

Методические основы оценки надежности и риска электрических систем и сетей

А.А. Римов (ОАО «ВТИ», Москва),
А.С. Можаяев (ОАО «СПИК СЗМА», Санкт-Петербург)

Требования к надёжности электроснабжения определяются «Правилами устройств Электроустановок» [1] по категориям потребителей (электроприёмников). Потребителей относят к той или иной категории в зависимости от степени опасности для жизни и здоровья людей, размера возможного ущерба в случае нарушения электроснабжения. Сгруппированные по категориям потребители обеспечиваются соответствующим резервированием источников электроснабжения; регламентируется также продолжительность восстановительных работ после отказа/повреждения элемента электрической сети.

Статистика повреждаемости элементов электрических систем и сетей по результатам их эксплуатации доступна при создании новых проектов и разработке программ технического обслуживания и ремонта. Тем не менее, количественная оценка и оптимизация надёжности работы электрических систем и сетей по отношению к каждому из потребителей остаётся сложной задачей ввиду значительного количества элементов систем и многообразия связей между отдельными элементами. Подобного рода задачи могут решаться применением общего логико-вероятностный метод (ОЛВМ) автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем и соответствующего программного обеспечения – ПК «АРБИТР» [2-4]. Метод предусматривает преобразование реальной функциональной схемы технологического процесса (например, процесса производства и распределения электроэнергии, тепла) в адекватную логическую схему – схему функциональной целостности (СФЦ). СФЦ, в свою очередь представленная в виде логического уравнения, обрабатывается средствами алгебры логики и, в результате, определяются характеристики надёжности системы. При этом возможен расчёт так называемых «немонотонных» СФЦ, содержащих инверсные причинно-следственные связи. Графическим инструментом СФЦ являются функциональная и фиктивная вершины, дизъюнктивная и конъюнктивная дуги с прямыми и инверсными выходами [2-4]. В работе [4] приведён пример решения задачи автоматизированного моделирования и расчёта показателей надёжности и риска судово-вой электроэнергетической системы.

Целью настоящей работы явилась оценка перспективы применения ОЛВМ для определения и анализа показателей надёжности электрических систем и сетей (далее «систем») и сопутствующего риска (среднего ущерба за год), в условиях неограниченного и ограниченного электроснабжения, на конкретном примере. Пример разработан на основе схемы электрических сетей, представленной в учебнике [5]. Функциональная схема (рис.1) включает 45 элементов, объединяет системообразующие сети (электростанции ЭС1, ЭС2 и ЭС3 с повышающими подстанциями ПС1, ПС2 и ПС3), питающие сети с районными подстанциями ПС4, ПС5, ПС6, ПС7

и распределительные сети с трансформаторными подстанциями ПС8, ТП1, ТП2, ТП3, ТП4. К шинам электрических сетей подсоединены 15 потребителей (обозначены буквами от «А» до «О»).

