

УДК 620.004.5

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКАЗОВ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А.,
инженеры ИВАНОВА А. Н., МЫСЛО Е. Л.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: alenamyslo@tut.by

Произведен анализ надежности невосстанавливаемых резервированных систем электроснабжения промышленных предприятий и других потребителей электрической энергии. Основное внимание уделено влиянию множественных отказов, вызванных отказами всех элементов системы по одной общей причине. Указаны основные возможные причины возникновения множественных отказов. Рассматриваются два основных показателя надежности невосстанавливаемых систем: среднее время безотказной работы и средняя вероятность безотказной работы. Моделирование отказов производили путем разделения исследуемой системы на две последовательно включенные подсистемы, одна из которых отражает независимые отказы, а другая – множественные отказы. В соответствии с совместным моделированием одиночных и множественных отказов результирующая интенсивность отказов представляет собой сумму взаимоисключающих составляющих: интенсивности статистически независимых отказов и интенсивности множественных отказов элементов и системы в целом.

Показано существенное влияние множественных отказов элементов на среднее время безотказной работы системы. Построена шкала предпочтений систем по критерию максимума среднего времени безотказной работы в зависимости от доли множественных отказов. Отмечено, что на шкалу предпочтений по критерию средней вероятности безотказной работы множественные отказы не влияют, однако изменяют интервалы времени, определяющие моменты отказа систем и исключения их из числа сравниваемых. Рассмотрены две задачи условной оптимизации выбора системы резервирования с учетом ее надежности и стоимости. Первая задача решается по критерию минимальной стоимости системы при условии обеспечения заданной средней вероятности безотказной работы, вторая – исходя из критерия максимума средней вероятности безотказной работы при ограничении на стоимость системы.

Ключевые слова: невосстанавливаемые резервированные системы, отказы, электроснабжение.

Ил. 6. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.

ANALYSIS OF RELIABILITY OF NONRECTORABLE REDUNDANT POWER SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT COMMON FAILURES

ANISCHENKO V. A., IVANOVA A. N., MISLO E. L.

Belorussian National Technical University

Reliability Analysis of nonrestorable redundant power Systems of industrial plants and other consumers of electric energy was carried out. The main attention was paid to numbers failures influence, caused by failures of all elements of System due to one general reason. Noted the main possible reasons of common failures formation. Two main indicators of reliability of non-restorable systems are considered: average time of no-failure operation and mean probability of no-failure operation. Modeling of failures were carried out by mean of division of investigated system into two in-series connected subsystems, one of them indicated independent failures, but the other indicated common failures. Due to joined modeling of single and common failures resulting intensity of failures is the amount incompatible components: intensity statistically independent failures and intensity of common failures of elements and system in total.

It is shown the influence of common failures of elements on average time of no-failure operation of system. There is built the scale of preference of systems according to criterion of average time maximum of no-failure operation, depending on portion of common failures. It is noticed that such common failures don't influence on the scale of preference, but change intervals of time, determining the moments of systems failures and excepting them from the number of comparators. There were discussed two problems of conditionally optimization of systems' reservation choice, taking into account their reliability and cost. The first problem is solved due to criterion of minimum cost of system providing mean probability of no-failure operation, the second problem is solved due to criterion of maximum of mean probability of no-failure operation with cost limitation of system.

Keywords: non-restorable redundant systems, failures, power supply.

Fig. 6. Tab. 3. Ref.: 10 titles.

Введение. Одним из основных способов повышения надежности систем электроснабжения потребителей, автоматических устройств контроля и управления ими является структурное (аппаратное) резервирование. Необходимая для этого избыточность обеспечивается за счет подключения дополнительных параллельных цепей, по которым передается электрическая энергия, а в устройствах контроля и управления электроснабжением – показания измерительных приборов и управляющие команды.

Анализ таких систем с постоянным пассивным резервированием без учета восстановления проведен в [1–9]. По его результатам построены шкалы предпочтений резервированных систем по критериям максимумов среднего времени и вероятности безотказной работы, на основе которых произведен окончательный выбор систем с учетом их стоимости [1–4].

