

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Д. К. Кугучева

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический материал по практическим занятиям для студентов бакалавриата по направлению подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2023

УДК 621.311

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
М.С. Харитонов

Кугучева, Д. К.

Электрооборудование электростанций: учеб.-методич. пособие – локальный электронный методический материал по практическим занятиям для студ. бакалавриата по направлению подгот. 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника / **Д. К. Кугучева.** – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 62 с.

В учебно-методическом пособии по практическим занятиям представлены практические задания и методические рекомендации по их выполнению, а также задания и вопросы для самостоятельной работы. Практические занятия предназначены для закрепления теоретического материала и приобретения навыков выполнения расчетов в сфере электроэнергетики.

Табл. – 11, рис. – 19, список литературы – 3 наименования

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие. Рекомендовано к использованию в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 25.01.2023 г., протокол № 05

УДК 621.311

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2023 г.
© Кугучева Д. К., 2023 г.

Содержание

Введение	3
Практическая работа № 1 «Определение основных технико-экономических показателей по графику активных нагрузок»	6
Практическая работа № 2 «Проверка шинных конструкций на электродинамическую стойкость»	14
Практическая работа № 3 «Нагрев токоведущих частей при коротком замыкании»	24
Практическая работа № 4 «Выбор сечения шин открытого участка токопровода в цепи генератора по условию продолжительного режима работы»	31
Практическая работа № 5 «Расчет термической стойкости проводников и аппаратов»	40
Практическая работа № 6 «Решение основных задач в области электроэнергетики»	48
Практическая работа № 7 «Выбор электрооборудования электростанции»	59
Рекомендуемая литература	62

Введение

Дисциплина «Электрооборудование электростанций» обеспечивает формирование у обучающихся готовности к использованию системы знаний в области электроэнергетики.

Целью освоения дисциплины является формирование у студентов знаний и навыков по решению профессиональных задач, связанных с электрооборудованием электростанций, изучение основного электрооборудования, его характеристик и параметров, режимов и условий его работы, методов расчета и проверки на термическую и термодинамическую стойкость, изучение главных схем, схем собственных нужд, основ релейной защиты и автоматики.

Задачи изучения дисциплины:

- ознакомление обучающихся с назначением, основными параметрами, конструкцией и принципами работы электротехнического оборудования электростанций и подстанций;
- изучение схем электрических соединений электрических станций и подстанций, распределительных устройств, систем собственных нужд электроустановок;
- овладение методом расчета электрооборудования электростанций и подстанций и проверки на термическую и электродинамическую стойкость.

По завершении изучения дисциплины «Электрооборудование электростанций» у обучающегося должны быть сформированы следующие компетенции:

знать:

- основное электрооборудованием электростанций, его параметры, характеристики и режимы работы;
- главные схемы и схемы собственных нужд электростанций;
- основные элементы релейной защиты и автоматики;
- физические процессы электрического пробоя в различных средах;

уметь:

- выбрать электрическую схему электростанций в соответствии с технологическим процессом;
- выбрать электрическое оборудование;
- провести расчет токов короткого замыкания и проверку оборудования на электродинамическую и термодинамическую стойкость;

владеть:

- навыками конструктивного выполнения воздушных и кабельных линий электропередачи;
- навыками проектирования систем электроснабжения городов, промышленных предприятий;

- навыками выполнения и испытания изоляции высокого напряжения

Целью пособия по практическим занятиям является развитие знаний, умений и навыков в области принципа действия, структуры электрооборудования электрических станций и подстанций.

Задачами освоения пособия по практическим занятиям являются:

- изучение основных технико-экономических показателей по графикам нагрузок;
- проверка электрооборудования на термическую и электродинамическую стойкость;
- изучение способов решения основных задач в области электроэнергетики;
- изучение способов выбора электрооборудования электростанций.

Практическая работа № 1

«Определение основных технико-экономических показателей по графику активных нагрузок»

Цель практической работы:

Сформировать знания, умения и навыки в области выполнения расчетов и построения по заданному суточному графику активных потребителей подстанции зимних и летних графиков нагрузок в именованных единицах, а также годовых графиков продолжительности нагрузок.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- способы расчета суточных графиков нагрузки

уметь:

- строить и рассчитывать суточные графики нагрузок.

