

УДК 620.004.5

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

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

Белорусский национальный технический университет

E-mail: alenamyslo@tut.by

Проведен сравнительный анализ основных структурных схем резервирования устройств автоматического контроля и регулирования ответственных объектов электроснабжения, к которым предъявляются повышенные требования по надежности. Рассмотрены схемы пассивного дублирования, активного дублирования с устройством встроенного контроля, пассивного троирования, активного троирования с устройством встроенного контроля, комбинированного резервирования, мажоритарное резервирование по схемам «два из трех» и «три из пяти». По результатам произведенных расчетов проведено сравнение этих схем при идеальных устройствах встроенного контроля и идеальных мажоритарных элементах. Построены шкалы предпочтений систем по критериям максимумов среднего времени и средней вероятности безотказной работы. Шкалы предпочтений по критерию средней вероятности безотказной работы носят переменный характер в зависимости от интервалов, в которых находится параметр, представляющий собой произведение интенсивности отказов и времени. Последовательность предпочтений систем изменяется при достижении отказа каждой системы и в моменты пересечения кривых средних вероятностей безотказной работы систем. Анализ результатов расчетов показал преимущество систем троированного и комбинированного резервирования по надежности, что достигается большим увеличением затрат на создание этих систем. Показано, что при определенных условиях надежность системы пассивного троирования выше по сравнению с системой активного дублирования. Мажоритарные схемы позволяют определять не только полные, но и частичные (метрологические) отказы. Определено граничное значение ненадежности устройства встроенного контроля, позволяющее сделать обоснованный выбор между системами активного и пассивного резервирования.

Ключевые слова: производственные энергетические процессы, надежность систем, устройств автоматического контроля и управления объектами.

Ил. 10. Табл. 2. Библиогр.: 10 назв.

ANALYSIS OF RELIABILITY OF RESERVED AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF INDUSTRIAL POWER PROCESSES

ANISHCHENKO V. A., MYSLO E. L., IVANOVA A. N.

Belorussian National Technical University

This paper describes the comparative analysis of the main structural schemes for reserved automatic control and regulation devices of important objects of power supply with increased reliability requirements. There were analyzed schemes of passive and active doubling with

control device, passive and active tripling, combined redundancy and majority redundancy according to schemes: “two from three” and “three from five”. On the results of calculations fulfilled there was made comparison of these schemes for ideal devices of built-in control and ideal majority elements. Scales of preferences of systems according to criterion of average time maximum and average probability of no-failure operation were built. These scales have variable character, depending on intervals in which there is a parameter obtained by multiplication of failure rate and time. The sequence of systems’ preferences is changing and is depending on each system failures and in moments of curves crossing of average probability of no-failure operation of systems. Analysis of calculation results showed the advantages of tripling systems and combined redundancy in reliability and this is achieved by a great amount of expenses for these systems creation. Under definite conditions the reliability of system of passive tripling is higher compared to system of active doubling. The majority schemes allow determining not only the full but also single (metrological) failures. Boundary value of unreliability of built-in control device is determined, and this allows making a perfect choice between systems of active and passive redundancy.

Keywords: industrial power processes, reliability of system, automatic control equipment.

Fig. 10. Tab. 2. Ref.: 10 titles.

Введение. Высокая надежность работы систем автоматического контроля и управления производственными энергетическими процессами может обеспечиваться путем их структурного (аппаратного) резервирования. На стадии проектирования производится априорный анализ, когда конструкторы рассматривают различные схемы резервирования. Такой анализ предполагает известные количественные характеристики надежности отдельных элементов систем, которые используются при расчетах и сравнении показателей надежности систем в целом. Целью исследования был сравнительный анализ основных структурных схем резервирования устройств автоматического контроля и управления ответственными объектами, сопоставление их (в ряде случаев противоречивых) показателей надежности и выработка рекомендаций по выбору той или иной системы резервирования. Ниже приводятся основные характеристики рассматриваемых систем в предположении экспоненциального распределения времени до появления первого отказа [1–9].

Пассивное дублирование (ПД). Один основной элемент резервируется одним идентичным (рис. 1). Схема функционирует, когда исправен хотя бы один из элементов. Оба элемента включаются одновременно, и режим их работы одинаков, т. е. имеет место нагруженный резерв.