При проведении указанных исследований принято допущение о статистической независимости отказов резервированных цепей. На практике, наряду с независимыми отказами, могут случаться множественные отказы,

вызываемые общими причинами. Статистическая информация о частотах множественных отказов в литературных источниках минимальна, тем не менее они вполне возможны. Так, по данным наблюдений над надежностью атомных реакторов США, доля одновременных отказов двух и более элементов превысила 20 % от общего числа отказов [5]. Можно предположить, что для отдельно взятых систем доля множественных отказов превышает эту величину.

Ниже исследуются влияние множественных отказов на надежность резервированных систем электроснабжения и выбор наиболее эффективных систем в зависимости от доли множественных отказов.

Причины множественных отказов и их моделирование. Основные причины множественных отказов следующие:

- конструкторские недоработки оборудования;
- ошибки эксплуатации и технического обслуживания;
- воздействие окружающей среды;
- внешнее катастрофическое воздействие;
- общий изготовитель резервируемого оборудования;
- общий внешний источник питания;
- неправильное функционирование системы.

Совместное моделирование одиночных и множественных отказов производили по известной методике [5], в соответствии с которой интенсивность отказов физической цепи Λ рассматривали как сумму двух взаимоисключающих компонент: интенсивности статистически независимых отказов цепи Λ_I и интенсивности множественных отказов цепи и системы в целом Λ_{II}

$$\Lambda = \Lambda_I + \Lambda_{II}. \quad (1)$$

Эти интенсивности связаны между собой:

$$\Lambda_I = (1 - \alpha)\Lambda; \quad \Lambda_{II} = \alpha\Lambda; \quad \alpha = \Lambda_{II}/\Lambda, \quad (2)$$

где α – доля отказов, вызываемых общей причиной (множественных отказов).

Для каждой цепи

$$p(t) + q(t) = 1, \quad (3)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы; $q(t)$ – вероятность отказа.

Схема моделирования независимых и множественных отказов для системы любой конфигурации состоит из двух последовательно соединенных подсхем I и II (рис. 1).

Подсхема I отображает независимые отказы системы и характеризуется эквивалентным элементом ЭЭ. Подсхема II с гипотетическим элементом ГЭ учитывает все множественные отказы. Было принято предположение, что множественные отказы полностью взаимосвязаны, т. е. происходит одновременный выход из строя всех цепей резервированной системы

по общей причине. Таким образом, отказ эквивалентного и гипотетического элементов приводит к отказу всей системы.

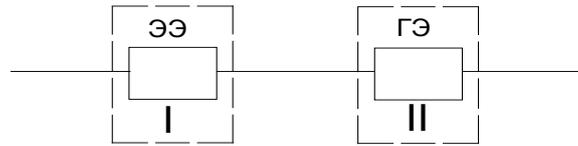


Рис. 1. Схема моделирования отказов

Вероятность безотказной работы системы $p(t)$ соответствует логической связке «конъюнкция»

$$p(t) = p_I(t)p_{II}(t), \quad (4)$$

где вероятность безотказной работы системы $p_I(t)$ обусловлена только независимыми (одиночными) отказами, а вероятность безотказной работы гипотетического элемента $p_{II}(t)$ – только множественными отказами всех элементов системы.

Расчет надежности при множественных отказах. Интенсивность отказов одной цепи (полагаем все цепи идентичными) определяется как

$$\Lambda = \sum_{i=1}^l \lambda_i = \text{const}, \quad (5)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го элемента; l – число последовательно включенных элементов в цепи.

Среднее время безотказной работы в цепи

$$T = \Lambda^{-1}. \quad (6)$$

Среднее время безотказной работы k -й резервированной системы

$$T_k = \int_0^{\infty} p_k d(\Lambda t), \quad (7)$$

где p_k – вероятность безотказной работы k -й системы, определяемая из формулы (4).

