

Научная статья
УДК 621.314.2/26.016:621.3.064.1
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-4-97-104>
EDN LONVII

Подбор силовых трансформаторов с разными напряжениями короткого замыкания для параллельной работы

Игорь Игоревич Плотников

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия, aspplotnikov@mail.ru*

Аннотация. Параллельная работа трансформаторов (ТР) – одно из ключевых решений для повышения надежности электроснабжения, производства, тяговых электроподстанций, портовых сооружений производственных мощностей. От работы ТР зависит экономичность при разном цикле работы оборудования, потери на холостом ходу при неработающем оборудовании. Рассматривается возможность создания максимально экономичного цикла работы всего предприятия порта с обеспечением не только работы оборудования, но и ремонтпригодности без нарушения цикла электропитания мощностей. Работа ТР нуждается в точном расчете и необходимых условиях коммутации, которые позволяют проводить оперативный ремонт оборудования, надлежащим образом осуществлять контроль работы каждого ТР и каждого узла в отдельности. Отмечена возможность применения полного отключения оборудования с дальнейшей консервацией в период отсутствия необходимости в работе оборудования. Проведены расчеты для условий параллельной работы ТР, которые доказывают утверждение об экономической выгоде параллельной работы ТР, некоторые формулы выведены из теоретических основ электротехники, многие расчеты – это эмпирические исследования в области трансформаторостроения и энергосетей. Практические решения сведены в таблицы, где представлены варианты ТР с разными паспортными данными. Выявлено, какие из представленных на рынке ТР отвечают условиям параллельного включения. Рассматриваются те ТР, которые были оптимально удобны для набора необходимой мощности. Результаты исследований способны облегчить выбор ТР при проектировании новых участков энергоснабжения и модернизации существующих. Отмечено, что модели ТР для работы в сложных геоклиматических условиях, для морских платформ, зон экстремального холода и высоких температур не представлены, ТР подобного исполнения требуют отдельного исследования в связи с особенностями работы.

Ключевые слова: параллельная работа трансформатора, распределение мощностей, загруженность трансформатора, энергосбережение, нагрузка

Для цитирования: *Плотников И. И.* Подбор силовых трансформаторов с разными напряжениями короткого замыкания для параллельной работы // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология.* 2022. № 4. С. 97–104. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-4-97-104>. EDN LONVII.

Original article

Selecting power transformers with different short circuit voltages for parallel operation

Igor I. Plotnikov

*Emperor Alexander I Saint-Petersburg State Transport University,
Saint-Petersburg, Russia, aspplotnikov@mail.ru*

Abstract. Parallel operation of transformers (TR) is one of the key solutions for improving the reliability of power supply, production, traction power substations, port production capacities. TR operation influences the cost effectiveness of different cycles of equipment operation and no-load losses when the equipment is not operated. Creating the most economical cycle of operation of the entire port infrastructure is considered, which will ensure not only the equipment operation, but also maintainability with trouble-free power supply cycle. TR operation requires the precise calculation and necessary conditions for switching, which allows to conduct prompt repair of equipment, proper control of the operation of each TR and each node separately. A complete shutdown of equipment with its further conservation during the period when the equipment is not needed is found possible. There were carried out calculations for

the TR parallel operation, which prove the economic benefits of TR parallel operation. Some formulas are derived from the theoretical foundations of electrical engineering. Many calculations present the empirical studies in the field of transformer engineering and power networks. Practical solutions are summarized in tables, where TR options with different passport data are presented. There has been found which of the TRs on the market meet the condition of parallel connection. There are considered the TRs most convenient for gaining the required power. The research results can facilitate the choice of TR when designing new power supply sections and upgrading existing ones. It has been stated that the TR models designed for operation in difficult geoclimatic conditions, on the offshore platforms, in zones of extreme cold and high temperatures are not presented. TR of this design require a separate study due to the specific working conditions.

Keywords: transformer parallel operation, power distribution, transformer workload, energy saving, load

For citation: Plotnikov I. I. Selecting power transformers with different short circuit voltages for parallel operation. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2022;4:97-104. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-4-97-104>. EDN LONVII.