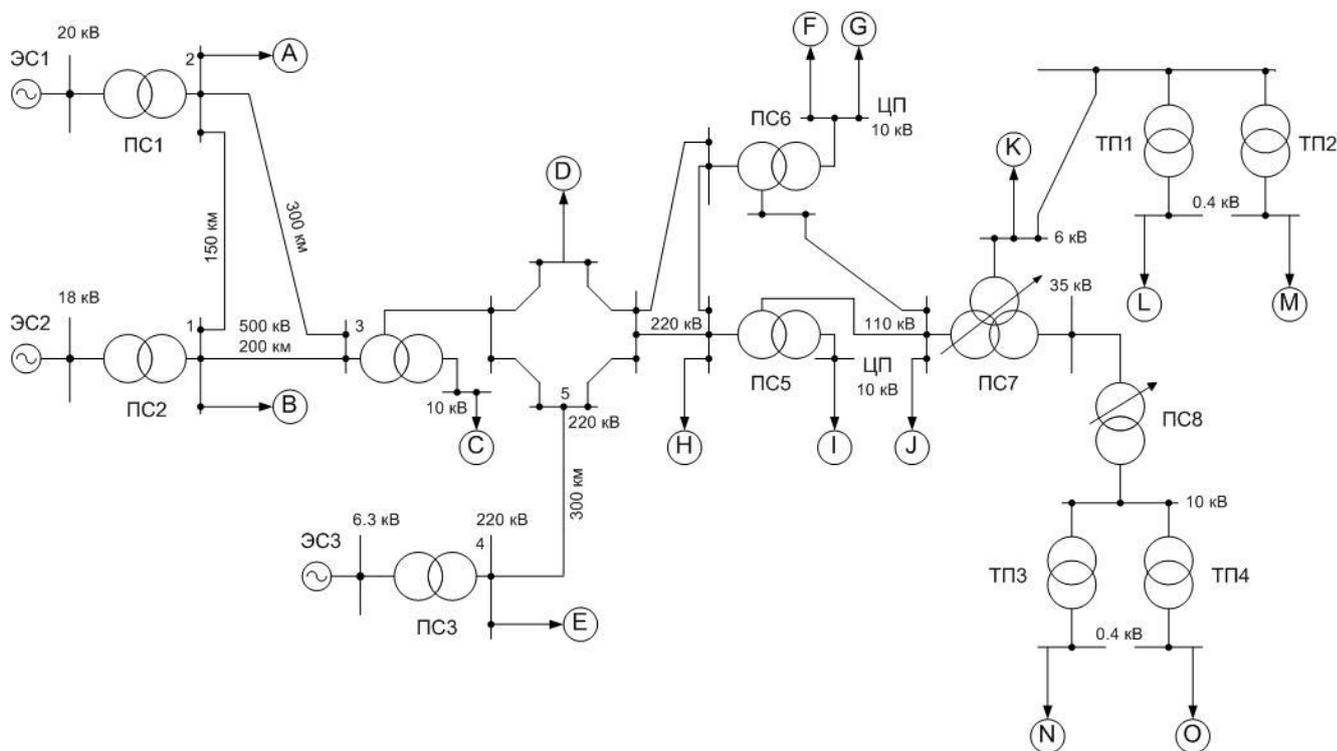


Рис.1
Функциональная схема работоспособности электрических сетей

СФЦ электрических сетей приведена на рис. 2.