Под индексом k понимается кратность резервирования – отношение числа резервных цепей z к числу основных r , пропускная способность которых достаточна для передачи требуемого потока электрической энергии [4]:

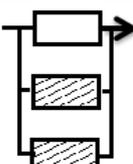
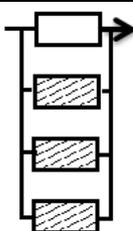
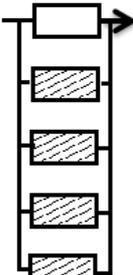
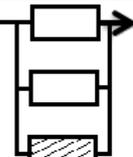
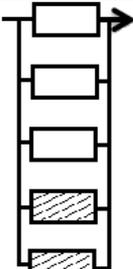
$$k = \frac{z}{r} = \frac{n-r}{r}, \quad (8)$$

где n – общее число параллельных цепей.

Схемы резервированных систем с целой и дробной кратностями и формулы для расчета показателей их надежности представлены в табл. 1. Закон надежности отдельных элементов и цепей принят экспоненциальным. Резервные элементы заштрихованы.

Таблица 1

Характеристики систем резервирования

Кратность резервирования k	Система резервирования	Схема резервирования	Вероятность безотказной работы p_k	Среднее время безотказной работы T_k
0/1	Нерезервированная		$p_{0/1} = e^{-\Lambda t}$	$T_{0/1} = \Lambda^{-1}$
1/1	Дублированная с одной основной и одной резервной цепями		$p_{1/1} = 2e^{-\Lambda t} - e^{-(2-\alpha)\Lambda t}$	$T_{1/1} = \Lambda^{-1} \left(2 - \frac{1}{2-\alpha} \right)$
2/1	Троированная с одной основной и двумя резервными цепями		$p_{2/1} = 3e^{-\Lambda t} - 3e^{-(2-\alpha)\Lambda t} + e^{-(3-2\alpha)\Lambda t}$	$T_{2/1} = \Lambda^{-1} \left(3 - \frac{3}{2-\alpha} + \frac{1}{3-2\alpha} \right)$
3/1	Квадрированная с одной основной и тремя резервными цепями		$p_{3/1} = 4e^{-\Lambda t} - 6e^{-(2-\alpha)\Lambda t} + 4e^{-(3-2\alpha)\Lambda t} - e^{-(4-3\alpha)\Lambda t}$	$T_{3/1} = \Lambda^{-1} \left(4 - \frac{6}{2-\alpha} + \frac{4}{3-2\alpha} - \frac{1}{4-3\alpha} \right)$
4/1	Квинтированная с одной основной и четырьмя резервными цепями		$p_{4/1} = 5e^{-\Lambda t} - 10e^{-(2-\alpha)\Lambda t} + 10e^{-(3-2\alpha)\Lambda t} - 5e^{-(4-3\alpha)\Lambda t} + e^{-(5-4\alpha)\Lambda t}$	$T_{4/1} = \Lambda^{-1} \left(5 - \frac{10}{2-\alpha} + \frac{10}{3-2\alpha} - \frac{5}{4-3\alpha} + \frac{1}{5-4\alpha} \right)$
1/2	Избирательная с двумя основными и одной резервной цепями		$p_{1/2} = 3e^{-(2-\alpha)\Lambda t} - 2e^{-(3-2\alpha)\Lambda t}$	$T_{1/2} = \Lambda^{-1} \left(\frac{3}{2-\alpha} - \frac{2}{3-2\alpha} \right)$
2/3	Избирательная с тремя основными и двумя резервными цепями		$p_{2/3} = 10e^{-(3-2\alpha)\Lambda t} - 15e^{-(4-3\alpha)\Lambda t} + 6e^{-(5-4\alpha)\Lambda t}$	$T_{2/3} = \Lambda^{-1} \left(\frac{10}{3-2\alpha} - \frac{15}{4-3\alpha} + \frac{6}{5-4\alpha} \right)$

Анализ надежности резервированных систем. Результаты расчетов по приведенным в табл. 1 формулам показывают, что увеличение доли

множественных отказов α приводит к заметному сближению значений среднего времени безотказной работы рассматриваемых резервированных систем и их совпадению при отсутствии одиночных отказов (рис. 2).