Учебная литература по практической работе:

Сибикин, Ю.Д. Эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю.Д. Сибикин. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. - 448 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации

Электрическая нагрузка отдельных потребителей, а следовательно, и суммарная их нагрузка, определяющая режим работы электростанций в энергосистеме, непрерывно меняется. Принято отражать этот факт графиком нагрузки, т. е. диаграммой изменения мощности (тока) электроустановки во времени.

По виду фиксируемого параметра различают графики активной P , реактивной Q , полной S мощностей и тока I электроустановки.

Как правило, графики отражают изменение нагрузки за определенный период времени. По этому признаку их подразделяют на суточные (24 ч), сезонные, годовые и др.

По месту изучения или элементу энергосистемы, к которому они относятся, графики подразделяют на следующие группы:

- графики нагрузки потребителей, определяемые на шинах подстанций;
- сетевые графики нагрузки, определяемые на шинах районных и узловых подстанций;
- графики нагрузки энергосистемы, характеризующие результирующую нагрузку энергосистемы;
- графики нагрузки электростанций.

Графики электрических нагрузок позволяют правильно подойти к выбору основного оборудования подстанций – трансформаторов, компенсирующих устройств, кабелей и наметить наиболее экономичный режим их работы.

В условиях действующего предприятия графики электрических нагрузок помогают выявить основные показатели электрических нагрузок, которые необходимы для проектирования электроснабжения аналогичных производств.

Рассмотрим суточный и годовой графики нагрузок электростанций.

1.1.1. Суточный график нагрузки электростанций

Просуммировав графики нагрузки потребителей и потери распределения в электрических сетях в целом по энергосистеме, получают результирующий график нагрузки электростанций энергосистемы.

График нагрузки генераторов энергосистемы строят на основе графика мощности, отпускаемой с шин, учитывая при этом дополнительный расход электроэнергии на собственные нужды. При значительных колебаниях нагрузки электростанций необходимо учитывать переменный характер потребления собственных нужд:

$$P_{\text{сн}} = \left(0,4 + 0,6 \frac{P_1}{P_{\text{уст}}} \right) P_{\text{сн.макс}}, \quad (1.1)$$

где $P_{\text{сн}}$ – мощность, отдаваемая с шин станции, МВт; $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность генераторов, МВт; $P_{\text{сн.макс}}$ – максимальный расход на собственные нужды, МВт; коэффициенты 0,4 и 0,6 приблизительно характеризуют соответственно долю постоянной и переменной части расхода на собственные нужды $P_{\text{сн.макс}}$.

Нагрузка между отдельными электростанциями распределяется таким образом, чтобы обеспечить максимальную экономичность работы в целом по энергосистеме. Исходя из этих соображений, диспетчерская служба энергосистемы задает электростанциям суточные графики нагрузки.

В качестве примера на рис. 1.1 приведены суточные графики: подстанции с преимущественно осветительной нагрузкой (*а*); предприятия легкой промышленности с работой в две смены (*б*); нефтеперерабатывающего завода с работой в три смены (*в*).

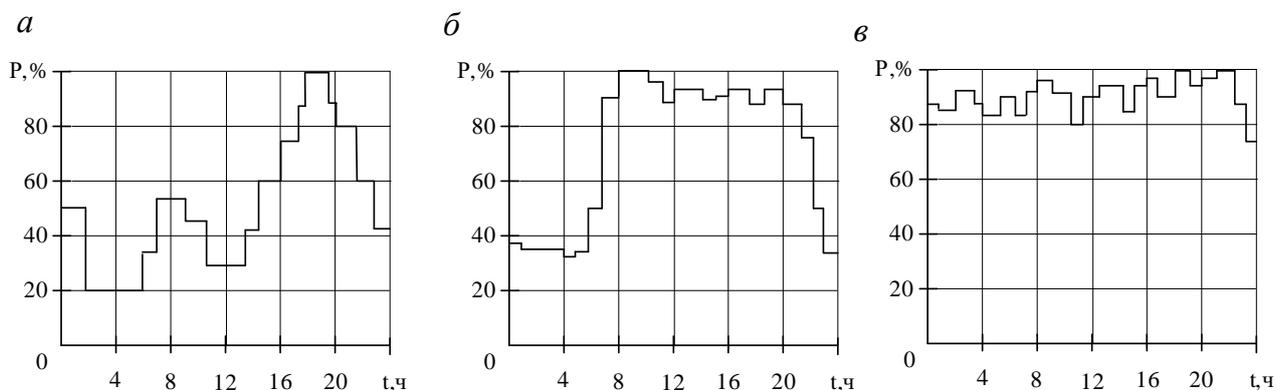


Рис. 1.1. Суточные графики потребителей электроэнергии: *а* – подстанция с преимущественно осветительной нагрузкой; *б* – предприятие легкой промышленности с работой в две смены; *в* – нефтеперерабатывающий завод с работой в три смены