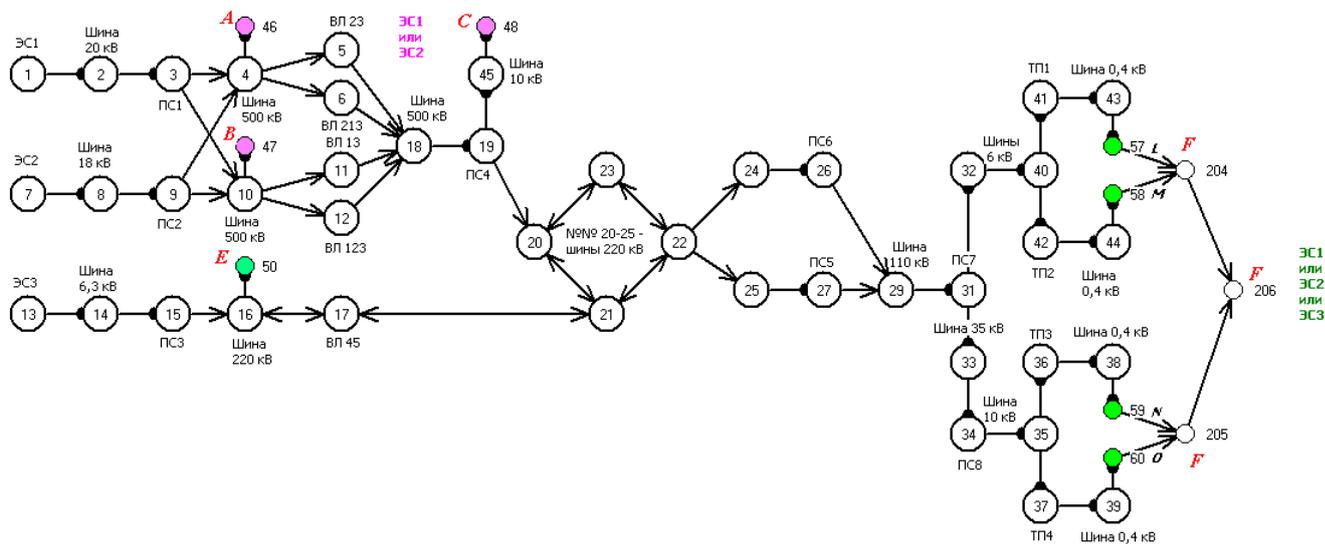


Рис.2
Схема функциональной целостности электрических сетей
в условиях неограниченного энергоснабжения

Элементами СФЦ являются электростанции, подстанции, шины, воздушные линии системообразующей части сетей и потребители электроэнергии. В предположении относительно непротяжённой длины воздушных линий питающих и распределительных сетей (менее 10 – 15

км между сборными шинами, рис.1), их повреждаемость не учитывалась в расчётах надёжности. Сохранение системой работоспособного состояния по критериям $У_{46}, У_{47}, У_{48}, У_{49}, У_{50}, У_{51}, У_{52}, У_{53}, У_{54}, У_{55}, У_{56}, У_{57}, У_{58}, У_{59}, У_{60}$ тождественно условию снабжения электроэнергией потребителей $A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O$. И наоборот, отказ по какому-либо из перечисленных критериев тождественен прекращению электроснабжения соответствующего потребителя.

Исходные данные (среднее время наработки на отказ и среднее время восстановления элементов системы) для расчёта системных показателей надёжности приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Показатели надёжности элементов электрических сетей

№ элемента на СФЦ	Наименование элемента	Среднее время наработки на отказ, год	Среднее время восстановления, ч
X1	ЭС1	0,8	200
X2	Шина 20 кВ	100	2
X3	ПС1	8,3	2600
X4	Шина 500 кВ	30	18
X5	ВЛ 23	0,7	15
X6	ВЛ 213	0,6	15
X7	ЭС2	1,5	200
X8	Шина 18 кВ	100	2
X9	ПС2	8,3	2600
X10	Шина 500 кВ	30	18
X11	ВЛ 13	1	16
X12	ВЛ 123	0,5	16
X13	ЭС3	1,2	100
X14	Шина 6,3 кВ	100	2
X15	ПС3	12,5	700
X16	Шина 220 кВ	50	7
X17	ВЛ 45	0,5	9,6
X18	Шина 500 кВ	50	12
X19	ПС4	8,3	2600
X20	Шина 220 кВ	50	7
X21	Шина 220 кВ	33	11
X22	Шина 220 кВ	25	14
X23	Шина 220 кВ	33	11
X24	Шина 220 кВ	50	7
X25	Шина 220 кВ	33	11
X26	ПС6	12,5	700
X27	ПС5	12,5	700
X28	ЦП 10 кВ	33	7
X29	Шина 110 кВ	33	7
X30	ЦП 10 кВ	100	2
X31	ПС7	14	525
X32	Шина 6 кВ	33	7
X33	Шина 35 кВ	100	2
X34	ПС8	20	400
X35	Шина 10 кВ	33	7
X36	ТПЗ	25	200
X37	ТП4	25	200
X38	Шина 0,4 кВ	100	5
X39	Шина 0,4 кВ	100	5
X40	Шина 6 кВ	25	9
X41	ТП 1	25	400
X42	ТП 2	25	400
X43	Шина 0,4 кВ	50	4

X44	Шина 0,4 кВ	50	4
X45	Шина 10 кВ	50	4,5

В рамках выполненной работы рассмотрено решение двух вариантов задач:

