

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-191-197

УДК 621.315

Анализ структурной надежности главных схем электрических соединений атомных электростанций

М. А. Короткевич¹⁾, А. Л. Старжинский¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Определена надежность главной схемы электрических соединений атомной электрической станции, на которой установлено два блока мощностью 1200 МВт каждый. Надежность, экономичность, маневренные свойства атомной электрической станции во многом определяются ее главной схемой, поэтому выбор схемы при проектировании и ее состояние в процессе эксплуатации – важнейшие задачи. Главные схемы электрических соединений атомной электрической станции выбираются на основании схемы сетей энергосистемы и того участка, к которому присоединяется данная электростанция. Схема присоединения атомной электрической станции к энергосистеме в нормальных исходных режимах на всех стадиях сооружения такой станции должна обеспечивать выдачу полной введенной мощности атомной электростанции и сохранение устойчивости ее работы в энергосистеме без воздействия противоаварийной системной автоматики при отключении любой отходящей линии электропередачи. При выборе главной схемы учитываются: единичная мощность устанавливаемых агрегатов и их число; очередность развития станции и энергосистемы; напряжения, на которых выдается электроэнергия станции; токи короткого замыкания для распределительного устройства повышенного напряжения и необходимость их ограничения схемным путем; наибольшая мощность, которая может быть потеряна при повреждении любого выключателя. Модель надежности главной схемы электрических соединений призвана выявить все виды аварий, возможных при совпадении отказов элементов с ремонтными и эксплуатационными режимами, отличающимися составом и повреждаемостью оборудования, а также при развитии аварий из-за отказов срабатывания аппаратов и устройств релейной защиты и автоматики.

Ключевые слова: главная схема, электрические соединения, надежность, атомная электрическая станция

Для цитирования: Короткевич, М. А. Анализ структурной надежности главных схем электрических соединений атомных электростанций / М. А. Короткевич, А. Л. Старжинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 3. С. 191–197. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-191-197

The Analysis of Structural Reliability of the Main Electric Connection Circuits of Nuclear Power Plants

М. А. Korotkevich¹⁾, А. L. Starzhinskij¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The reliability of the main circuit of electrical connections at a nuclear electric power plant that has two units with a capacity of 1,200 MW each has been determined. Reliability,

Адрес для переписки

Короткевич Михаил Андреевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

Address for correspondence

Korotkevich Mikhail A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

economical, maneuverable properties of the atomic power plant under study are largely determined by its main circuit, so the choice of the circuit for the design and its status in the process of operation occur to be critical objectives. Main electrical connection circuits in nuclear electric power plants are selected on the basis of the schematic networks of the energy system and the land attached to the plant. The circuit of the connection of a nuclear power plant to the grid in the original normal operating modes at all stages of the construction of such a plant should provide the outcome of the full added capacity of a nuclear power plant and the preservation of its stability in the power system without the influence of the emergency system automatics when any outgoing transmission line is disabled. When selecting the main circuit the individual capacity of the installed units and their number are taken into account as well as the order of development of the plant and power supply system; the voltage on which the power of a plant is delivered; a short-circuit current for switchgear high voltage and the need for their limitation by circuit means; the most power that can be lost when damage to any switch. A model of reliability of the main circuit of electrical connections is designed to detect all types of accidents that are possible at the coincidence of failures of elements with the repair and operational modes that differs in composition and damageability of the equipment, as well as under conditions of the development of accidents due to failure of operation of devices of relay protection and automation.

Keywords: main circuit, electrical connections, reliability, nuclear power plant

For citation: Korotkevich M. A., Starzhinskij A. L. (2017) The Analysis of Structural Reliability of the Main Electric Connection Circuits of Nuclear Power Plants. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 191–197. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-191-197 (in Russian)

В Республике Беларусь идет строительство атомной электростанции (АЭС), на которой будут установлены два блока мощностью 1200 МВт каждый. При проектировании схемы выдачи мощности от атомной электростанции и выборе номинального напряжения отходящих линий принималось во внимание имеющееся напряжение 330 кВ в прилегающих сетях энергосистемы.