Введение

Среди самых важных критериев энергосбережения отмечают энергоэффективность, а также надежность и устойчивость. Создание энергосетей требует от потребителей бесперебойного питания в любое время, особенно в период пиковых нагрузок, когда необходима максимальная мощность напряжения. Для этого нужно построить систему, в которой будут параллельно работать несколько статических устройств – трансформаторов (ТР). В отличие от работы одной мощной трансформаторной установки параллельные работы нескольких ТР обладают рядом технических и экономических преимуществ:

1. Надежность снабжения электроэнергией потребителей, поскольку вывод из строя одного ТР не лишает потребителей электроэнергии. Нагрузку, вышедшую из строя, могут принять временно другие ТР в полной или частичной степени.

2. Резервная мощность ТР при параллельном подключении будет существенно меньше, чем при потреблении одним мощным ТР.

3. Распределение нагрузки ТР позволит уменьшить потери, а также обеспечит экономичный режим эксплуатации подстанции, уменьшив потери холостого хода и его загрузку на максимальный КПД.

Особенно необходима параллельная работа ТР в производственных условиях, когда имеется неодинаковая нагрузка в рабочем режиме, в суточном режиме предприятия. В эти моменты необходима стабильная электроэнергия без скачков мощности активной и реактивной энергии. Невыполнение указанных условий приводит к ряду проблем с электросетями потребителей, возникновению нежелательного искажения, изменению напряжения и частоты.

Материалы исследования

Параллельные работы ТР оказывают положительное влияние на работу энергосетей, их использование целесообразно и даже необходимо в следующих условиях [1–4]:

– нелинейные, резкие переменные, ударные нагрузки – силовые моторы моторных линий, электромагнитов, силовые сварочные устройства;

– возможность совмещать в одной линии энергоснабжения не только мощные машины с нелинейной нагрузкой, но и требующее особого качества энергии оборудование числового программного управления, систем ИТ, электронно-вычислительных машин и освещения, систем связи;

– обеспечение ступенчатого (позапно) включения ТР, т. е. мощностей, в случае необходимости реальной нагрузки на потребителя, если автоматический ввод резервов не позволил обеспечить необходимое быстрое восстановление питания при неселективной схеме электроснабжения нагрузки на ударную нагрузку, есть вероятность ошибочного включения автоматического ввода резервов (например, при наличии большой индуктивной мощности);

– повышение надежности работы защитных устройств при однофазном коротком замыкании (КЗ);

– снижение потери энергии при отключении ненагруженных ТР, что приводит к отсутствию потери токов холостого хода I_x .

Для параллельного использования ТР требуется надежное электротехническое оборудование с более высокой и постоянной пропускной способностью, что приводит к повышению расходов. Случаи применения параллельного включения нескольких ТР требуют индивидуального подхода при расчете технической, экономической части проекта и проработке высокого уровня надежности обслуживания и ремонта электросистемы. Следует отличать параллельный рабочий процесс ТР от совместного, когда он включен только с одной стороны на общую шину.

Параллельная работа ТР требует соблюдения общепризнанных правил монтажа и условий взаимной работы и особенностей конструкций каждого отдельного ТР. В основном эти критерии не меняются в течение всего времени работы. Условия для ТР, которые работают параллельно на одном линейном соединении одной нагрузки [1, 2, 4, 5]:

– группы соединений обмоток ТР должны быть тождественны;

– ТР должен обладать одинаковыми коэффициентами трансформации (допустимое отклонение составляет $\pm 0,5$);

– напряжения КЗ (U_K) и их составляющие должны быть равны (допускается различие не более ± 10);

– отношение наибольшей номинальной мощности к наименьшей не должно превышать 1 : 3;

– выполнена фазировка ТР.

Перечисленные условия обязательны для параллельной работы, их несоблюдение влечет за собой возникновение выравнивающих токов во вторичных контурах ТР, не используется группой ТР вся мощность, что приводит к дополнительному нагреву активной части или неравномерному распределению активной нагрузки параллельных ТР.

Наилучшее решение параллельной работы ТР получается при правильном подборе ТР, когда суммарные потери холостого хода P_0 и потери нагрузочные P_n станут наименьшими.

Потребители являются нагрузкой ТР, поэтому нагрузочные потери изменяются пропорционально номинальной мощности к квадрату отношения нагрузки:

$$P'_K = \beta^2 P_K,$$

где P'_K – нагрузочные потери при нагрузке β ; β – отношение нагрузки ТР к его номинальной мощности; P_K – потери КЗ ТР при его номинальной мощности.