– **Условие задачи 1.** Оценить надежность и риск обеспечения электроэнергией каждого из 15 потребителей при условии их *неограниченного электроснабжения*, имеющего следующий смысл. В соответствии с функциональной и с логической схемами системы (рис. 1, 2) необходимым условием бесперебойного снабжения электроэнергией потребителей *A, B* или *C* является сохранение работоспособного состояния хотя бы одной из двух электростанций ЭС1, ЭС2. Соответствующим условием для остальных потребителей (*D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O*) является сохранение работоспособного состояния хотя бы одной из трёх электростанций ЭС1, ЭС2, ЭС3. Эти условия названы «условиями неограниченного электроснабжения» и приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Условия бесперебойного электроснабжения потребителей при неограниченном энергоснабжении

Обозначение потребителя	Электростанции, необходимые для обеспечения электроснабжения потребителя
A, B, C	ЭС1 или ЭС2
D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O	Любая из ЭС1, ЭС2, ЭС3

– **Условие задачи 2:** Оценить надежность и риск обеспечения электроэнергией каждого из 15 потребителей при условии их *ограниченного электроснабжения*, когда образуется дефицит электрической мощности из-за незапланированного отключения одного или двух источников электроснабжения. По условиям настоящей задачи сетевая компания в этом случае вынуждена ввести дополнительное ограничение энергоснабжения ряда потребителей (*D, H, F, G, I, J, K*), см. табл. 3 и СФЦ, рис. 3.

Таблица 3 – Условия бесперебойного электроснабжения потребителей при дефиците электрической мощности

Обозначение потребителя	Электростанции, необходимые для обеспечения электроснабжения потребителя
A, B, C	ЭС1 или ЭС2
D, H	ЭС1 и ЭС2
F, G, I, J, K	Любая пара из ЭС1, ЭС2, ЭС3
E, L, M, N, O	Любая из ЭС1, ЭС2, ЭС3

Решение задачи 1

Рассчитанные показатели надёжности электроснабжения потребителей приведены в табл. 4. Помимо расчётных показателей надёжности в табл. 4 приведены также показатели риска:

- интенсивность потерь (известная по условиям настоящей задачи), R_i , равная величине ущерба за единицу времени, наносимого i -му потребителю вследствие его незапланированного отключения от электрических сетей (т.е. в результате нахождения системы в состоянии отказа – реализации соответствующего критерия y''_j);

- максимально возможный ущерб, $R_i^{(max)}$, причиняемый i -му потребителю за год, равный произведению интенсивности потерь и длительности календарного года, $R_i^{(max)} = R_i \times 8760$;

- ожидаемый ущерб, \bar{R}_i , (математическое ожидание ущерба) i -го потребителя за год, равный произведению коэффициента неготовности системы по соответствующему критерию y''_j и максимального ущерба,

$$\bar{R}_i = (1 - K\Gamma_j^{(c)}) \times R_i^{(max)}, \quad (1)$$

где $K\Gamma_j^{(c)}$ - коэффициент готовности системы по критерию y_j ;

- ожидаемая величина ущерба, наносимого за год всем потребителям электроэнергии вследствие ненадёжности системы,

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^N \bar{R}_i, \quad (2)$$

где $N = 15$ – число потребителей.

Ожидаемый ущерб, причиняемый каждому потребителю за год согласно (1) определяли с помощью ПК «АРБИТР», вводя через интерфейс пользователя критерий y''_j и величину $R_i^{(max)}$. Суммарный ожидаемый ущерб в соответствии с (2) составил $\bar{R} = 12131$ у.е.