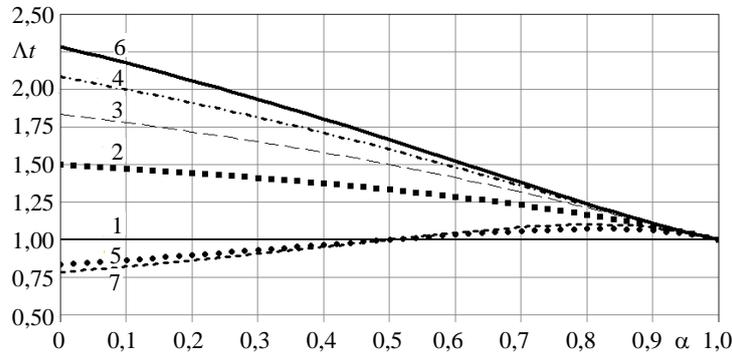


Рис. 2. Среднее время безотказной работы систем при k :
1 – 0/1; 2 – 1/1; 3 – 2/1; 4 – 3/1; 5 – 4/1; 6 – 1/3; 7 – 2/3

Из шкалы предпочтений систем по критерию убывания среднего времени безотказной работы (табл. 2) видно, что при доле множественных отказов $\alpha \leq 0,5$ последовательность предпочтений систем остается неизменной, несмотря на существенное изменение среднего времени безотказной работы.

Таблица 2

Шкала предпочтений систем по критерию убывания T_k

При $\alpha = 0$							
Кратность резервирования k	4/1	3/1	2/1	1/1	0/1	1/2	2/3
Среднее время безотказной работы T_k	$\frac{2,283}{\Lambda}$	$\frac{2,083}{\Lambda}$	$\frac{1,833}{\Lambda}$	$\frac{1,500}{\Lambda}$	$\frac{1,000}{\Lambda}$	$\frac{0,833}{\Lambda}$	$\frac{0,783}{\Lambda}$
При $\alpha = 0,3$							
Среднее время безотказной работы T_k	$\frac{1,935}{\Lambda}$	$\frac{1,815}{\Lambda}$	$\frac{1,652}{\Lambda}$	$\frac{1,412}{\Lambda}$	$\frac{1,000}{\Lambda}$	$\frac{0,931}{\Lambda}$	$\frac{0,907}{\Lambda}$
При $\alpha = 0,5$							
Среднее время безотказной работы T_k	$\frac{1,667}{\Lambda}$	$\frac{1,600}{\Lambda}$	$\frac{1,500}{\Lambda}$	$\frac{1,333}{\Lambda}$	$\frac{1,000}{\Lambda}$	$\frac{1,000}{\Lambda}$	$\frac{1,000}{\Lambda}$
При $\alpha = 0,7$							
Кратность резервирования k	4/1	3/1	2/1	1/1	2/3	1/2	0/1
Среднее время безотказной работы T_k	$\frac{1,381}{\Lambda}$	$\frac{1,358}{\Lambda}$	$\frac{1,317}{\Lambda}$	$\frac{1,231}{\Lambda}$	$\frac{1,083}{\Lambda}$	$\frac{1,058}{\Lambda}$	$\frac{1,000}{\Lambda}$

Как было показано ранее [1–4], выбор систем резервирования целесообразно производить путем сравнения не мгновенных значений вероятностей $p_k(\Lambda t)$, а их средних на интервалах $(0, \Lambda t)$ значений

$$p_{k, \text{cp}}(0, \Lambda t) = \frac{1}{\Lambda t} \int_0^{\Lambda t} p_k d(\Lambda t). \quad (9)$$

Рассчитанные по формуле (9) средние вероятности безотказной работы для разных долей множественных отказов приведены на рис. 3–6.