Схемы электрических соединений АЭС строятся по блочному принципу. Между генератором и повышающим трансформатором устанавливается выключатель. Мощность блочных повышающих трансформаторов выбирается исходя из мощности присоединенных к ним генераторов блока. Параллельная работа блоков осуществляется на повышенном напряжении.

К схемам распределительных устройств (РУ) 35–750 кВ электростанций предъявляются следующие требования по надежности электроснабжения:

- повреждение или отказ любого из выключателей, а также повреждение на развилке шинных разъединителей не должны, как правило, приводить к отключению более одного энергоблока и одной или нескольких линий (при обеспечении устойчивости параллельной работы станции с энергосистемой);
- отказ выключателя в отключении другого поврежденного выключателя данного распределительного устройства, а также совпадения отказа или повреждения одного из выключателей с ремонтом другого не должны приводить к отключению более двух энергоблоков и линий (при обеспечении устойчивости параллельной работы станции с энергосистемой);

- отключение линий электропередачи, как правило, производится не более чем двумя выключателями, повышающих трансформаторов, трансформаторов связи и трансформаторов собственных нужд – не более чем двумя выключателями распределительного устройства каждого повышенного напряжения;

- должна быть обеспечена возможность ремонта выключателей напряжением 330 кВ без отключения соответствующих присоединений;

- при питании от данного распределительного устройства двух резервных трансформаторов собственных нужд должна быть исключена возможность отключения обоих трансформаторов [1, с. 114].

Основное отличие электрической части атомных электростанций от электрической части тепловых электростанций (ТЭС) на органическом топливе заключается в таком построении главной схемы электрических соединений, которое обеспечивает гораздо более высокую надежность связи с энергосистемой [2, с. 197; 3, с. 3; 4, с. 122].

Главная схема электрических соединений АЭС, где генераторы и повышающие трансформаторы соединены по схеме укрупненного блока, а распределительное устройство выполнено по полуторной схеме, показана на рис. 1.

Расчет надежности главных схем электрических соединений электростанций выполним с помощью программы TOPAS. Пакет прикладных программ TOPAS, разработанный на кафедре «Электрические станции» Санкт-Петербургского политехнического университета (руководитель разработки докт. техн. наук, проф. Ю. Б. Гук), позволяет проводить анализ надежности главных схем электрических соединений, включающих в себя РУ любого класса напряжения, генераторные присоединения, высоковольтные линии электропередачи (ВЛ), присоединения резервных трансформаторов собственных нужд (РТСН) и трансформаторы связи между РУ.

Вычисление логических показателей надежности главной схемы осуществляется на основе определения количества комбинаций событий (конъюнкций) $C(k)$, приводящих к отказу ее функционирования k -го вида [5, с. 59; 6, с. 109; 7, с. 89]

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

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

Вычисление частот отказов функционирования k -го вида $\lambda(k)$ и длительности аварийного восстановления $T(k)$ в общем случае осуществляется по выражениям [5, с. 59; 8, с. 120]:

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

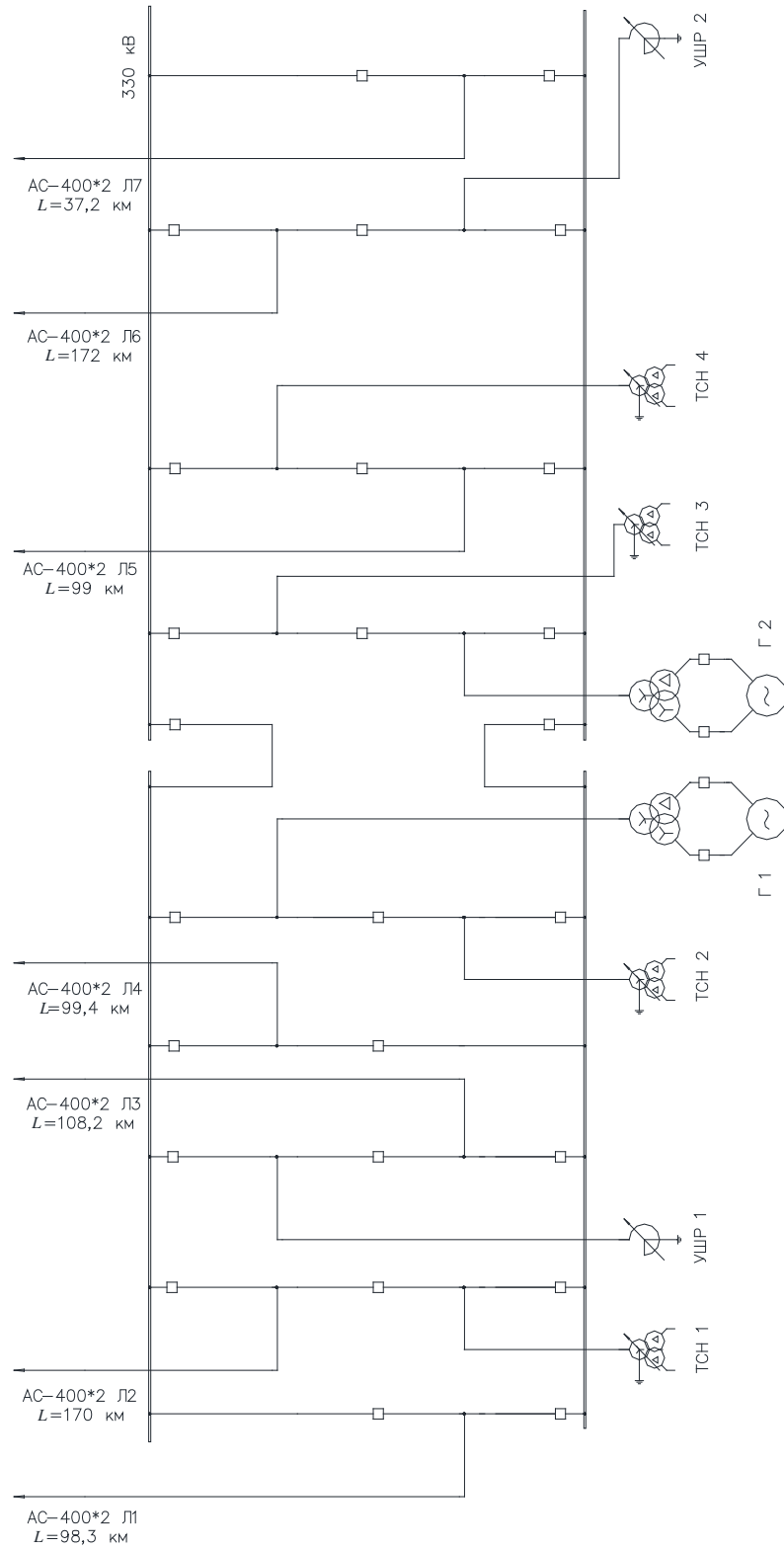


Рис. 1. Главная схема электрических соединений атомной электростанции: Л – воздушная линия электропередачи; ТСН – трансформатор собственных нужд; Г – генератор; УШР – управляемый шунтирующий реактор
 Fig. 1. The main wiring circuit of a nuclear power plant: Л – overhead transmission line; ТСН – auxiliary transformer; Г – generator; УШР – controlled shunt reactor

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

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

Коэффициент неготовности потребителей K_n вычисляется по выражению [5, с. 73]

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

Данные по надежности элементов распределительных устройств напряжением 330 кВ приведены в табл. 1 [9, с. 268–270; 10, с. 105].