Графики электрических нагрузок предприятий различных отраслей промышленности, городов, рабочих поселков позволяют прогнозировать ожидаемые максимальные нагрузки, режим и размеры потребления электроэнергии, обоснованно проектировать развитие системы. Чем равномернее графики нагрузки потребителей, тем равномернее и график нагрузки электрической системы в целом, тем легче обеспечить экономичную работу электростанций.

1.1.2. Годовой график продолжительности нагрузок

Цель годового графика продолжительности нагрузок – показать длительность работы установки в течение года с различными нагрузками. По оси ординат откладывают нагрузки в соответствующем масштабе, по оси абсцисс – часы года от 0 до 8760. Нагрузки на графике располагают в порядке их убывания от P_{\max} до P_{\min} (рис. 1.2).

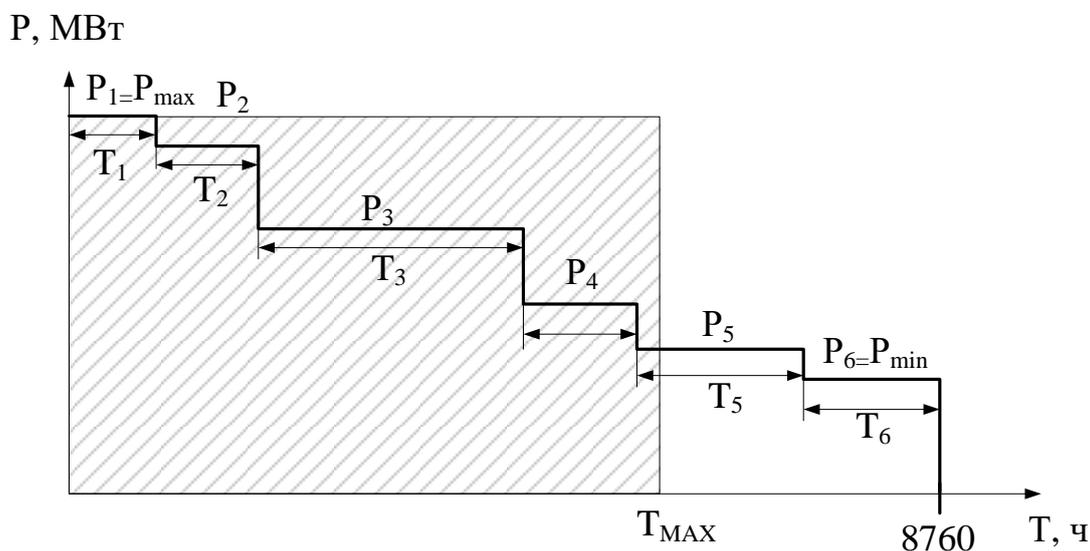


Рис. 1.2. Годовой график продолжительности нагрузок

Построение годового графика продолжительности нагрузок производится на основании известных суточных графиков.

На рис. 1.3 показан способ построения графика при наличии двух суточных графиков нагрузки – зимнего (183 дня) и летнего (182 дня).

Для наиболее распространенных потребителей электроэнергии в справочниках приводятся типовые графики активной и реактивной нагрузок по продолжительности.

