

10. В о р о п а й, Н. И. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / Н. И. Воропай, Н. А. Юсифбейли // Проблемы надежности систем энергетики в рыночных условиях. – Баку: АЗНИИПИИЭ, 2013. – Вып. 63. – 566 с.

REFERENCES

1. D a v y d o v, A. V. Framework of the Control Theory. Issue-Related Lectures. Elaterinburg: Ural State Mining University. Available at: <http://www.prodav.narod.ru/otu/index.html> (Accessed 7 February 2014) (in Russian).
2. L a m a k i n, G. N. (2006) *Management Principles in Electric Power Industry*. Tver: TSTU [Tver State Technical University]. 208 p. (in Russian).
3. P e t r u s h a, Yu. S. (2013) Automatic Control System of Electric-Power Generation and Marketing under the Conditions of Industry Liberalization. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 2, 37–42 (in Russian).
4. G i t e l ' m a n, L. D., & Ratnikov, B. E. (2006) *Electric-Power Business*. Moscow, Delo Publ. 600 p. (in Russian).
5. V o r o p a i, N. I., Kovalev, G. F., & Kucherov, Iu. N. (2013). *The Concept of Reliability Assurance in Electric-Power Industry*. Moscow, Energia Publ. 212 p. (in Russian).
6. P e t r u s h a, Yu. S. (2014) The UES Functioning and Development Governance. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy 12 Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 12th International Science and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk: BNTU. 62–63 (in Russian).
7. T h e S t a t e Program of Belorussian Energy System Development for the Period to 2016: Approved by the RB Council of Ministers Decree 29.02.2012 No 194. *Natsional'nyi Reestr Pravovykh Aktov Respubliki Belarus'* [The Republic of Belarus National Registry of Legislative Acts], March 13th 2012, No 5/35381 (in Russian).
8. T h e A g r e e m e n t on Forming the Common Electric-Power Market of the CIS Member States. The Agreement of the RB Government of May 25th 2007. *The National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <http://arc.pravoby.info/dok2007/part3/akt03167.htm> (Accessed 17.11.2014) (in Russian).
9. T h e A g r e e m e n t on Access Authorization to Natural Monopolies Services in the Sphere of Electrical Energy Industry Including Principles of Price Formation and Tariff Policy. *Natsional'nyi Reestr Pravovykh Aktov Respubliki Belarus'* [The Republic of Belarus National Registry of Legislative Acts], January 12th 2011, No 3/2646 (in Russian).
10. V o r o p a y, N. I., & Yusifbeyli, N. A. (2013) *Reliability Study Methodological Issues of Large Systems in Energetics. Pub. 63: Reliability Challenges of Energy Systems under Market Conditions*. Baku, Azerbaijan Scientific Research and Design Institute of Energy. 566 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 15.12.2014

УДК 621.321

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД АТОМНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Канд. техн. наук, доц. СТАРЖИНСКИЙ А. Л.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: alexeystmink@gmail.com

Определена надежность схемы электроснабжения собственных нужд атомной электростанции. Рассмотрено поведение системы при нормальной работе блока и проведении текущих и капитальных ремонтов в сочетании с исходными событиями. Исходны-

ми событиями для реакторов считаются: полное обесточивание, т. е. потеря внешнего электроснабжения (нормального и резервного); аварийное отключение одного из работающих турбогенераторов; мгновенный сброс номинальной нагрузки до уровня собственных нужд с посадкой стопорного клапана одного турбогенератора. Сочетание любого исходного события с ремонтным режимом в случае возникновения отказа одного из элементов системы не должно приводить к обесточиванию более одной системы надежного питания. Это требование удовлетворяется с помощью независимости (электрической и конструктивной) систем надежного питания и автономности работы аварийных источников (дизель-генераторов и аккумуляторных батарей).

Показателями надежности системы электроснабжения собственных нужд атомной станции являются условные вероятности одновременного погашения одной, двух и трех секций надежного питания при условии возникновения исходного события и погашения одной, двух и трех секций надежного питания в режиме нормальной эксплуатации. Кроме того, это и частоты погашения одной и одновременно двух, трех и четырех секций нормальной эксплуатации в режиме нормальной работы блока. Установлено, что погашение одной секции шин нормальной эксплуатации и одной секции надежного питания системы собственных нужд, не приводящее к полному погашению собственных нужд станции, может произойти один раз в три года. Вероятность одновременного погашения двух и трех секций нормальной эксплуатации и двух секций надежного питания в течение срока службы станции маловероятна.