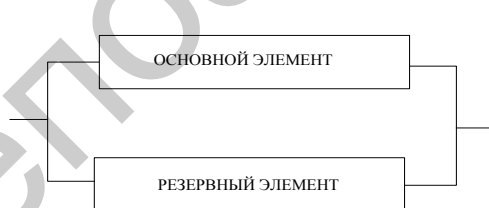


Рис. 1. Расчетно-логическая схема пассивного дублирования

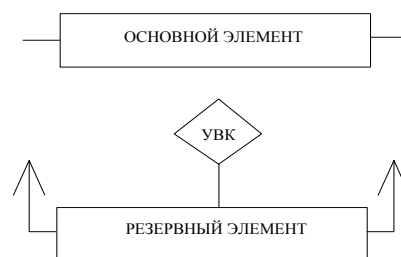


Рис. 2. Расчетно-логическая схема активного дублирования

Вероятность безотказной работы системы без учета восстановления при экспоненциальном распределении времени до отказа каждого элемента определяется формулой

$$P(\lambda t) = 2 \exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t), \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов одного элемента; t – время.

Среднее время безотказной работы

$$T = \int_0^{\infty} P(\lambda t) dt = \frac{3}{2\lambda}. \quad (2)$$

Активное дублирование (АД). В этой системе резервный элемент находится в ненагруженном состоянии и включается в работу после анализа основного. Перестройка схемы производится устройством встроенного контроля (УВК), которое определяет отказ основного элемента (рис. 2).

Вероятность безотказной работы системы

$$P(\lambda t) = \exp(-\lambda t) [1 + p_k \lambda t], \quad (3)$$

где p_k – вероятность безотказной работы УВК, не зависящая от времени.

Среднее время безотказной работы

$$T = \frac{1}{\lambda} (1 + p_k). \quad (4)$$

Пассивное троирование (ПТ). Соответствующая схема представлена на рис. 3. Один основной элемент резервируется двумя идентичными. Все элементы включаются одновременно, и режим их работы одинаков (нагруженный резерв).

Вероятность безотказной работы системы

$$P(\lambda t) = 3 \exp(-\lambda t) - 3 \exp(-2\lambda t) + \exp(-3\lambda t). \quad (5)$$

Среднее время безотказной работы

$$T = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right). \quad (6)$$

Активное троирование (АТ). При отказе основного элемента на его место без перерыва УВК включает в работу один из резервных элементов (рис. 4). Отказ системы наступает при отказе обоих резервных элементов.

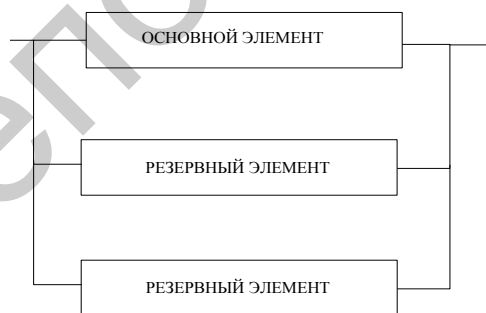


Рис. 3. Расчетно-логическая схема пассивного троирования

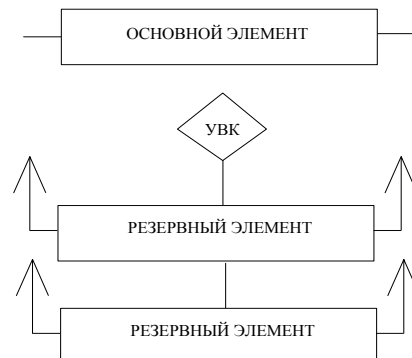


Рис. 4. Расчетно-логическая схема активного троирования

Вероятность безотказной работы системы

$$P(\lambda t) = \exp(-\lambda t) \left[1 + p_k \lambda t + \frac{1}{2} p_k^2 \lambda t^2 \right]. \quad (7)$$

Среднее время безотказной работы

$$T = \frac{1}{\lambda} (1 + p_k + p_k^2). \quad (8)$$

Комбинированное резервирование (КР). Эта система (рис. 5) сочетает преимущества нагруженного (непрерывность работы) и ненагруженного резервов (обеспечение большого выигрыша в надежности). В случае отказа одного из элементов дублированной группы его место замещает элемент, находящийся в ненагруженном резерве.