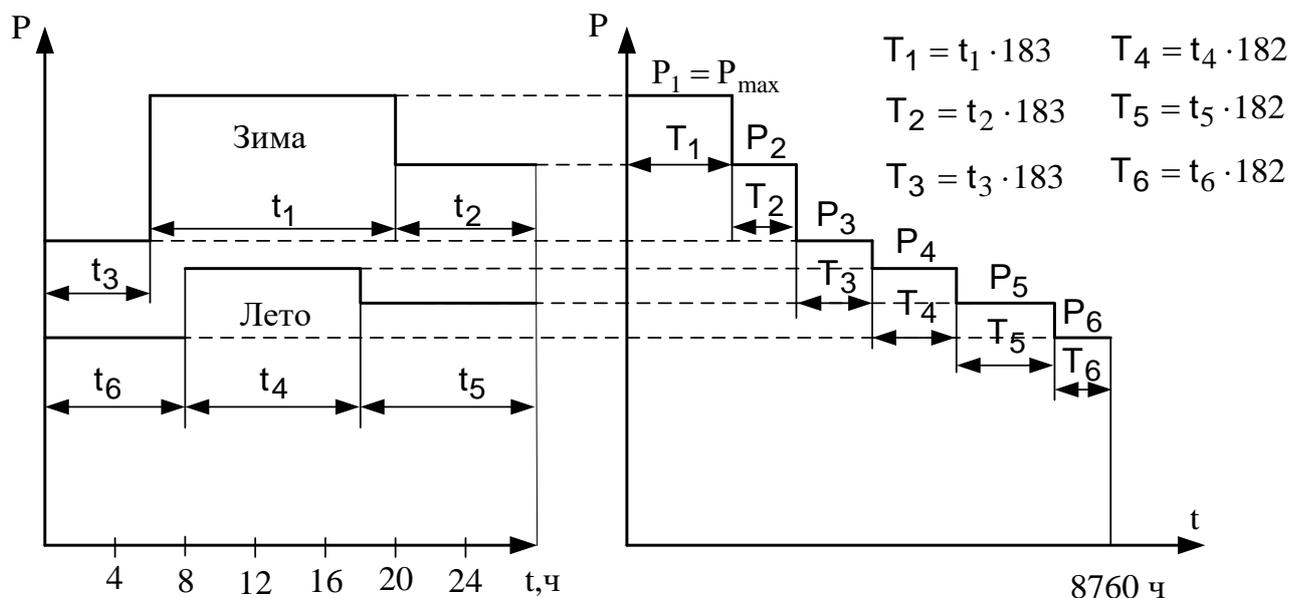


Рис. 1.3. Способ построения годового графика продолжительности нагрузок

Графики активных нагрузок для определения основных технико-экономических показателей установки служат для расчетов потерь электроэнергии, оценки использования оборудования в течение года и т. д.

Технико-экономические показатели, определяемые на основании графиков нагрузки

Площадь, ограниченная кривой графика активной нагрузки (рис. 1.3), численно равна произведенной или потребленной электроустановкой электроэнергии за рассматриваемый период, МВт·ч:

$$W_{\Pi} = \sum_{i=1}^n P_i T_i, \quad (1.2)$$

где P_i – мощность i -й ступени графика, МВт; T_i – продолжительность i -й ступени, ч.

Средняя нагрузка электроустановки за рассматриваемый период, МВт, определяется по формуле:

$$P_{cp} = W / T_{cm} \quad (1.3)$$

где W_i – электроэнергия за рассматриваемый период, МВт·ч; T – длительность рассматриваемого периода, ч.

Коэффициент заполнения графика нагрузки показывает, во сколько раз выработанное (потребленное) количество электроэнергии за рассматриваемый период (сутки, год) меньше того количества энергии, которое было бы выработано (потреблено) за то же время, если бы нагрузка установки все время была максимальной. Разумеется, что чем равномернее график, тем ближе значение к единице.

$$k_{зп} = \frac{P_{ср}}{P_{max}} \quad (1.4)$$

Для характеристики графика нагрузки электроустановки можно воспользоваться также условной продолжительностью максимальной нагрузки:

$$T_{max} = \frac{W_{п}}{P_{max}} = \frac{P_{ср} T}{P_{max}} = k_{зп} T. \quad (1.5)$$

Величина T_{max} показывает, сколько часов за рассматриваемый период T (обычно год) установка должна была бы работать с неизменной максимальной нагрузкой, чтобы выработать (потребить) действительное количество электроэнергии $W_{п}$ за этот период времени. Определение величины T_{max} проиллюстрировано на рис. 1.2.

На практике применяют также коэффициент использования установленной мощности:

$$k_{и} = \frac{W_{п}}{T P_{уст}} = \frac{P_{ср}}{P_{уст}}. \quad (1.6)$$

В формуле (1.6) под $P_{уст}$ следует понимать суммарную установленную мощность всех агрегатов, включая резервные.

Коэффициент использования $k_{и}$ характеризует степень использования установленной мощности агрегатов.