Ключевые слова: система электроснабжения, собственные нужды, электростанция, надежность.

Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.

ASCERTAINMENT OF ELECTRIC-SUPPLY SCHEMES RELIABILITY FOR THE ATOMIC POWER PLANT AUXILIARIES

STARZHINSKIJ A. L.

Belorussian National Technical University

The paper completes ascertainment of electrical-supply scheme reliability for the auxiliaries of a nuclear power plant. Thereat the author considers the system behavior during the block normal operation, carrying out current maintenance, and capital repairs in combination with initiating events. The initiating events for reactors include complete blackout, i.e. the loss of outside power supply (normal and reserve); emergency switching one of the working turbo-generators; momentary dumping the normal rating to the level of auxiliaries with seating the cutout valve of one turbo-generator. The combination of any initiating event with the repairing mode in case of one of the system elements failure should not lead to blackout occurrence of more than one system of the reliable power supply. This requirement rests content with the help of the reliable power supply system self-dependence (electrical and functional) and the emergency power-supply operational autonomy (diesel generator and accumulator batteries).

The reliability indicators of the power supply system for the nuclear power plant auxiliaries are the conditional probabilities of conjoined blackout of one, two, and three sections of the reliable power supply conditional upon an initiating event emerging and the blackout of one, two, and three reliable power-supply sections under the normal operational mode. Furthermore, they also are the blackout periodicity of one and conjointly two, three, and four sections of normal operation under the block normal operational mode. It is established that the blackout of one bus section of normal operation and one section of reliable power-supply system of the auxiliaries that does not lead to complete blackout of the plant auxiliaries may occur once in three years. The probability of simultaneous power failure of two or three normal-operation sections and of two reliable power-supply sections during the power plant service life is unlikely.

Keywords: electrical supply system, auxiliaries, power plant, reliability.

Fig. 1. Tab. 3. Ref: 10 titles.

К системе электроснабжения собственных нужд (СН) атомной электрической станции (АЭС) предъявляются следующие требования: безотказность (бесперебойность), ремонтпригодность, живучесть, безопасность, устойчивоспособность, режимная управляемость. Требования безотказности и ремонтпригодности относятся к сети рабочего и резервного питания СН АЭС, живучести и безопасности – к сети надежного питания, устойчивоспособности и режимной управляемости – к качеству переходных процессов и действиям средств автоматики при изменении режимов работы систем электроснабжения СН [1, с. 242].

Перечисленные требования к системе электроснабжения СН в значительной степени определяют надежность и самой АЭС, включая ее безопасность как в нормальных, так и аварийных условиях.

Основное отличие электрической части АЭС от электрической части тепловой электростанции заключается в такой схеме питания собственных нужд, которая способна обеспечить гораздо более высокую надежность электроснабжения ответственных механизмов СН, чем на обычных электростанциях [2, с. 197].

Техническое обоснование схемных решений и мероприятий, направленных на повышение надежности системы электроснабжения СН, должно предусматривать рассмотрение поведения системы при нормальной работе блока и проведении текущих и капитальных ремонтов в сочетании с исходными событиями. Исходными событиями для реакторов типа ВВЭР считаются: полное обесточивание, т. е. потеря внешнего электроснабжения (нормального и резервного); аварийное отключение одного из работающих турбогенераторов; мгновенный сброс номинальной нагрузки до уровня собственных нужд с посадкой стопорного клапана одного турбогенератора.

Сочетание любого исходного события с ремонтным режимом в случае возникновения отказа одного из элементов системы не должно приводить к обесточиванию более одной системы надежного питания. Это требование удовлетворяется с помощью независимости (электрической и конструктивной) систем надежного питания и автономности работы аварийных источников (дизель-генераторов и аккумуляторных батарей).

Показателями надежности системы электроснабжения СН АЭС являются условные вероятности одновременного погашения одной, двух и трех секций надежного питания при условии возникновения исходного события и погашения одной, двух и трех секций надежного питания в режиме нормальной эксплуатации. Кроме того, это и частоты погашения одной и одновременного трех и четырех секций нормальной эксплуатации в режиме нормальной работы блока. При этом считается возможным проведение ремонтных работ на оборудовании открытого распределительного устройства высшего напряжения [1, с. 243].