Таблица 1

Показатели надежности элементов электростанций

The reliability indices of elements of power plants

Элемент РУ	Частота отказа λ , 1/год	Время послеаварийного восстановления $T_{\text{в}}$, ч	Частота планового ремонта $\lambda_{\text{рем}}$, 1/год	Длительность планового ремонта $T_{\text{рем}}$, ч
Блочный турбогенератор ТВВ-1200	1,0000	200,0	1,000	1080
Блочный турбогенератор ТВВ-320-2	0,7100	58,0	0,236	227
Трансформатор 330 кВ мощностью более 80 МВ·А	0,0410	74,0	1,000	30
Элегазовый выключатель напряжением 330 кВ	0,0150	36,8	0,080	200
Сборные шины 330 кВ (на одно присоединение)	0,0130	5,0	0,166	3
Линия электропередачи 330 кВ на 1 км	0,0025	13,6	0,350	20

Вероятность отказа выключателя при отключении короткого замыкания принимали 0,002, время оперативных переключений в расчетах – 0,5 ч. Результаты расчета частоты и длительности аварийных отключений (в укрупненных кодах аварий) для схемы электрических соединений АЭС, представленной на рис. 1, приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, полное погашение электростанции возможно с частотой $2,22 \cdot 10^{-5}$ 1/год. Наибольшая частота внезапных отказов характерна для потери одного генератора, одной линии или одного трансформатора собственных нужд.

Таблица 2

**Частота и длительность аварийных отключений (в укрупненных кодах аварий)
главной схемы электрических соединений атомной электростанции****The frequency and duration of emergency power outages (in the integrated codes
of accidents) of the main circuits of electric connections of a nuclear power plant**

Код аварии	Суммарная частота, 1/год	Среднее время восстановления, ч	Коэффициент неготовности, о. е.
1Г	2.16E+00	188,98	4.6598E-02
2Г 7Л	2.22E-05	186,29	4.7210E-07
1Л	2.11E+00	13,13	3.1626E-03
1Г 4Л 1Н	6.10E-04	0,50	3.4817E-08
1Г 1Л	3.13E-03	11,95	4.2698E-06
2Г 6Л 1Н	9.77E-07	0,50	5.5765E-11
2Г 7Л 1Н	3.23E-07	0,50	1.8436E-11
1Л 1Н	6.69E-02	0,50	3.8185E-06
1Г 1Л 1Н	1.30E-04	0,50	7.4201E-09
1Г 1Л 2Н	7.30E-07	0,50	4.1667E-11
1Г 3Л 1Н	1.52E-04	0,50	8.6758E-09
1Г 2Л 2Н	2.43E-07	0,50	1.3870E-11
1Г 2Л	5.31E-04	0,50	3.0308E-08
1Н	3.00E-01	42,48	1.4548E-03
1Г 1Н	3.07E-02	0,51	1.7873E-06
2Н	1.31E-04	0,50	7.4772E-09
1Г 2Н	1.25E-07	0,50	7.1347E-12
1Г 2Л 1Н	9.84E-07	0,50	5.6164E-11
1Л 2Н	4.35E-07	0,50	2.4829E-11

Примечание. В укрупненных кодах запись 1Г означает потерю любого одного из генераторов, запись 2Г 7Л – отключение одновременно двух любых генераторов и семи воздушных линий, 1Н – отключение одного трансформатора собственных нужд.

Для сопоставительного примера авторами выполнен расчет надежности схемы выдачи мощности от конденсационной электростанции (КЭС) установленной мощностью 2400 МВт с восемью турбогенераторами мощностью 300 МВт каждый. Распределительное устройство напряжением 330 кВ выполнено так же, как и на АЭС, по полуторной схеме, с тем же самым количеством отходящих линий напряжением 330 кВ. Здесь полное погашение электростанции – одновременное отключение восьми генераторов и семи отходящих линий – оказывается невозможным, т. е. коэффициент неготовности практически равен нулю.