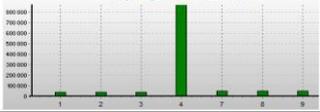
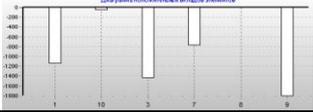
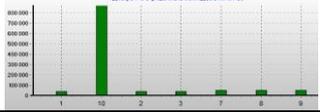
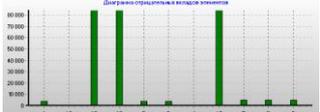
Таблица 4 – Показатели надёжности и риска при электроснабжении потребителей

Порядковый номер, i , потребителя	Обозначение потребителя	Логический критерий отказа y''_j	Коэффициент неготовности системы по отношению к i -му потребителю, $(1 - K\Gamma_i^{(c)})$	Среднее время наработки системы на отказ, $\tau_i^{(oc)}$, год	Среднее время восстановления системы, $\tau_i^{(sc)}$, ч	Показатели ущерба, наносимого i -му потребителю		
						R_i , у.е./ч	$R_i^{(max)}$ у.е.	\bar{R}_i , у.е.
1	A	y''_{46}	0.003072887	6,962	187,972	100	876000	2691.85
2	B	y''_{47}	0.003072887	6,962	187,972	100	876000	2691.85
3	C	y''_{48}	0.037462021	3.693	1259	10	87600	3281.67
4	D	y''_{49}	0.000709573	6,922	43,0554	50	438000	310.79
5	E	y''_{50}	0.000638539	11,02	61,6583	50	438000	279.68
6	F	y''_{51}	0.007122755	3,515	220,911	10	87600	623.95
7	G	y''_{52}	0.007122755	3,515	220,911	10	87600	623.95

8	H	y''_{53}	0.000773451	5,421	36,7573	50	438000	338.77
9	I	y''_{54}	0.007122892	3,643	228,964	10	87600	623.96
10	J	y''_{55}	0.000800285	5,382	37,7607	25	219000	175.26
11	K	y''_{56}	0.00508354	3,478	155,665	5	43800	222.66
12	L	y''_{57}	0.006947305	2,58	158,138	1	8760	60.86
13	M	y''_{58}	0.006947305	2,58	158,138	1	8760	60.86
14	N	y''_{59}	0.008263492	2,515	183,609	1	8760	72.39
15	O	y''_{60}	0.008263492	2,515	183,609	1	8760	72.39
$\bar{R} = \sum_{i=1}^{15} \bar{R}_i$								12131

При моделировании и расчете ожидаемого ущерба для каждого потребителя вычислены положительные и отрицательные вклады [2 – 4] в этот показатель каждого элемента системы. В табл. 5 приведены вклады элементов по отношению к потребителям *A*, *B* и *C*. Положительные вклады показывают, на сколько уменьшится значение риска \bar{R}_i функционирования *i*-го потребителя при увеличении надежности одного элемента до 1.0. Отрицательные вклады показывают, на сколько увеличится значение риска \bar{R}_i функционирования *i*-го потребителя при уменьшении надежности одного элемента до 0.0. На основе этих характеристик можно обосновывать эффективные мероприятия, направленные на увеличение (или уменьшение) риска системы. Например, наибольший эффект в повышение надёжности/снижения риска электроснабжения 1-го потребителя будет достигнут, как следует из табл. 5, если повысить надёжность следующих элементов системы: X1 (ЭС1), X3 (ПС1), X7 (ЭС2) и X9 (ПС2).

Таблица 5 – Диаграммы вкладов элементов в ожидаемый ущерб по отношению к первым трём потребителям

Порядковый номер (обозначение) потребителя	\bar{R}_i	Диаграмма положительных вкладов элементов	Диаграмма отрицательных вкладов элементов
1 (A)	2691.85		
2 (B)	2691.85		
3 (C)	3281.67		

С помощью анализа вкладов элементов и вида СФЦ возможна также выработка решений по изменению исходной функциональной схемы. Пусть, например, величина риска в отношении 3-го потребителя (3281.67 у.е.) признана недопустимой. Изучение вкладов элементов пока-