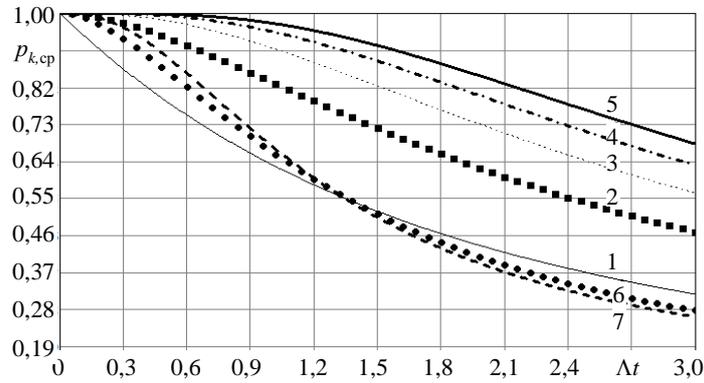


Рис. 3. Средняя вероятность безотказной работы систем при $\alpha = 0$ и k :
1 – 0/1; 2 – 1/1; 3 – 2/1; 4 – 3/1; 5 – 4/1; 6 – 1/3; 7 – 2/3

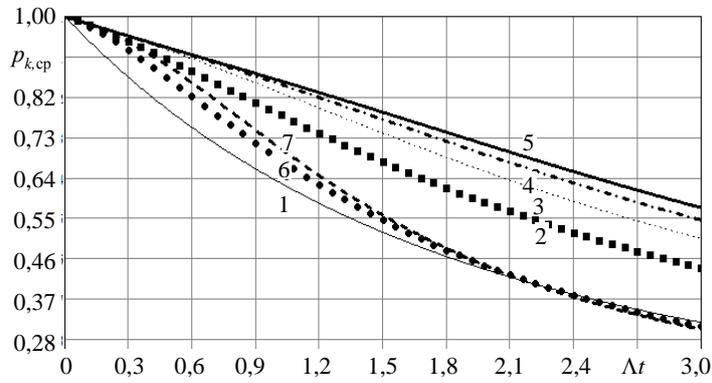


Рис. 4. Средняя вероятность безотказной работы систем при $\alpha = 0,3$ и k :
1 – 0/1; 2 – 1/1; 3 – 2/1; 4 – 3/1; 5 – 4/1; 6 – 1/3; 7 – 2/3

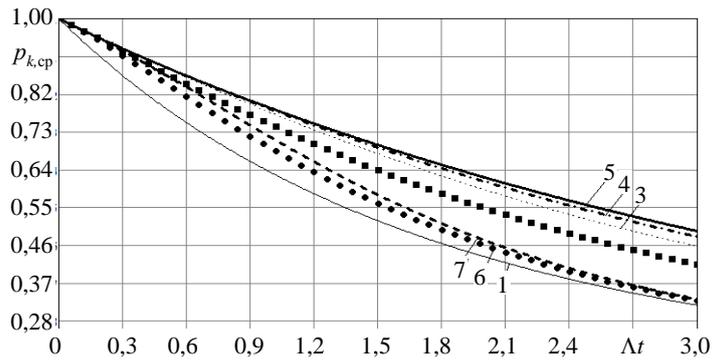


Рис. 5. Средняя вероятность безотказной работы систем при $\alpha = 0,5$ и k :
1 – 0/1; 2 – 1/1; 3 – 2/1; 4 – 3/1; 5 – 4/1; 6 – 1/3; 7 – 2/3

С ростом доли множественных отказов вероятность безотказной работы всех резервированных систем снижается. В пределе, если все отказы зависимые ($\alpha = 1$), резервированные системы ведут себя, как один элемент, и их

вероятности безотказной работы равны вероятности безотказной работы одного элемента.

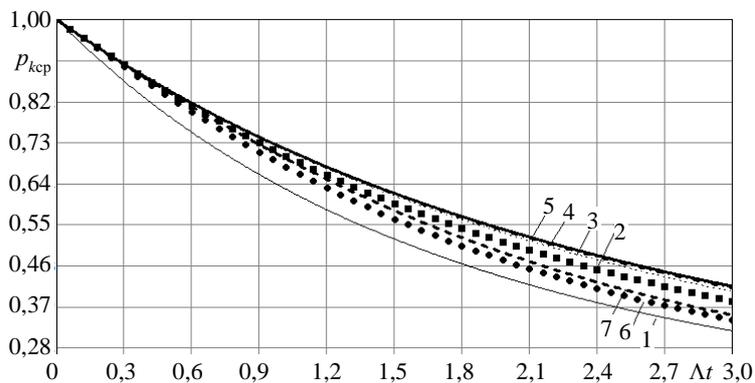


Рис. 6. Средняя вероятность безотказной работы систем при $\alpha = 0,7$ и k :
1 – 0/1; 2 – 1/1; 3 – 2/1; 4 – 3/1; 5 – 4/1; 6 – 1/3; 7 – 2/3