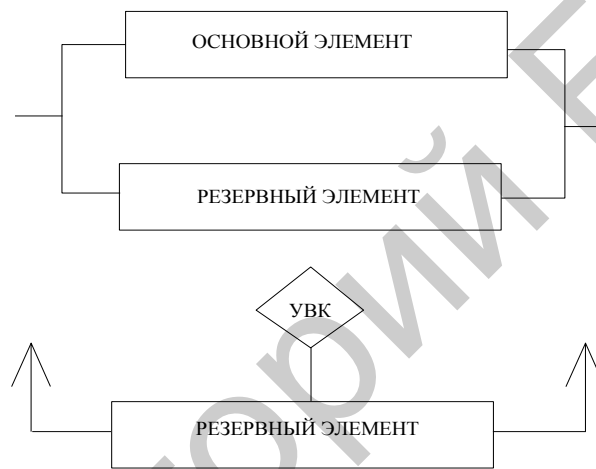


Рис. 5. Расчетно-логическая схема комбинированного резерва

Вероятность безотказной работы системы с идеальным УВК

$$P(\lambda t) = 4 \exp(-\lambda t) - [3 + 2\lambda t] \exp(-2\lambda t). \quad (9)$$

Среднее время безотказной работы с идеальным УВК

$$T = \frac{2}{\lambda}. \quad (10)$$

Мажоритарное резервирование по схеме «два из трех» (М «два из пяти»). Вместо одного элемента (канала) включаются три идентичных, выходы которых подаются на мажоритарный элемент (МЭ), представляющий собой элемент голосования (рис. 6).

Если все элементы исправны, то на вход МЭ поступают три одинаковых сигнала и такой же сигнал – во внешнюю цепь с выхода МЭ. Если один из трех элементов отказал, то на вход МЭ поступают два одинаковых типичных сигнала и один ложный. На выходе МЭ формируется сигнал, совпадающий с большинством сигналов на его входе. Таким образом, мажоритарный орган осуществляет операцию выбора по большинству.

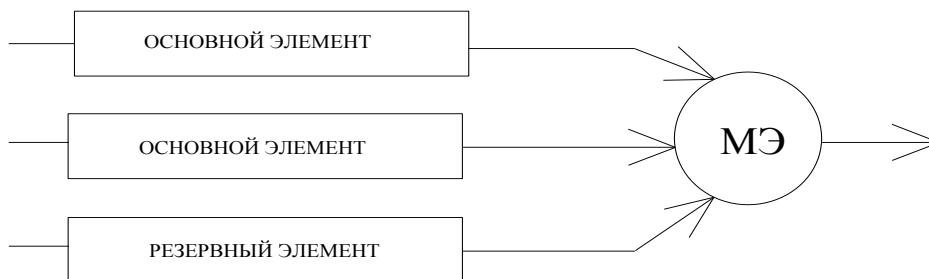


Рис. 6. Мажоритарное резервирование по схеме «два из трех»

Вероятность безотказной работы системы обусловлена безотказной работой всех трех элементов или любых двух из трех и мажоритарного элемента

$$P(\lambda t) = 3 \exp(-2\lambda t) - 2 \exp(-3\lambda t) \exp(-\lambda_{\text{МЭ}} t), \quad (11)$$

где $\lambda_{\text{МЭ}}$ – интенсивность отказов мажоритарного элемента.

Среднее время безотказной работы при идеальном МЭ ($\lambda_{\text{МЭ}}$)

$$T = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right). \quad (12)$$

Мажоритарное резервирование по схеме «три из пяти» (М «три из пяти»). В этой избирательной системе три идентичных элемента являются основными и два – резервными. Условие безотказной работы системы – это совпадение как минимум трех сигналов на входе МЭ.