Программа REISS, разработанная в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете на кафедре «Электрические станции», позволяет проводить анализ структурной надежности систем электроснабжения потребителей СН, включающих в себя источники рабочего, резервного и аварийного электроснабжения, передающие элементы, коммутационные аппараты и отдельных потребителей. Анализируемая схема должна иметь радиальную структуру построения, при которой в любом установившемся

режиме ее функционирования передача мощности к любому потребителю осуществляется лишь по единственно возможной цепи. Программа предназначена для вычисления частоты и длительности перерывов электроснабжения одновременно произвольного количества входящих в систему электроснабжения потребителей, а также коэффициента неготовности данных потребителей в отношении такого события [3, с. 72].

Реализованная в программе модель анализа структурной надежности позволяет вычислять частоты λ и длительности T погашений потребителей в нормальном режиме и в режимах аварийного простоя оборудования систем резервного и рабочего электроснабжения с учетом повреждений оборудования, возможности отказов в срабатывании устройств релейной защиты (РЗ) и коммутационной аппаратуры при отключении коротких замыканий, а также отказов в переключении на резервное электроснабжение из-за отказов в срабатывании автоматики, автоматического ввода резерва (АВР) и коммутационных аппаратов (КА) вводов рабочего и резервного питания [3, с. 73].

Значения λ и T в общем виде определяются по выражениям [3, с. 73]:

$$\lambda = \sum_{k=1} \lambda(k); \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{\lambda} \sum_k T(k)\lambda(k), \quad (2)$$

где $\lambda(k)$, $T(k)$ – частота и длительность смоделированных аварий k -го вида, приводящих к расчетному погашению,

$$\lambda(k) = q(k, j)\lambda(k, m) \prod_s Q(k, s); \quad (3)$$

$$T(k) = q(k, j)\lambda(k, m) \min \left\{ \frac{t(k, j)}{2}; t(k, m); t_{\text{оп}} \right\} \prod_s Q(k, s); \quad (4)$$

$q(k, j)$ – относительная длительность ремонтного простоя j -го элемента, о. е.; $\lambda(k, m)$ – частота повреждения m -го элемента схемы, 1/год; $t(k, m)$, $t(k, j)$ – длительность послеаварийного восстановления m -го и j -го элементов схемы, ч; $t_{\text{оп}}$ – время оперативных переключений, ч; $Q(k, s)$ – вероятность отказа в срабатывании s -го устройства РЗ, КА или АВР.

Коэффициент неготовности потребителей k_n вычисляется по формуле [2, с. 73]

$$k_n = \frac{T\lambda}{8760}. \quad (5)$$

Подготовка исходных данных сводится к нумерации элементов схемы в определенной последовательности. Затем составляется матрица связности [В]. Здесь для каждого коммутационного аппарата в порядке следования их номеров записываются номера примыкающих к ним узлов (источников питания, трансформаторов, секций шин, линий и отдельных потребителей).

Расчет надежности системы электроснабжения СН АЭС (рис. 1) [4, с. 37] выполним с помощью программы REISS. Алгоритм программы построен на основе метода дерева отказов.