При построении шкал предпочтений систем по критерию убывания средней вероятности безотказной работы (табл. 3) исключали по мере увеличения времени как следствие невосстанавливаемости сравниваемых систем те из них, для которых время эксплуатации t превысило среднее время безотказной работы ($t \geq T_k$). Таким способом отсеивали системы, участвующие в решении задач выбора оптимальной системы с учетом как надежности, так и стоимости оборудования.

Таблица 3

Шкала предпочтений систем по критерию убывания $p_{k, \text{ср}}(0, \Delta t)$ до наступления отказа ($\Delta t = \Delta T_k$)

Интервал $(0, \Delta t)$			Шкала предпочтений
$\alpha = 0$	$\alpha = 0,3$	$\alpha = 0,7$	
0–0,129	0–0,254	0–0,605	4/1, 3/1, 2/1, 2/3, 1/1, 1/2, 0/1
0–0,783	0–0,901	0–1,083	4/1, 3/1, 2/1, 1/1, 2/3, 1/2, 0/1
0–0,833	0–0,931	0–1,058	4/1, 3/1, 2/1, 1/1, 1/2, 0/1
0–1	0–1	0–1	4/1, 3/1, 2/1, 1/1, 0/1
0–1,5	0–1,412	0–1,231	4/1, 3/1, 2/1, 1/1
0–1,833	0–1,652	0–1,317	4/1, 3/1, 2/1
0–2,083	0–1,815	0–1,358	4/1, 3/1
0–2,283	0–1,935	0–1,381	4/1

Из шкалы предпочтений по критерию убывания средней вероятности безотказной работы видно, что изменения доли множественных отказов не изменяют саму шкалу, но влияют на интервалы времени $(0, \Delta t)$, определяющие моменты исключения систем из рассмотрения при решении последующей оптимизационной задачи окончательного выбора наилучшей системы с учетом ее стоимости.

Методика выбора резервированной системы. В том случае, когда возможный экономический ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям из-за снижения надежности намного превышает стоимость системы, передающей электроэнергию, при ее выборе достаточно ограничиться

шкалой предпочтений по критерию убывания средней вероятности безотказной работы. Если же стоимость системы передачи электроэнергии соизмерима с ущербом от недоотпуска электроэнергии, предлагается использовать для ее выбора известную методику решения подобного рода задач надежности [10].

Задача 1. Необходимо выбрать систему минимальной стоимости C_{Σ} при известной стоимости одной цепи C_i , обеспечивающую среднюю вероятность безотказной работы не ниже заданной $p_{\text{задан}}$:

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_i \rightarrow \min; \quad (10)$$

$$p_{k,\text{cp}}(0, \Delta T_k) \geq p_{\text{задан}}. \quad (11)$$

Задача 2. Необходимо выбрать максимально надежную систему, стоимость которой не превышает допустимое значение $C_{\text{доп}}$:

$$p_{k,\text{cp}}(0, \Delta T_k) \rightarrow \max; \quad (12)$$

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_i \leq C_{\text{доп}}. \quad (13)$$

Результаты решения этих задач на условную оптимизацию в первом приближении, без учета восстанавливаемости систем передачи электроэнергии, при статически независимых отказах всех цепей системы приведены в [2]. Окончательный выбор системы следует производить с учетом интенсивности восстановления и доли множественных отказов с использованием соответствующей шкалы предпочтений согласно критериям (10)–(13).

ВЫВОДЫ

1. Показано существенное влияние множественных отказов на среднее время безотказной работы невосстанавливаемых резервированных систем передачи электроэнергии.