Нагрузочные потери P'_K изменяются от нуля ($\beta = 0$), когда трансформатор находится в режиме холостого хода, до P'_K ($\beta = 1$) – полные потери, потребители включены на номинальную мощность.

Во всех случаях, когда нагрузка равна нулю и когда максимальна, потери на холостой ход P_0 одинаковы, поэтому необходимо добиться наименьших потерь холостого хода. Рентабельно иметь ТР с наименьшими потерями.

Рассчитаем, когда выгодна работа одного ТР или нескольких при одинаковой общей нагрузке.

Суммарные потери одного ТР:

$$P_0 + \beta^2 P_K;$$

потери нескольких ТР:

$$\sum_1^n P_0 + \sum_1^n \left(\frac{\beta}{n}\right)^2 P_K.$$

Принимая во внимание суммарные потери при работе одного и нескольких ТР, составим уравнение

$$P_0 + \beta^2 P_K = \sum_1^n P_0 + \sum_1^n \left(\frac{\beta}{n}\right)^2 P_K.$$

Найдем значение β :

$$\beta = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_0}{P_K}},$$

т. е. величину отношения нагрузки ТР к его номинальной мощности. Таким образом, потери при работе нескольких ТР будут меньше, чем при работе одного ТР.

Обозначим β и β_n для n -го количества ТР:

$$\beta < \beta_n,$$

если суммарные потери в одном ТР меньше, чем в нескольких;

$$\beta > \beta_n,$$

если суммарные потери в одном ТР больше, чем в нескольких.

Рассмотрим работу нескольких ТР. Обозначим параллельную работу трех ТР, имеющих разные напряжения КЗ U_K .

На рис. 1 изображена работа трех соединенных параллельно ТР, которые имеют одностипные группы соединений и равные коэффициенты трансформаций.

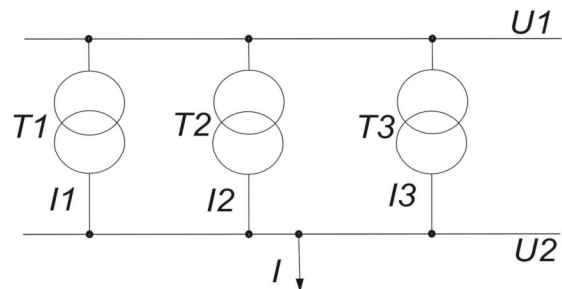


Рис. 1. Схема для параллельной работы трансформаторов

Fig. 1. Diagram of parallel operation of transformers

В данном расчете мы не будем рассматривать токи намагничивания и используем упрощенную схему замещения трансформаторов, обозначив их как Z_{K1} , Z_{K2} , Z_{K3} , параллельные работы трех трансформаторов могут быть представлены на рис. 2.

Согласно схеме (рис. 2) падения напряжения

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 = \dot{U}'_{20} - \dot{U}'_2$$

у всех трех трансформаторов одинаковы и равны:

$$\Delta \dot{U} = Z \dot{I}, \quad (1)$$

где \dot{I} – общий ток нагрузки; Z – суммарное полное сопротивление схемы замещения, которое определяется по формуле

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{K1}} + \frac{1}{Z_{K2}} + \frac{1}{Z_{K3}}} = \frac{1}{\sum_n \frac{1}{Z_n}}, \quad (2)$$

где Z_{K1} , Z_{K2} и Z_{K3} – эквивалентное сопротивление соответствующего ТР.

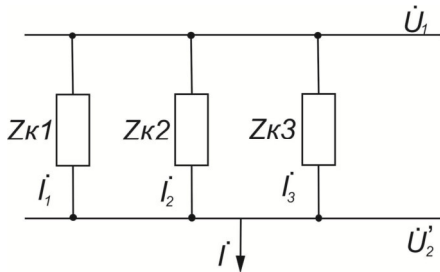


Рис. 2. Упрощенная схема параллельной работы трансформаторов с одинаковыми группами соединений и коэффициентами трансформации

Fig. 2. Simplified diagram of parallel operation of transformers with similar groups of connections and transformation ratios

Токи отдельных ТР вычисляем по формуле

$$I_1 = \frac{\Delta U}{Z_{K1}} = \frac{I}{Z_{K1} \sum_n \frac{1}{Z_{Kn}}}$$

Как правило, эти токи не совпадают с фазой, поскольку аргументы φ_{K1} , φ_{K2} , φ_{K3} комплексных сопротивлений КЗ

$$\begin{aligned} Z_{K1} &= Z_{K1}^{e^{\varphi_{K1}}}; \\ Z_{K2} &= Z_{K2}^{e^{\varphi_{K2}}}; \\ Z_{K3} &= Z_{K3}^{e^{\varphi_{K3}}} \end{aligned}$$

могут быть не равны.