Вероятность безотказной работы системы

$$P(\lambda t) = 10 \exp(-3\lambda t) - 15 \exp(-4\lambda t) + 6 \exp(-5\lambda t) \exp(-\lambda_{\text{МЭ}} t). \quad (13)$$

Среднее время безотказной работы при идеальном мажоритарном элементе

$$T = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \right). \quad (14)$$

Сравнение показателей надежности систем при идеальных устройствах встроенного контроля и мажоритарных элементах. По результатам расчетов по формулам (2), (4), (6), (8), (10), (12), (14) были построены шкалы предпочтений систем по критерию максимума среднего времени безотказной работы (табл. 1). При этом полагались абсолютно надежными УВК ($p_k = 1$) и МЭ ($\lambda_{\text{МЭ}}$).

Таблица 1

Шкала предпочтений систем по критерию максимума T

Система резервирования	АТ	АД	КР	ПТ	ПД	БР (без резервирования)	М «два из трех»	М «три из пяти»
Среднее время безотказной работы T	$\frac{3,000}{\Lambda}$	$\frac{2,000}{\Lambda}$	$\frac{2,000}{\Lambda}$	$\frac{1,833}{\Lambda}$	$\frac{1,500}{\Lambda}$	$\frac{1,000}{\Lambda}$	$\frac{0,833}{\Lambda}$	$\frac{0,783}{\Lambda}$

Согласно рекомендациям [2–4], сравнение вероятностей безотказной работы систем производили по их средним на интервале времени $(0, \lambda t_{\text{рес}})$ значениям

$$P_{\text{ср}}(0, \lambda t_{\text{рес}}) = \frac{1}{\lambda t_{\text{рес}}} \int_0^{\lambda t_{\text{рес}}} P(0, \lambda t_{\text{рес}}) d(\lambda t), \quad (15)$$

где $t_{\text{рес}}$ – ресурс работы системы; $P(0, t_{\text{рес}})$ – мгновенные (текущие) значения вероятностей, определяемые согласно (1), (3), (5), (7), (9), (11), (13); УВК и МЭ здесь рассматривались идеальными.

Зависимости средних вероятностей безотказной работы от параметра λt приведены на рис. 7. На их основе построена шкала предпочтений систем по критерию максимума средней вероятности безотказной работы, имеющей переменный характер в зависимости от интервалов, в которых находится параметр λt .

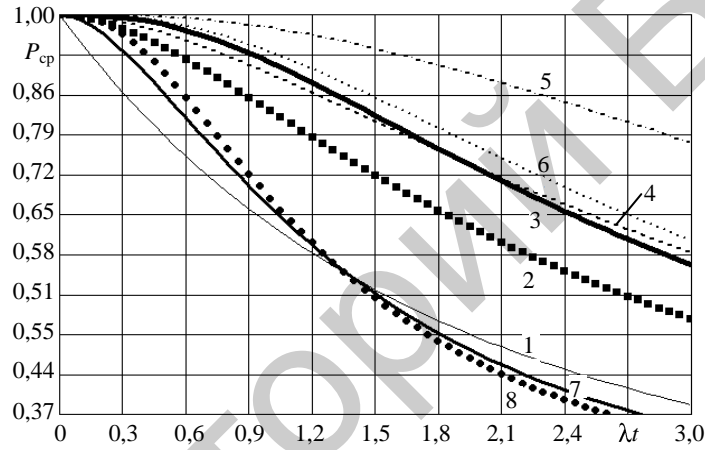


Рис. 7. Средняя вероятность безотказной работы систем:
1 – БР; 2 – ПД; 3 – ПТ; 4 – АД; 5 – АТ; 6 – КР; 7 – М «два из трех»; 8 – М «три из пяти»

Последовательность предпочтений систем (табл. 2) изменялась, во-первых, при достижении отказа каждой системы ($\lambda t = \lambda T$) и, во-вторых, в моменты пересечения кривых $P_{\text{ср}}(\lambda t)$ разных систем.