2. Обоснована целесообразность учета множественных отказов при отборе резервированных систем – участниц оптимизационной задачи выбора наилучшей системы по критерию, включающему надежность и стоимостной факторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Северин, Л. А. Обоснование критерия выбора схем резервирования систем управления / Л. А. Северин, В. А. Анищенко // Актуальные проблемы энергетики: материалы 62-й научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов. – Минск: БНТУ, 2006. – С. 90–92.
2. Северин, Л. А. Выбор невосстанавливаемых резервированных систем управления технологическими процессами / Л. А. Северин, В. А. Анищенко // Актуальные проблемы энергетики: материалы 63-й научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов. – Минск: БНТУ, 2008. – С. 186–189.

3. А н и щ е н к о, В. А. Методика выбора невосстанавливаемых резервированных систем управления технологическими процессами / В. А. Анищенко, Л. А. Северин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 2. – С. 5–10.
4. А н и щ е н к о, В. А. Выбор невосстанавливаемых резервированных систем контроля и управления энергетическими процессами / В. А. Анищенко, А. Н. Иванова, Е. Л. Мысло // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2012. – № 5. – С. 35–43.
5. Д и л л о н, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
6. Г у к, Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 217 с.
7. Г у к, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
8. Т е о р и я надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах / под ред. Г. В. Дружинина. – М.: Энергия, 1976. – 448 с.
9. Г л а з у н о в, Л. П. Основы теории надежности автоматических систем управления / Л. П. Глазунов, В. П. Грабовецкий, О. В. Щербаков. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
10. Р у д е н к о, Ю. Н. Надежность систем энергетики / Ю. Н. Руденко, И. А. Ушаков. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. – 328 с.

REFERENCES

1. Severin, L. A., & Anischenko, V. A. (2006) Criterion Basis of Scheme Choice for Control System Redundancy. *Aktual'nye Problemy Energetiki. Materialy 62-i Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii Studentov, Magistrantov i Aspirantov* [Actual Problems of Power Engineering. Materials 62th Scientific Research Works of Students, Post-Graduate Students, Researchers]. Minsk: BNTU, 90–92 (in Russian).
2. Severin, L. A., & Anischenko, V. A. (2008) Choice of Non-Restorable Redundant Control System of Technological Processes. *Aktual'nye Problemy Energetiki. Materialy 63-i Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii Studentov, Magistrantov i Aspirantov* [Actual Problems of Power Engineering. Materials 63th Scientific Research Works of Students, Post-Graduate Students, Researchers]. Minsk: BNTU, 186–189 (in Russian).
3. Anischenko, V. A. & Severin, L. A. (2008) Methods of Choice of Non-Repairable Redundant Control Systems of Technological Processes. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika*. [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 2, 5–10 (in Russian).
4. Anischenko, V. A., Ivanova, A. N., & Myslo, E. L. (2012) Choice of Non-Restorable Redundant Control and Management System of Technological Processes. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika*. [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 5, 35–43 (in Russian).
5. Dillon, B., & Singh, Ch.-M. (1984) *Engineering Methods of Systems' Reliability*. Moscow, Mir. 318 p. (in Russian).
6. Guk, Yu. B. (1988) *Analysis of Reliability of Electric Power Stations*. Leningrad, Energoatomizdat. 217 p. (in Russian).
7. Guk, Yu. B. (1990) *Theory of Reliability in Power Engineering*. Leningrad, Energoatomizdat. 208 p. (in Russian).
8. Druzhinin, G. V., Stepanov, S. V., Shikhmatova, V. L., & Iarygin, G. A. (1976) *Theory of Reliability of Radio-Electronic Systems on Examples and Problems*. Moscow, Energiy. 448 p. (in Russian).
9. Glazunov, L. P., Grabovetski, V. P., & Scherbakov, O. V. (1984) *Basis of Reliability Theory of Automatic Control Systems*. Leningrad, Energoatomizdat. 208 p. (in Russian).
10. Rudenko, Yu. N., & Ushakov, I. A. (1989) *Reliability of Power Engineering Systems*. Novosibirsk, Science. Siberian Department. 328 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 24.03.2014