Например:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_{K2}}{Z_{K1}} e^{i(\varphi_{K2} - \varphi_{K1})},$$

т. е. I_1 и I_2 сдвинуты по фазе на угол $\varphi_{K2} - \varphi_{K1}$. Однако в нормальных условиях эти изменения фазы незначительны, и можно с большой точностью принять

$$I_1 + I_2 + I_3 = I.$$

Таким образом, арифметические суммы полной мощности ТР с высокой точностью полной мощности нагрузки:

$$S_1 + S_2 + S_3 = S.$$

Комплексные значения в выражениях (1) и (2) могут быть заменены на модули. Составим уравнение

$$Z_{K1} = \frac{Z_{K1} I_{HI}}{U_H},$$

из которого получим:

$$Z_{K1} = Z_{K1} \frac{U_H}{I_{HI}} = \frac{u_{K1\%}}{100} = \frac{U_H}{I_{HI}}$$

и аналогичные выражения для Z_{K2} и Z_{K3} .

Подставляем эти выражения для Z_K в (2) и заменяем токи пропорциональными их полным мощностям, умножив (2) на mU_H .

Получим выражения

$$mU_H I_1 = \frac{mU_H I}{\frac{U_{K1\%}}{100} \frac{U_H}{I_{HI}} m \sum_n \frac{100 I_{Hn}}{U_{Kn\%} U_H}}; \quad (3)$$

$$S_i = \frac{S_p}{\frac{U_{Ki\%}}{U_{НОМi}} \sum_n \frac{S_{Hn}}{U_{Kn\%}}},$$

где S_p – общая нагрузка трансформаторов, кВА; S_i – полная мощность, которая будет передаваться через рассматриваемый i -й ТР в сеть вторичного напряжения, кВА; $S_{НОМi}$ – номинальная мощность рассматриваемого i -го ТР; S_{Hn} – мощность n -го ТР, работающего параллельно, кВА; $U_{Ki\%}$ – напряжение КЗ рассматриваемого i -го ТР, %; $U_{Kn\%}$ – напряжение КЗ n -го ТР, %; n – количество параллельно работающих ТР.

Согласно результатам исследований [2, 3, 6], напряжение КЗ параллельно подключенных ТР может отличаться не более $\pm 10\%$. В нескольких источниках [1–3, 7] не указывается конкретно, в каком значении U_K определяется это отклонение. Поэтому допустимое различие в напряжениях КЗ по отношению к среднему значению $U_{КС}$ найдем исходя из выражения (2) [8]:

$$U_{КС} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Ki}. \quad (4)$$

Любое фактическое отклонение напряжения КЗ n -го ТР от $U_{КС}$ выражено в процентах и рассчитывается по формуле

$$\Delta U_{КС\%} = \frac{U_{K1} - U_{K2}}{U_{CP}} 100. \quad (5)$$

Согласно производственным характеристикам, ТР с номинальной мощностью 630–2 500 кВА, напряжением (6–10) / 0,4 кВ, применяемые в системах электроснабжения предприятий, имеют значения 4,5; 5,5 и 6 % [9].

Выполним расчеты по формулам (4) и (5) для каждой группы ТР и определим, возможна ли параллельная работа двух ТР из группы [10–12]:

$$U_{KC} = \frac{1}{2} \cdot (4,5 + 5,5) = 5 \%;$$

$$\Delta U_{K\%} = \frac{4,5 - 5}{5} \cdot 100 \% = 10 \%.$$

Аналогичный расчет произведем для других сочетаний ТР U_K . Определим мощности, передаваемые через ТР в сеть напряжением до 1 000 В двух и трех подстанций ТР. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Сочетания трансформаторов при различных напряжениях U_K