Таблица 2

Шкала предпочтений систем по критерию максимума средней вероятности безотказной работы

Интервал $(0, \lambda t)$	Шкала предпочтений
0–0,177	АТ, КР, ПТ, АД, М «три из пяти», ПД, М «два из трех», БР
0–0,783	АТ, КР, ПТ, АД, ПД, М «три из пяти», М «два из трех», БР
0–0,833	АТ, КР, ПТ, АД, ПД, М «два из трех», БР
0–1,000	АТ, КР, ПТ, АД, ПД, БР
0–1,500	АТ, КР, ПТ, АД, ПД
0–1,833	АТ, КР, ПТ, АД
0–2,000	АТ, КР, АД
0–3,000	АТ

Анализ приведенных результатов расчетов показал очевидное преимущество систем троированного и комбинированного резервирования по обоим критериям ($\max T$ и $\max P$). Однако это достигается большим увеличением затрат (стоимости или, например, массы или габаритов систем).

Получило подтверждение известное положение о том, что сравнение систем по разным критериям ($\max T$ и $\max P$) может дать в ряде случаев неоднозначный ответ на вопрос, какая из систем надежнее [3, 4]. Так, вероятность безотказной работы системы пассивного троирования выше по сравнению с системой активного дублирования при не слишком больших значениях параметра λt .

Особый интерес представляют избирательные мажоритарные системы «два из трех» и «три из пяти». Они явно уступают по обоим критериям ($\max T$ и $\max P$) другим резервированным системам и предпочтительнее нерезервированной системы лишь по критерию $\max P$ при относительно небольшом значении параметра λt . Однако если продолжить сравнение систем, то все они, кроме мажоритарных, работоспособны, если исправен хотя бы один (основной или резервный) элемент. При этом не учитывается, соответствует ли фактическое значение передаваемого сигнала (результат измерения или управляющей команды) заданной величине. Эти системы учитывают только полные отказы и не позволяют определить частичные (метеорологические) отказы, когда сигнал передается, но его количественная характеристика неудовлетворительна. Достоинство мажоритарного резервирования состоит в том, что оно свободно от этого недостатка. Голосование по большинству дает возможность контролировать идентичность фактического и заданного значений передаваемого сигнала. Мажоритарная логика не требует УВК, т. е. средств обнаружения отказов элементов и устройств для замещения неисправных элементов резервными.

Окончательный выбор системы резервирования можно произвести, решая задачу условной оптимизации с учетом как надежностных факторов, так и затрат на создание систем и их обслуживание [4].

Эффективность активного резервирования с ненадежными устройствами встроенного контроля. Системы пассивного и активного резервирования имеют одинаковую вероятность безотказной работы при идеальных, т. е. абсолютно надежных УВК, и нагруженных резервных элементах в течение всего времени работы систем. Вероятность и среднее время безотказной работы систем активного резервирования с идеальным УВК и резервными элементами в ненагруженном или не полностью нагруженном состоянии (облегченный резерв) больше по сравнению с системами пассивного резервирования, поскольку до момента включения резервных элементов их ресурс остается неизменным или расходуется меньше, чем в полностью нагруженном состоянии.

Ненадежность УВК снижает надежность активного резервирования. Анализ граничных значений вероятности безотказной работы УВК, определяющих условие выбора системы пассивного или активного дублирования, приведен в [10]. Аналогичные расчеты, выполненные по формулам (5), (7), (13) для систем пассивного и активного троирования, позволили сравнить средние вероятности безотказной работы этих систем и сопоставить их со средними вероятностями безотказной работы дублированных пассивных и активных систем при разных значениях p_k (рис. 8).

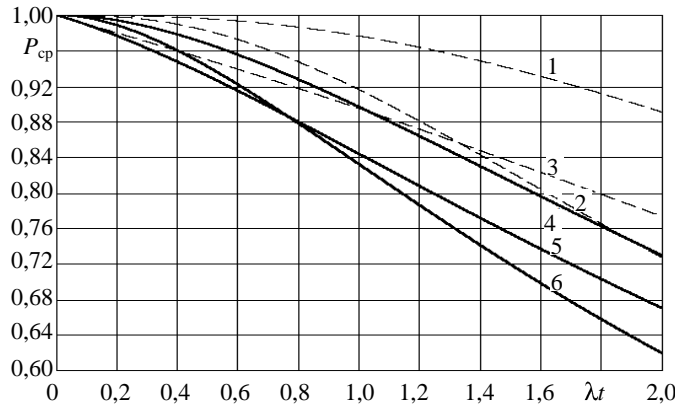


Рис. 8. Средняя вероятность безотказной работы систем активного и пассивного резервирования: 1 – АТ ($p_k = 1,0$); 2 – ПТ; 3 – АТ ($p_k = 0,8$); 4 – АД ($p_k = 1,0$); 5 – ПД; 6 – АД ($p_k = 0,8$)