зывает, что основное влияние в данном случае оказывает элемент X19 – подстанция ПС4. Если повышение надёжности системы за счёт повышения надёжности подстанции признано неэффективным или нецелесообразным, то в качестве альтернативной меры можно рекомендовать дублирование электроснабжения 3-го потребителя путём прокладки дополнительной линии электропередачи, соединив например, шину 10 кВ (X45) с центром питания ЦП 10 кВ (X30). Новые показатели риска электроснабжения 3-го потребителя рассчитываем по критерию отказа $y''_{48} \cap y''_{54}$. В результате получим новые величины $\tau_3^{(bc)} = 66,1$ ч, $\tau_3^{(oc)} = 8.291$ год, $(1 - K\Gamma_i^{(c)}) = 0.000908780642217$ и, используя (1), находим новую величину риска $\overline{R}_3 \approx 80$ у.е. Снижение величины риска от 3282 до 80 у.е. обеспечено в основном существенным снижением времени восстановления системы по критерию y_{48} .

Поскольку надёжное функционирование системы невозможно без надёжного функционирования источников электроснабжения, принципиально важно знать их соответствующие показатели. Оценим вклад электростанций ЭС1, ЭС2 и ЭС3 в суммарную величину риска (2). Элементы системы X1, X7 и X13 образуют восемь несовместных состояний $y_1 = X1 \cap X7 \cap X13$, $y_2 = X''1 \cap X7 \cap X13$, $y_3 = X1 \cap X''7 \cap X13$, $y_4 = X1 \cap X7 \cap X''13$, $y_5 = X''1 \cap X''7 \cap X13$, $y_6 = X''1 \cap X7 \cap X''13$, $y_7 = X1 \cap X''7 \cap X''13$, $y_8 = X''1 \cap X''7 \cap X''13$. Ущерб, наносимый потребителям за 1 год эксплуатации системы и обусловленный ненадёжностью трёх электростанций, оценивается подобно (2)

$$\overline{R}^{(s)} = \sum_{i,j} (1 - K\Gamma_j^{(c)}) \times R_i^{(max)}, \quad (3)$$

где $j = 1, 2, 3, \dots, 8$, а сумма максимально возможных ущербов $R_i^{(max)}$ подсчитывается, используя данные табл. 4 и с учётом условий бесперебойного электроснабжения (табл. 2). В результате получено: $\overline{R}^{(s)} \approx 773$ у.е. или 6,4% от суммарного ущерба, причиняемого системой потребителям в течение года.

Решение задачи 2

По условию задачи 2 вследствие дефицита генерирующих мощностей введено дополнительное ограничение энергоснабжения потребителей D, H, F, G, I, J, K (табл. 3).

Изображенная выше СФЦ преобразована с учётом новых условий электроснабжения (рис. 3).