Combinations of transformers at different voltages U_K

№ группы	№ ТР	Напряжение КЗ, %	Среднее значение U_{KC} , %	Значение ΔU_K , %	Параллельная работа
1	1	4,5	5	-10	+
	2	5,5		+10	
2	2	5,5	5,75	-4,35	+
	3	6		+4,35	
3	1	4,5	5,33	-18,75	-
	2	5,5		-12,12	
	3	6		-9,37	
4	1	4,5	4,5	0	+
	1	4,5		0	
	1	4,5		0	
5	1	4,5	5,17	-19,35	-
	2	5,5		-19,35	
	2	5,5		0	
6	2	5,5	5,5	0	+
	2	5,5		0	
	2	5,5		0	
7	3	6	5,67	8,82	+
	2	5,5		8,82	
	2	5,5		0	
8	3	6	5,83	0	+
	3	6		5,6	
	2	5,5		5,6	
9	3	6	6	0	+
	3	6		0	
	3	6		0	
10	3	6	5,5	0	-
	3	6		27,3	
	1	4,5		27,3	
11	3	6	5	30	-
	1	4,5		30	
	1	4,5		0	
12	3	6	5,33	9,38	-
	2	5,5		28,1	
	1	4,5		18,8	

Plotnikov I. I. Selecting power transformers with different short circuit voltages for parallel operation

При разных U_K и $S_{НОМ} = 1\ 000$ кВА выполним расчет по формуле (3) для разной общей мощности нагрузки ($S_p \leq \sum S_{НОМi}$). Для примера произведем расчет для первой группы ТР (см. табл. 1) [13, 14]:

$$S_1 = \frac{1\ 000}{\frac{4,5}{1\ 000} \cdot \left(\frac{1\ 000}{5,5} + \frac{1\ 000}{4,5} \right)} = 550 \text{ кВА};$$

$$S_2 = \frac{1\ 000}{\frac{5,5}{1\ 000} \cdot \left(\frac{1\ 000}{5,5} + \frac{1\ 000}{4,5} \right)} = 450 \text{ кВА}.$$

Расчет допустимых сочетаний U_K работы ТР и остальных значений S_p произведем исходя из характеристики линейки ТР в табл. 2 [9].

Результаты произведенных расчетов возможных сочетаний ТР приведены в табл. 3.

Также выполним расчет для ТР с разными U_K и $S_{НОМ}$, данные сведем в табл. 4.

Таблица 2

Table 2

Характеристика трансформаторов
 Characteristics of transformers

Модель ТР	Номинальная мощность $S_{ном}$, кВА	Напряжение КЗ U_K , %
ТМГ 12-400/10-У1(ХЛ1)	400	4,5
ТМГ 12-630/10-У1(ХЛ1)	630	5,5
ТМГ 12-1000/10-У1(ХЛ1)	1 000	5,5
ТМГ 12-1250/10-У1(ХЛ1)	1 250	6

Таблица 3

Table 3

Сочетания трансформаторов при различной величине нагрузки S_p
 Combinations of transformers with different load S_p

Общая нагрузка ТР S_p , кВА	Номинальная мощность ТР $S_{н}$, кВА		
	ТР 1	ТР 2	ТР 3
Группа № 1			
1 000	550	450	Рассматривается группа из двух ТР
1 500	825	675	
2 000	1 100	900	
2 400	1 320	1 080	
Группа № 2			
1 000	521,8	478,3	Рассматривается группа из двух ТР
1 500	782	717,4	
2 000	1 043	956,5	
2 400	1 252	1 147,8	
Группа № 7			
1 000	342,8	342,9	314,3
1 500	514,3	514,3	741,4
2 000	685,7	685,7	628,6
2 500	857,1	857,1	785,7
3 000	1 028,6	1 028,6	942,9
3 600	1 234,3	1 234,3	1 131,4
Группа № 8			
1 000	553	323,5	323,5
1 500	529,4	485,3	485,3
2 000	705,9	647	647
2 500	882,3	808	808
3 000	1 058,8	970,6	970,6
3 600	1 270,6	1 164,7	1 164,7

Таблица 4

Table 4

Сочетания трансформаторов при различных величинах S_p и U_K
 Combinations of transformers with different values of S_p and U_K

Общая нагрузка трансформаторов S_p , кВА	Номинальная мощность ТР $S_{ном}$, кВА		
	ТР 1	ТР 2	ТР 3
Группа № 1			
	400	1 000	Рассматривается группа из двух ТР
1 000	328,4	450	
1 500	492,5	675	
2 000	657	900	
2 400	788	1 080	