Ненадежность УВК приводит к увеличению граничного значения параметра λt , при превышении которого средняя вероятность безотказной работы системы активного резервирования становится больше аналогичного показателя системы пассивного резервирования. Зависимости граничных значений вероятности безотказной работы УВК, при которых это имеет место, представлены на рис. 9.

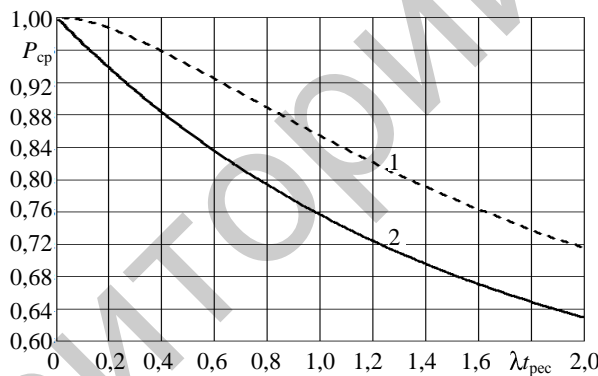


Рис. 9. Граничные значения вероятности безотказной работы УВК: 1 – троирование; 2 – дублирование

Влияние ненадежности УВК на среднее время безотказной работы систем активного резервирования показывают зависимости на рис. 10, рассчитанные по формулам (2), (4), (6), (8).

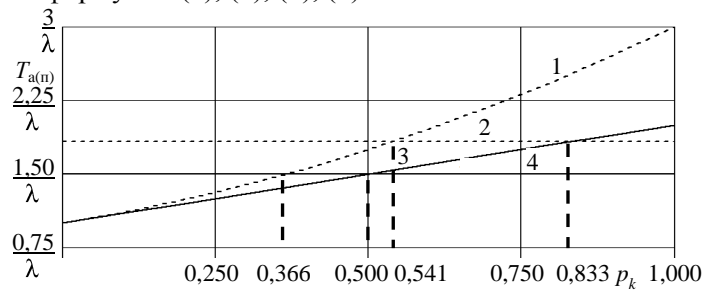


Рис. 10. Среднее время безотказной работы систем активного и пассивного резервирования: 1 – АТ; 2 – ПТ; 3 – АД; 4 – ПД

Активное дублирование надежнее пассивного дублирования (при $\lambda t > 0,500$) и пассивного троирования (при $\lambda t > 0,833$). Активное троирование надежнее пассивного дублирования (при $\lambda t > 0,366$) и пассивного троирования (при $\lambda t > 0,541$).

ВЫВОД

Построены шкалы предпочтений невосстанавливаемых резервированных систем автоматического контроля и регулирования производственными процессами в энергетике по критериям максимумов средней вероятности и среднего времени безотказной работы. С помощью этих шкал произведен сравнительный анализ показателей надежности резервированных систем. Показано влияние ненадежности устройств встроенного контроля на эффективность активных резервированных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Северин, Л. А. Обоснование критерия выбора схем резервирования систем управления / Л. А. Северин, В. А. Анищенко // Актуальные проблемы энергетики: материалы 62-й НТК 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 НТК студентов, магистрантов и аспирантов. – Минск: БНТУ, 2008. – С. 186–189.
3. Анищенко, 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. Анищенко, 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. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
6. Гук, Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 217 с.
7. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
8. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах / под ред. Г. В. Дружинина. – М.: Энергия, 1976. – 448 с.
9. Глазунов, Л. П. Основы теории надежности автоматических систем управления / Л. П. Глазунов, В. П. Грабовецкий, О. В. Щербаков. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
10. Анищенко, В. А. Надежность дублированных технических систем с устройствами встроенного контроля / В. А. Анищенко, Е. Л. Мысло, А. Н. Иванова // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2013. – № 5. – С. 5–10.