Пример 1. Определение технико-экономических показателей по графику активных нагрузок

Исходные данные для расчета:

На рис. 1.4 изображены суточные графики нагрузок $P = f(t)$ потребителей подстанции (зимний – сплошной, летний пунктирной линией). Мощность представлена в относительных единицах. Максимальная активная мощность $P_{max} = 70$ МВт. Количество зимних и летних дней: $n_з = 165$ дней, $n_л = 200$ дней.

Требуется:

- построить зимний и летний графики нагрузок в именованных единицах;
- построить годовой график продолжительности нагрузок подстанции;
- определить основные технико-экономические показатели.

Решение:

1. Построение графика по продолжительности начинается с максимальной нагрузки подстанции, длительность которой в течение года определяется по летнему суточному графику.

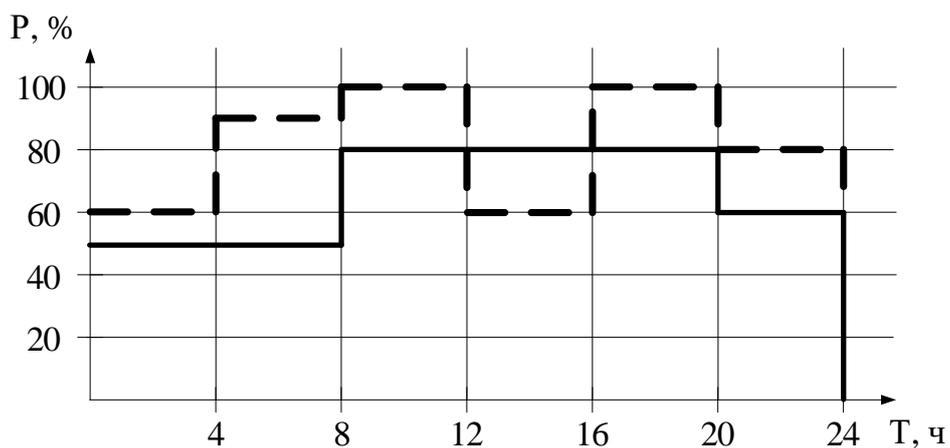


Рис. 1.4. Суточный график активных нагрузок в относительных единицах:
 ———— – зимний график (165 дней); - - - - - летний график (200 дней)

Далее строим график в именованных единицах (рис. 1.5).

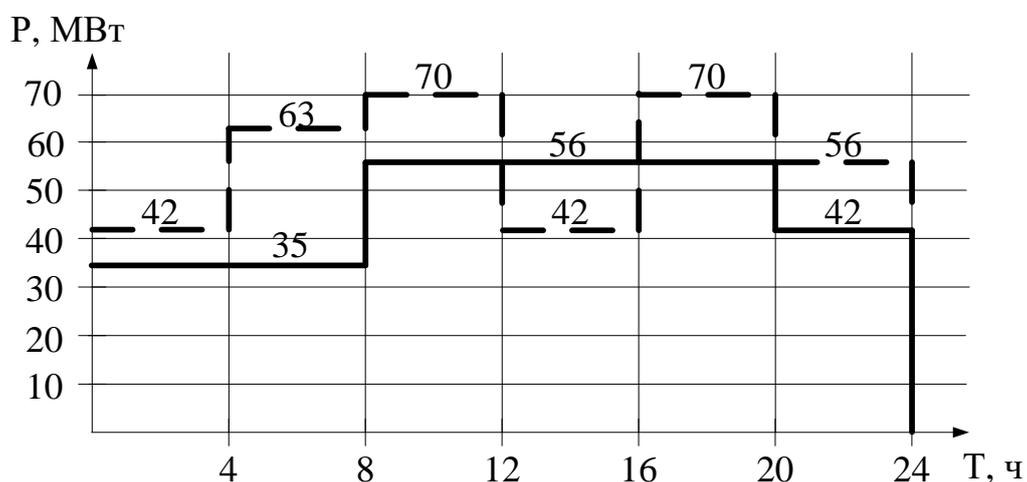


Рис. 1.5. Суточный график активных нагрузок в именованных единицах:
 ———— – зимний график (165 дней); - - - - - летний график (200 дней)

Полученные данные сводим в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Определение величин T_1 , для построения годового графика нагрузок по продолжительности и расчет энергии, отпущенной с подстанции за год