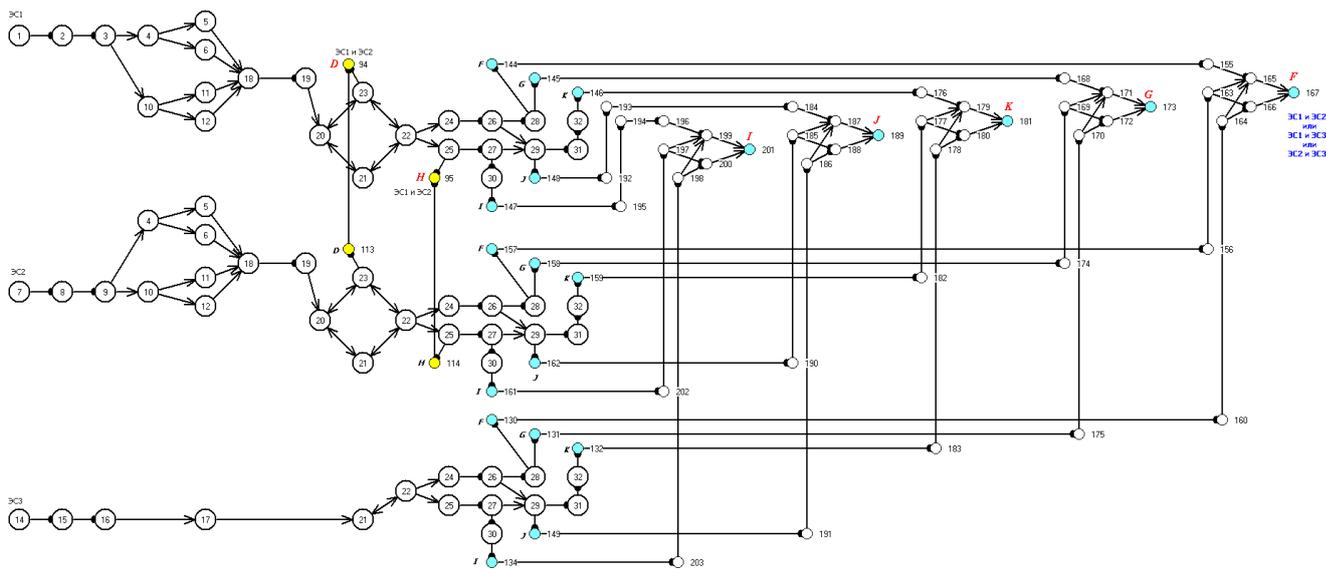


Рис.3
 Схема функциональной целостности электрических сетей
 с учётом дефицита электрической мощности

Определив показатели надёжности электроснабжения потребителей в соответствии с СФЦ рис.3, по формуле (2) определяем средний ущерб за год в условиях ограниченного электроснабжения:

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^{15} R_i = 49421 \text{ у.е.}$$

Возрастание среднего ущерба за год в условиях дефицита электрической мощности по сравнению с неограниченным электроснабжением составляет $49421 - 12131 = 37290$ [у.е.] или 307%.

Расчитав вклад электростанций в суммарный ущерб по отношению ко всем потребителям аналогично случаю неограниченного электроснабжения согласно (3) и с учётом новых условий электроснабжения (табл. 3), получим: $\bar{R}^{(э)} = 38260$ у.е. или 77% от суммарного ущерба, причиняемого системой потребителям в течение года. Таким образом, в условиях ограниченного электроснабжения генерирующие электростанции, как элементы системы, вносят основной вклад в величину среднего ущерба потребителей.

В настоящей работе рассматривался только риск, сопряженный с причинением ущерба потребителям, хотя аналогичным образом могут быть оценены риски, обусловленные, например, возможными затратами на ремонт, замену и техническое обслуживание элементов системы. В целом результаты настоящей работы показывают, что применение общего логико-вероятностного метода автоматизированного структурно-логического моделирования является весьма перспективным для оценки надёжности и риска эксплуатации электрических систем и сетей.

Литература

[1] Правила устройства электроустановок ПУЭ. Издание седьмое. Утверждены приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204.

[2] Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод автоматизированного структурно-логического моделирования надежности, безопасности и риска сложных систем. // Многотомное издание "Безопасность России". Анализ риска и проблем безопасности. В четырех частях. Часть I. Основы анализа и регулирования безопасности. М.: МГФ "Знание", 2006, 640 с. (с. 153-197).

[3] Можяев А.С. Общий логико-вероятностный метод и технология моделирования безопасности сложных систем. // Многотомное издание "Безопасность России". Анализ риска и проблем безопасности. В четырех частях. Часть III. Прикладные вопросы анализа рисков критически важных объектов, 2007, 816 с. (с. 243-293).

[4] Нозик А.А., Можяев А.С. Расчёт надёжности, безопасности и риска при проектировании и эксплуатации технических систем – «Теплоэнергетические технологии», № 3-4, 2007, с. 35-43.

[5] Идельчик В.И. Электрические системы и сети, М., «ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ», 1989 г., 592 с.