Общая нагрузка трансформаторов S_p , кВА	Номинальная мощность ТР $S_{ном}$, кВА		
	ТР 1	ТР 2	ТР 3
Группа № 2			
	630	1 250	Рассматривается группа из двух ТР
1 000	354,8	645,2	
1 500	532,1	967,9	
2 000	709,5	1 290,5	
2 400	851,4	1 548,6	
Группа № 8			
	630	1 000	1 250
1 000	227	360,3	413
1 500	340,4	540,4	619,2
2 000	454	720,5	825,6
2 500	567,4	900,6	1 072
3 000	680,8	1 080,8	1 238,4
3 600	817	1 297	1 486
Группа № 9			
	630	1 250	1 250
1 000	216	392,2	392,2
1 500	223,5	588,3	588,3
2 000	431,3	784,4	784,4
2 500	539	980,5	980,5
3 000	647	1 176,6	1 176,6
3 600	776,3	1 411,9	1 411,9

Заключение

Таким образом, условия для параллельной работы являются самыми лучшими при равных значениях U_K . При неравных значениях U_K повышение нагрузки номинальной мощности достигнет ТР с наименьшим U_K . Остальные ТР в параллельной работе будут недогружены. Дальнейшее повышение общей нагрузки будет недопустимо, поскольку ТР с меньшим U_K перегрузится. Такое распределение мощностей справедливо для ТР с одинаковой $S_{ном}$ и разными U_K , % [15, 16].

При параллельно работающем ТР с разными U_K , но одинаковыми номинальными мощностями возникает разница между мощностью, передаваемой через ТР, и установленные мощности будут недоиспользованы. Например: разница U_K на 0,5 % влечет к увеличению разницы мощностей в 2,3 раза.

Недопустимо превышать соотношение номинальных мощностей более 1/3. При параллельной работе ТР с наименьшей мощностью даже при незначительной перегрузке будет больше нагружаться в процентном соотношении, располагая меньшим U_K .

Если параллельно работают ТР разной мощности, значительно эффективнее, если ТР меньшей мощности имеет большее напряжение U_K . Действительно, при нагрузке он окажется недогруженным, но это не представляет большого неудобства, т. к. недогрузка ТР меньшей мощности оказывает экономически незначительное влияние на общую мощность системы, в отличие от неполной нагрузки большего трансформатора. В случае если ТР меньшей мощности имеет меньшее напряжение U_K , то он ограничивает работу всей системы. Его нагрузку требуется разгрузить, чтобы ТР не оказался перегруженным.

Список источников

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
2. Алпатов М. Е., Бутырин П. А. Аналитическая теория трансформаторов: моногр. М.: Изд-во МЭИ, 2019. 110 с.
3. Шукин О. С. Электрические машины. Трансформаторы. Асинхронные машины. Нижневартовск: Изд-во НВГУ, 2009. 109 с.
4. Киреева Э. А. Электроснабжение и электрооборудование организаций и учреждений. М.: Кнорус, 2015. 234 с.
5. Осташенков А. П. Трансформаторное оборудование. Йошкар-Ола: Изд-во ПГТУ, 2020. 80 с.
6. Kirtley J. L. Transformers: Electric Power Principles: Sources, Conversion, Distribution and Use, Second Edition, 2019. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119585305.ch6> (дата обращения: 25.08.2022).
7. Marenbach R., Jäger J., Nelles D. Elektrische Energietechnik, Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik, 2020. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-29492-2#bibliographic-information> (дата обращения: 14.08.2022).

8. Литвинов И. И. Системы учета электроэнергии в электрических сетях: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. 121 с.
9. Акимов Е. Г. Трансформаторы силовые и измерительные: справ. М.: Ай Би Тех, 2004. 384 с.
10. Кудашев А. С. Электрические сети и подстанции: учеб. пособие. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2021. 102 с.
11. Кокин С. Е. Проектирование подстанций распределительного электросетевого комплекса. М.: Изд-во МЭИ, 2018. 231 с.
12. Немировский А. Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций. М.: Изд-во МЭИ, 2018. 223 с.