Нагрузка		Продолжительность действия нагрузки, ч		Продолжительность ступени $T_1 = t_3 n_3 + t_{л} n_{л}, ч$	Электроэнергия $W_i = P_i T_i, МВт \cdot ч$
Проц.	МВт	зимней (t_3)	летней ($t_{л}$)		
100	70	–	8	$8 \cdot 200 = 1600$	$70 \cdot 1600 = 112000$
90	63	–	4	$4 \cdot 200 = 800$	$63 \cdot 800 = 50400$
80	56	12	4	$12 \cdot 165 + 4 \cdot 200 = 2780$	$56 \cdot 2780 = 155680$
60	42	4	8	$4 \cdot 165 + 8 \cdot 200 = 2260$	$42 \cdot 2260 = 94920$
50	35	8	–	$8 \cdot 165 = 1320$	$35 \cdot 1320 = 46200$
Итого:				8760	459200

На основании данных табл. 1.1 строим годовой график продолжительности нагрузок (рис. 1.6).

2. На основании годового графика продолжительности нагрузок определяются основные технико-экономические показатели:

- площадь графика, численно равная энергии, МВт·ч, потребленной за год:

$$W_{\Pi} = 459200;$$

- средняя нагрузка за год, рассчитываемая по формуле (1.3)
- коэффициент заполнения, определяемый по формуле (1.4):
- условная продолжительность использования максимальной нагрузки, ч:

$$T_{\max} = 0,749 \cdot 8760 = 6561 \text{ ч.}$$

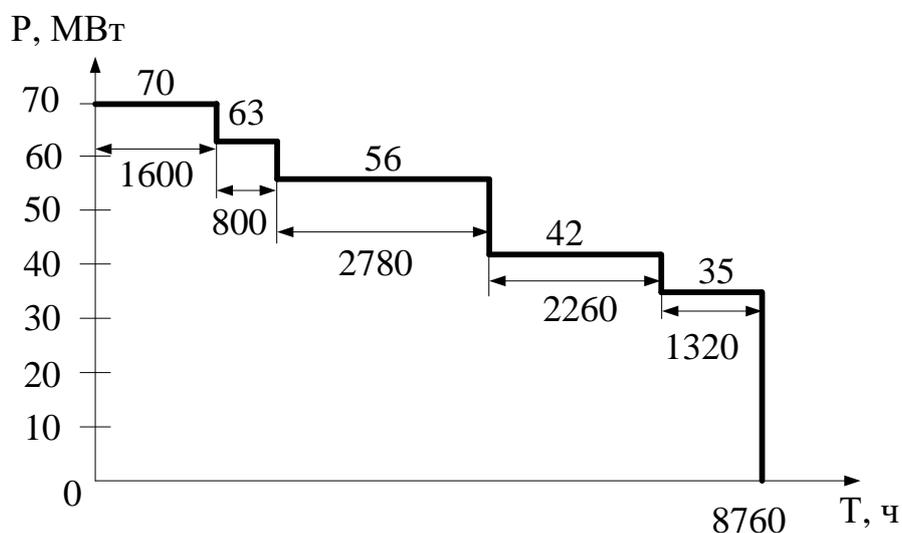


Рис. 1.6. Годовой график продолжительности нагрузок

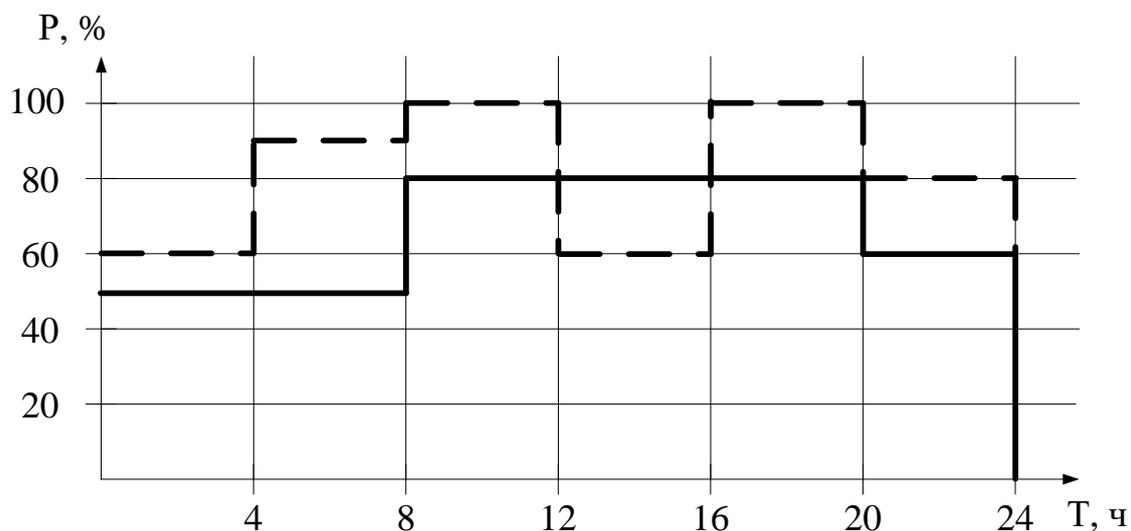
Исходные данные к задаче

Таблица I

Исходные данные для расчета

Параметр	Предпоследняя цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Суточный максимум потребляемой активной мощности P_{\max} , МВт	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Количество летних дней $n_{\text{л}}$	Последняя цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	155	160	165	170	175	155	160	165	170	175

Суточный график активных нагрузок в относительных единицах



Ход работы

- 1) Внимательно изучить теоретические сведения.
- 2) Построить зимний и летний графики нагрузок в именованных единицах;
- 3) Построить годовой график продолжительности нагрузок подстанции;
- 4) Определить основные технико-экономические показатели.
- 5) Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение графиков нагрузки? Их виды.
2. Каков принцип построения годового графика продолжительности нагрузок?
3. Как по графику активных нагрузок можно определить основные технико-экономические показатели?
4. В каком порядке осуществляется расчет условной продолжительности использования максимальной нагрузки?

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 2

«Проверка шинных конструкций на электродинамическую стойкость»

Цель практической работы:

Сформировать знания, умения и навыки в области выполнения расчетов и проверки шинных конструкций на электродинамическую стойкость.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- Шинные конструкции: область применения, основные характеристики

уметь:

- Проводить расчет шинных конструкций на электродинамическую стойкость

Учебная литература по практической работе:

Сибикин, Ю.Д. Эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю.Д. Сибикин. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. - 448 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации

Под *электродинамической стойкостью шинной* конструкции следует понимать свойство конструкции выдерживать без повреждения механические воздействия, создаваемые токами короткого замыкания (КЗ).

Расчет электродинамической стойкости шинных конструкций следует проводить с учетом расчетной механической схемы.

Необходимо различать следующие системы:

- статические, обладающие высокой жесткостью системы, у которых шины и изоляторы при КЗ остаются неподвижными;
- динамические системы с жесткими опорами, у которых при КЗ шины колеблются, а изоляторы можно считать неподвижными;
- динамические системы с гибкими проводами.

Расчетные схемы шинных конструкций различных типов, обладающих высокой жесткостью, имеют вид многопролетной балки, лежащей или закрепленной на жестких опорах и подвергающейся воздействию равномерно распределенной нагрузки. Различают следующие основные типы шинных конструкций и соответствующие им расчетные схемы:

1. Шинные конструкции с разрезными шинами, длина цельных (или сварных) участков которых равна длине пролета. Расчетной схемой пролета таких конструкций служит балка с шарнирным опиранием на обоих опорах пролета. Обычно такой расчетной схеме отвечают шинные конструкции 110 кВ и выше.

2. Шинные конструкции с разрезными шинами, длина которых равна длине двух пролетов. Расчетная схема пролета такой конструкции представляет собой балку с жестким опиранием (заземлением) на одной и шарнирным опиранием на другой опоре пролета. Эта конструкция иногда находит применение в распределительном устройстве (РУ) 110...220 кВ, реже – до 35 кВ.

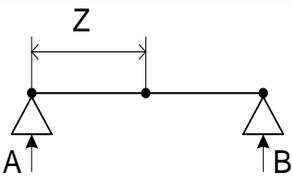
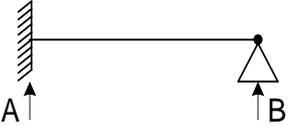
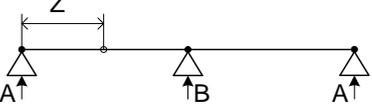
3. Многопролетные конструкции с неразрезанными (цельными или сварными) шинами. Средние пролеты ошиновки отвечают расчетной схеме балки с жестким опиранием (заземлением) на обеих опорах пролета. Конструкции широко используются в РУ до 35 кВ.

4. Шинные конструкции с разрезанными шинами, длина которых равна двум, трем и более пролетам, без жесткого крепления на промежуточных опорах.