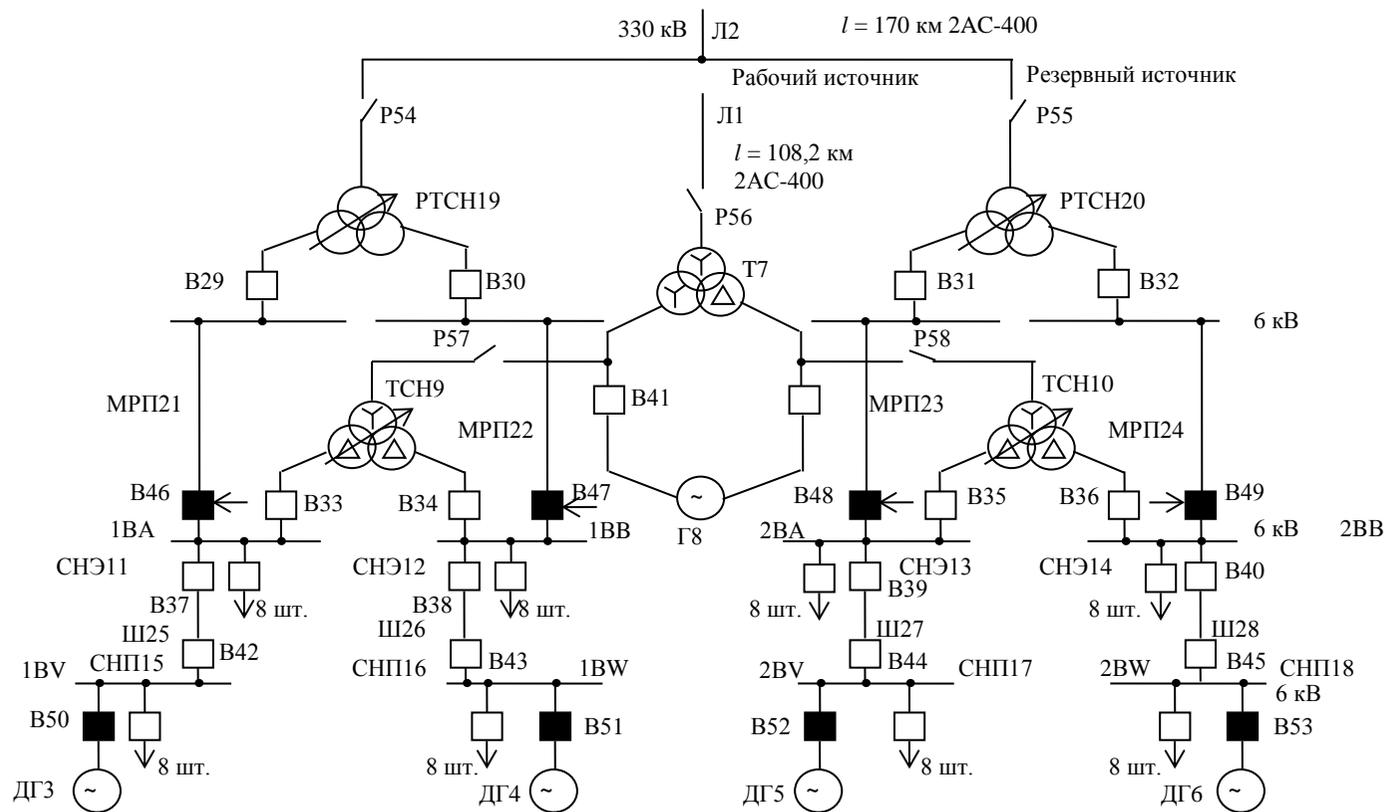


Рис. 1. Схема собственных нужд АЭС с реакторами ВВЭР-1200: Л – линия; ТЧН – трансформатор собственных нужд; РТЧН – резервный трансформатор собственных нужд; МРП – магистраль резервного питания; СНЭ – секция нормальной эксплуатации; СНП – секция надежного питания; ДГ – дизель-генератор; В – выключатель; Р – разъединитель; Г – генератор; Т – трансформатор; Ш – шины

Данные по надежности элементов СН электростанции приведены в табл. 1 [5, с. 270; 6, с. 67; 7, с. 105].

Таблица 1

Показатели надежности элементов собственных нужд электростанции

Элемент	Частота отказа λ , 1/год	Время послеаварийного восстановления $T_{в}$, ч	Частота планового ремонта $\lambda_{рем}$, 1/год	Длительность планового ремонта $T_{рем}$, ч
Блочный турбогенератор ТВВ-1200	1,0000	200	1,000	1080
Трансформатор 330 кВ мощностью более 80 МВА	0,0410	74	1,000	30
Сборные шины 6 кВ (на одно присоединение)	0,0300	5	0,166	5
Линия электропередачи 330 кВ на 1 км	0,0025	13,6	0,350	20
Дизель-генератор 6 кВ	0,0200	8,8	–	–
Рабочий трансформатор СН	0,0170	87	0,750	26
Резервный трансформатор СН	0,0410	74	1,000	30
Вакуумный выключатель 6 кВ	0,0040	8	0,200	8
Генераторный выключатель 20 кВ	0,0090	10	0,500	10