13. Шульга Р. Н. Специальные вопросы разработки выключателей генераторов, трансформаторов, конденсаторных батарей: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2021. 232 с.
14. Киреева Э. А. Устройство и техническое обслуживание электрических подстанций. М.: Академия, 2020. 255 с.
15. Николаев М. Ю., Горюнов В. Н., Прусс С. Ю. и др. Основы составления главных схем электрических подстанций. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. 93 с.
16. Конюхова Е. А. Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2021. 398 с.

References

1. Vol'dek A. I., Popov V. V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoiannogo toka i transformatory* [Electric machines. Introduction to electromechanics. DC machines and transformers]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p.
2. Alpatov M. E., Butyrin P. A. *Analiticheskaya teoriya transformatorov: monografiya* [Analytical theory of transformers: monograph]. Moscow, Izd-vo MEI, 2019. 110 p.
3. Shchukin O. S. *Elektricheskie mashiny. Transformatory. Asinkhronnye mashiny* [Electric machines. Transformers. Asynchronous Machines]. Nizhnevartovsk, Izd-vo NVGU, 2009. 109 p.
4. Kireeva E. A. *Elektrosnabzhenie i elektrooborudovanie organizatsii i uchrezhdenii* [Power supply and electrical equipment of organizations and institutions]. Moscow, Knorus Publ., 2015. 234 p.
5. Ostashenkov A. P. *Transformatornoe oborudovanie* [Transformer equipment]. Ioshkar-Ola, Izd-vo PGTU, 2020. 80 p.
6. Kirtley J. L. *Transformers: Electric Power Principles: Sources, Conversion, Distribution and Use, Second Edition, 2019*. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119585305.ch6> (accessed: 25.08.2022).
7. Marenbach R., Jäger J., Nelles D. *Elektrische Energietechnik, Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik, 2020*. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-29492-2#bibliographic-information> (accessed: 14.08.2022).
8. Litvinov I. I. *Sistemy ucheta elektroenergii v elektricheskikh setiakh: uchebnoe posobie* [Electricity metering systems in electrical networks: tutorial]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2022. 121 p.
9. Akimov E. G. *Transformatory silovye i izmeritel'nye: spravochnik* [Power and measuring transformers: reference book]. Moscow, Ai Bi Tekh Publ., 2004. 384 p.
10. Kudashev A. S. *Elektricheskie seti i podstantsii: uchebnoe posobie* [Electric networks and substations: textbook]. Volgograd, Izd-vo VolgGTU, 2021. 102 p.
11. Kokin S. E. *Proektirovanie podstantsii raspredelitel'nogo elektrosetevogo kompleksa* [Design of substations of distribution grid complex]. Moscow, Izd-vo MEI, 2018. 231 p.
12. Nemirovskii A. E. *Elektrooborudovanie elektricheskikh setei, stantsii i podstantsii* [Electrical equipment of electrical networks, stations and substations]. Moscow, Izd-vo MEI, 2018. 223 p.
13. Shul'ga R. N. *Spetsial'nye voprosy razrabotki vykluchatelei generatorov, transformatorov, kondensatornykh batarei: uchebnoe posobie* [Special issues in developing switches for generators, transformers, capacitor batteries: tutorial]. Moscow, Izd-vo MEI, 2021. 232 p.
14. Kireeva E. A. *Ustroistvo i tekhnicheskoe obsluzhivanie elektricheskikh podstantsii* [Device and maintenance of electrical substations]. Moscow, Akademiya Publ., 2020. 255 p.
15. Nikolaev M. Yu., Goriunov V. N., Pruss S. Yu. i dr. *Osnovy sostavleniya glavnykh skhem elektricheskikh podstantsii* [Principles of laying out main circuits of electrical substations]. Omsk, Izd-vo OmGTU, 2019. 93 p.
16. Koniukhova E. A. *Elektrosnabzhenie ob"ektov* [Power supply of objects]. Moscow, Akademiya Publ., 2021. 398 p.

Статья поступила в редакцию 20.09.2022; одобрена после рецензирования 07.11.2022; принята к публикации 08.11.2022
The article was submitted 20.09.2022; approved after reviewing 07.11.2022; accepted for publication 08.11.2022

Информация об авторе / Information about the author

Игорь Игоревич Плотников — аспирант кафедры электротехники и теплоэнергетики; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I; aspplotnikov@mail.ru

Igor I. Plotnikov — Postgraduate Student of the Department of Electric Engineering and Heat Power Engineering; Emperor Alexander I Saint-Petersburg State Transport University; aspplotnikov@mail.ru