Суммарная частота отключений четырех генераторов и трех линий схемы КЭС равна $2,62 \cdot 10^{-5}$ 1/год. Однако коэффициент неготовности схемы КЭС значительно меньше коэффициента неготовности схемы АЭС. Это обусловлено тем, что на КЭС установлено большее количество генераторов меньшей мощности, характеризующихся более низким значением параметра потока отказов.

ВЫВОД

Существенное влияние на показатели структурной надежности схем выдачи мощности оказывают количество и номинальная мощность генерирующих источников, параметр потока отказов которых возрастает с увеличением номинальной мощности. При наличии одного или двух энергоблоков на атомной электростанции вероятность ее полного погашения не исключается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балаков, Ю. Н. Надежность схем выдачи мощности электростанций / Ю. Н. Балаков, А. Т. Шевченко, А. В. Шунтов. М.: Изд-во МЭИ, 1993. 128 с.
 2. Электрическая часть электростанций / под ред. С. В. Усова. 2-е изд. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1987. 616 с.
 3. Фельдман, М. Л. Особенности электрической части атомных электростанций / М. Л. Фельдман, А. К. Черновец. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 172 с.
 4. Балаков, Ю. Н. Проектирование схем электроустановок / Ю. Н. Балаков, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов. 2-е изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 288 с.
 5. Черновец, А. К. Элементы САПР электрической части АЭС на персональных компьютерах / А. К. Черновец. СПб.: Санкт-Петербург. гос. техн. ун-т, 1992. 89 с.
 6. Гук, Ю. Б. Теория надежности / Ю. Б. Гук, В. В. Карпов, А. А. Лapidус. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 171 с.
 7. Гук, Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю. Б. Гук. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1988. 224 с.
 8. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю. Б. Гук. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1990. 208 с.
 9. Электротехнический справочник: в 4 т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]; гл. ред. А. И. Попов. 9-е изд. М.: МЭИ, 2004. Т. 3: Производство, передача и распределение электрической энергии. 964 с.
 10. Васильев, 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.
- Поступила 09.09.2016 Подписана в печать 10.11.2016 Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Balakov Yu. N., Shevchenko A. T., Shuntov A. V. (1993) *Reliability of the Patterns of Output from Power Plants*. Moscow, MEI Publ. 128 (in Russian).
2. Usov S. V., Mikhalev B. N., Chernovets A. K., Kizevetter E. N., Kantan V. V. (1987) *Electrical Section of Power Plants*. 2nd ed. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Division. 616 (in Russian).
3. Feldman M. L., Chernovets A. K. (1983) *Specific Features of Electrical Sections of Nuclear Power Plants*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 172 (in Russian).
4. Balakov Yu. N., Misrikhanov M. Sh., Shuntov A. V. (2006) *Designing Electrical Circuits Patterns*. 2nd ed. Moscow, MEI Publ. 288 (in Russian).
5. Chernovets A. K. (1992) *CAD Elements of Electrical Section of a Nuclear Power Plant Fulfilled with the Aid of PC*. St.-Petersburg, St.-Petersburg State University. 89 (in Russian).
6. Guk Yu. B., Karpov V. V., Lapidus A. A. (2009) *Reliability Theory*. St.-Petersburg, Polytechnic University Publ. 171 (in Russian).
7. Guk Yu. B. (1988) *Reliability Analysis of Power Installations*. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Branch. 224 (in Russian).
8. Guk Yu. B. (1990) *Theory of Reliability in the Power Industry*. Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Branch. 208 (in Russian).
9. Gerasimov V. G., Dyakov A. F., Piinskii N. F., Labuntsov V. A., Morozkin V. P., Orlov I. N., Stroev V. A. (2004) *Electrical Engineering Reference Guide. Vol. 3. Production, Transmission and Distribution of Electric Power*. Moscow, MEI Publ. 964 (in Russian).
10. Vasilev A. P., Guk Yu. B., Karpov V. V. (2000) *Reliability of Power Installations and Systems: Theory and Practice*. St.-Petersburg, Lengosenergonadzor State Institution. 413 (in Russian).