REFERENCES

1. Severin, L. A., & Anishchenko, V. A. (2006) Peculiarities of Criteria Choice of Schemes for Redundancy of Control Systems. *Aktual'nye Problemy Energetiki: Materialy 62-i NTK Studentov, Magistrantov i Aspirantov* [Actual Problems of Power Engineering: Materials of 62th Scientific and Technical Conference of Students, Masters' Students and Post-Graduate Students (PhD Students)]. Minsk, BNTU, 90–92 (in Russian).
2. Severin, L. A., & Anishchenko, V. A. (2008) Choice of Unrestorable Reserved Control Systems for Technological Processes. *Aktual'nye Problemy Energetiki: Materialy 63-i NTK Studentov, Magistrantov i Aspirantov* [Actual Problems of Power Engineering: Materials of 63rd Scientific and Technical Conference of Students, Masters' Students and Post-Graduate Students (PhD Students)], Minsk: BNTU, 186–189 (in Russian).

3. A n i s h c h e n k o, V. A., & Severin, L. A. (2008) Methods of Choice of Unrestorable (Unrepairable) Reserved 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. A n i s h c h e n k o, V. A., Ivanova, A. N., & Myslo, E. L. (2012) Choice of Unrestorable Reserved Control Systems for Power 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. D i l l o n, B., & Singh, Ch. (1984) *Engineering Methods of Providing Systems' Reliability*. Moscow, Mir. 318 p. (in Russian).

6. G u k, Yu. B. (1988) *Analysis of Reliability of Electric Power Plants*. Leningrad, Energoatomizdat. 217 p. (in Russian).

7. G u k, Yu. B. (1990) *Theory of Reliability in Power Engineering*. Leningrad, Energoatomizdat. 208 p. (in Russian).

8. D r u z h i n i n, G. V. (1976) *Theory of Reliability of Radioelectronic Systems in Examples and Problems*. Moscow, Energia. 448 p. (in Russian).

9. G l a s u n o v, L. P., Grabovetsky, V. P., & Shcherbakov, O. V. (1984) *Fundamentals of Reliability Theory of Automatic Control Systems*. Leningrad, Energoatomizdat. 208 p. (in Russian).

10. A n i s h c h e n k o, V. A., Myslo, E. L., & Ivanova, A. N. (2013) Reliability of Dual Engineering System with Built Control Equipment. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 5, 5–10 (in Russian).

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 07.04.2014

УДК 517.9+533.6

ПЛЯСКА ПРОВОДОВ ЛЭП – НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПО ЛЯПУНОВУ

**Докт. техн. наук, проф. ВАНЬКО В. И.,
канд. физ.-мат. наук, доц. МАРЧЕВСКИЙ И. К.**

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

E-mail: vvanko@mail.ru

Описано явление потери аэродинамического демпфирования, или аэродинамической неустойчивости профиля в потоке, наблюдаемое в экспериментах и инженерной практике. Применительно к промышленным высоковольтным линиям электропередачи данное явление обычно называют галопированием (пляской) фазных проводов. Показано, что его можно объяснить неустойчивостью по Ляпунову положений равновесия профилей (поперечных сечений) провода. В дополнение к известному условию неустойчивости Глауэрта – ден-Гартога получено удобное для практического применения условие неустойчивости, зависящее только от стационарных аэродинамических коэффициентов профиля – безразмерных коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы, а также от их производных по углу атаки.

Предложен эффективный численно-аналитический метод исследования устойчивости положений равновесия профиля в потоке, разработанный в последние годы на кафедре «Прикладная математика» МГТУ имени Н. Э. Баумана. Данный метод предполагает определение стационарных аэродинамических характеристик профиля путем численного моделирования обтекания профиля под различными углами атаки методом вихревых элементов и последующее применение аналитических условий устойчивости и неустойчивости по Ляпунову положений равновесия. Приведенные результаты решения тестовых задач по исследованию устойчивости ромбического и квадратного профи-