: теория и практика. СПб.: ГУ Ленгосэнергонадзор, 2000, 413 с.