Результаты расчета надежности схемы СН АЭС представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Результаты расчета надежности электроснабжения собственных нужд АЭС (погашение секций нормальной эксплуатации)

Погашение секций нормальной эксплуатации	Суммарная частота события $\lambda_{сум}$, 1/год	Средняя продолжительность отключения T , ч	Коэффициент неготовности, о. е.
Одна секция шин (номера элементов 11)	0,3457	4,860	$0,1918 \cdot 10^{-3}$
Две секции шин (номера элементов 11, 12)	$0,3234 \cdot 10^{-2}$	7,155	$0,2642 \cdot 10^{-5}$
Три секции шин (номера элементов 11, 12, 13)	$0,1882 \cdot 10^{-2}$	4,356	$0,9357 \cdot 10^{-6}$
Четыре секции шин (номера элементов 11, 12, 13, 14)	$0,1921 \cdot 10^{-2}$	4,278	$0,9379 \cdot 10^{-6}$

Таблица 3

Результаты расчета надежности электроснабжения собственных нужд АЭС (погашение секций надежного питания)

Погашение секций надежного питания	Суммарная частота события $\lambda_{сум}$, 1/год	Средняя продолжительность отключения T , ч	Коэффициент неготовности, о. е.
Одна секция шин (номера элементов 15)	0,3082	4,881	$0,1717 \cdot 10^{-03}$
Две секции шин (номера элементов 15, 16)	$0,3200 \cdot 10^{-6}$	0,500	$0,1826 \cdot 10^{-10}$
Три секции шин (номера элементов 15, 16, 17)	$0,1554 \cdot 10^{-08}$	0,500	$0,8870 \cdot 10^{-13}$
Четыре секции шин (номера элементов 15, 16, 17, 18)	$0,2182 \cdot 10^{-10}$	0,500	$0,1245 \cdot 10^{-14}$

Как видно из табл. 2, погашение секции шин нормальной эксплуатации 1ВА (элемент 11) вероятно приблизительно один раз в три года.

При обесточивании секции 1ВА отключаются два выключателя, связывающие ее с секцией 1ВУ, и запускается дизель-генератор. Погашение секции 1ВУ на время, большее, чем время пуска и включения дизель-генератора, может произойти при совпадении событий отказа в отключении двух выключателей или при незапуске дизель-генератора при отказе его выключателя при включении на секции 1ВУ [8, с. 104; 9, с. 97; 10, с. 147].

Погашения двух секций шин нормальной эксплуатации 1ВА и 1ВВ на протяжении срока службы оборудования АЭС маловероятны и могут не приниматься во внимание.

Как видно из табл. 3, погашение секции шин надежного питания 1ВУ (элемент 15) также вероятно приблизительно один раз в три года. Погашение двух секций шин надежного питания 1ВУ и 1ВW маловероятно и также может не приниматься во внимание.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен расчет показателей надежности схемы электроснабжения собственных нужд атомной электростанции.

2. Установлено, что погашение одной секции шин нормальной эксплуатации и одной секции надежного питания системы собственных нужд, не приводящее к полному погашению собственных нужд станции, может произойти один раз в три года. Вероятность одновременного погашения двух и трех секций нормальной эксплуатации и двух секций надежного питания в течение срока службы станции маловероятна. Это указывает на высокую надежность рассмотренной схемы электроснабжения собственных нужд атомной электростанции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г у к, Ю. Б. Устройство, проектирование и эксплуатация схем электроснабжения собственных нужд АЭС / Ю. Б. Гук, В. М. Кобжув, А. К. Черновец. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 296 с.
2. Э л е к т р и ч е с к а я часть электростанций: учеб. для вузов / под ред. С. В. Усова. – 2-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 616 с.
3. Ч е р н о в е ц, А. К. Элементы САПР электрической части АЭС на персональных компьютерах / А. К. Черновец. – СПб.: Санкт-Петербург. гос. ун-т, 1992. – 89 с.
4. Ф е л ь д м а н, М. Л. Особенности электрической части атомных электростанций / М. Л. Фельдман, А. К. Черновец. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 172 с.
5. Э л е к т р о т е х н и ч е с к и й справочник: в 4 т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – 9-е изд. – М.: МЭИ, 2003. – Т. 3: Производство, передача и распределение электрической энергии. – 2004. – 964 с.
6. К о р о т к е в и ч, М. А. Анализ структурной надежности схем выдачи мощности от атомных электростанций / М. А. Короткевич // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Вып. 64: Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – С. 67–71.
7. В а с и л ь е в, А. П. Надежность электроэнергетических установок и систем: теория и практика / А. П. Васильев, Ю. Б. Гук, В. В. Карпов. – СПб.: ГУ «Ленгосэнергонадзор», 2000. – 413 с.
8. Г у к, Ю. Б. Теория надежности: учеб. пособие / Ю. Б. Гук, В. В. Карпов, А. А. Лапидус. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 171 с.

9. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике: учеб. пособие / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 208 с.

10. Гук, Ю. Б. Расчет надежности схем электроснабжения / Ю. Б. Гук, М. М. Синенко, В. А. Тремясов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 216 с.

REFERENCES

1. G u k, Yu. B., Kobzhuv, V. M., & Chernovets, A. K. (1991) *Design, Projection, and Operation of Electric Power Supply Schemes of the APP Auxiliaries*. Moscow, Energoatomizdat. 296 p. (in Russian).

2. U s o v, S. V., Mikhalev, B. N., Chernovets, A. K., Kizevetter, E. N., & Kantan, V. V. (1987) *Electrical Annex of the Electric Power Plants*. 2nd ed. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Department. 616 p. (in Russian).

3. C h e r n o v e t s, A. K. (1992) *CAD-Elements of the APP-Electrical Annex on the Personal Computers*. St. Petersburg: St. Petersburg State University. 89 p. (in Russian).

4. F e l'd m a n, M. L., & Chernovets, A. K. (1983) *Electrical Annex Distinctions of the Nuclear Power Plants*. Leningrad, Energoatomizdat. 172 p. (in Russian).

5. G e r a s i m o v, V. G., D'iakov, A. F., Il'inskiy, N. F., Labuntsov, V. A., Morozkin, V. P., Orlov, I. N., & Stroev, V. A. (2003) *Electrotechnical Book of Reference. Vol. 3: Generation, Transition, and Distribution of Electric Energy*. 9th ed. Moscow: MPEI [Moscow Power Engineering Institute]. 964 p. (in Russian).

6. K o r o t k e v i c h, M. A. (2014) Analysis of Structural Reliability of the Schemes of Power Output from Nuclear Power Stations. *Methodical Issues of Reliability Research of Large Systems of Energetics. Pub. 64: The Reliability of Energy Systems: Achievements, Problems and Prospects*. Irkutsk: ISEM SB RAS [Melentiev Energy Systems Institute Siberian branch of the Russian Academy of Sciences], 67–71 (in Russian).

7. V a s i l y e v, A. P., Guk, Yu. B., & Karpov, V. V. (2000) *Reliability of the Electric Installations and Systems: Theory and Practice*. St. Petersburg: State Institution Lengosenergonadzor. 413 p. (in Russian).

8. G u k, Yu. B., Karpov, V. V., & Lapidus, A. A. (2009) *Reliability Theory*. St. Petersburg: Polytechnic University Press. 171 p. (in Russian).

9. G u k, Yu. B. (1990) *Reliability Theory in Electrical Energy Industry*. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad department. 208 p. (in Russian).

10. G u k, Yu. B., Sinenko, M. M., & Tремясов, V. A. (1990) *Reliability Calculation of the Power-Supply Circuitry*. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Department. 216 p. (in Russian).

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 04.03.2015

УДК 621.311.1

О КОМПЛЕКСНОЙ ЗАПИСИ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Инж. БАРО БАНДИА

Белорусский национальный технический университет

E-mail: elsyst@tyt.by

Предложены математически корректные обозначения координатных осей на комплексной плоскости для теоретических основ электротехники. Подобное предложение было сделано и относительно обозначений комплексов различных электрических величин (ЭДС, напряжений, токов, мощностей, сопротивлений и проводимостей). Показана важность соблюдения преемственности и единообразия в обозначениях. Исследуются различные формы записи комплексной мощности. Из известных форм записи обосо-

* Печатается в порядке обсуждения.