Перечисленные выше расчетные схемы шинных конструкций представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Расчетные схемы шинных конструкций

Номер схемы	Расчетная схема	Тип балки и опоры	Коэффициенты		
			λ	β	r_1
1		Однопролетная: А и В – изолятор-опоры	8	1	3,14
2		Однопролетная: А – заземленная шина; В – изолятор-опора	8	1,25	3,93
3		А и В – заземленная шина на жестких опорах	12	1	4,73
4		Балка с двумя пролетами	8	1,25	3,93
5		Балка с тремя и более пролетами	*10 **12	1,13	4,73

Примечание: * – для крайних пролетов; ** – для средних пролетов.

Опоры шин (т. е. изоляторы и основания, на которых они крепятся) в расчетах принимаются упругоподатливыми или абсолютно жесткими. Как правило, опоры можно считать абсолютно жесткими (не учитывающими в колебаниях при КЗ) в РУ напряжением до 35 кВ включительно. В РУ напряжением 110 кВ и выше расчет электродинамической стойкости шинных конструкций следует проводить с учетом упругой податливости опор (изоляторов).

Условия электродинамической стойкости изоляторов и шин

Проверка шинных конструкций на электродинамическую стойкость при КЗ заключается: 1) в расчете максимального механического напряжения в материале; 2) в максимальной нагрузке на изоляторы; 3) и в сравнении полученных значений указанных величин с допустимыми значениями.

Шинная конструкция обладает электродинамической стойкостью, если выполняются условия:

$$F_{\max} \leq F_{\text{доп}}; \quad (2.1)$$

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}; \quad (2.2)$$

Допустимое напряжение в материале жестких шин ($\sigma_{\text{доп}}$), Па, следует принимать равным 70 % от временного сопротивления разрыву материала шин $[\sigma]$. Допустимую нагрузку на изолятор ($F_{\text{доп}}$), Н, следует принимать равной 60 % от минимальной разрушающей нагрузки, приложенной к вершине изолятора при изгибе или разрыве:

$$\sigma_{\text{доп}} = 0,7 [\sigma_{\text{раз}}], \quad (2.3)$$

$$F_{\text{доп}} = 0,6 F_{\text{раз}}. \quad (2.4)$$

Справочные данные для определения допустимого механического напряжения в материале шин и допустимую нагрузку на изоляторы рекомендуется определять по справочным таблицам.

При проверке на электродинамическую стойкость шинной конструкции, обладающей высокой жесткостью, шину в любом пролете между изоляторами, кроме крайних, следует рассматривать как стержень (балку) с заземленными концами (табл. 2.1). Наличие ответвлений допускается не учитывать, поскольку они снижают расчетные напряжения в материале шин и нагрузки в изоляторах.

Порядок расчета электродинамической стойкости шинных конструкций с жесткими опорами

Расчет изоляторов и шин, расположенных в одной плоскости (рис. 2.1), проводится в следующей последовательности.

2.3.1. Расчет первой (основной) частоты собственных колебаний шины, Гц:

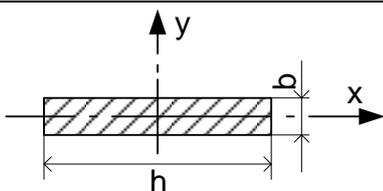
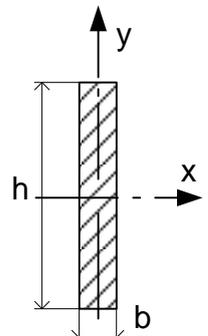
$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \quad (2.5)$$

где r_1 – параметр основной частоты собственных колебаний шины (табл. 2.1); L – длина пролета между опорными изоляторами, м; E – модуль упругости материала шин (для алюминия и его сплавов $E \approx 7 \cdot 10^{10}$ Па; для меди $E \approx$

$\approx 10 \cdot 10^{10}$ Па); J – момент инерции поперечного сечения шины, м^4 (табл. 2.2); m – масса шины на единицу длины, кг/м .

Таблица 2.2

Формулы для определения момента инерции J и момента сопротивления W поперечных сечений шин

Сечения шин	Расчетные формулы	
	$J, \text{м}^4$	$W, \text{м}^3$
	$J_y = \frac{b h^3}{12}$	$W_y = \frac{b h^2}{6}$
	$J_y = \frac{h b^3}{12}$	$W_y = \frac{h b^2}{6}$

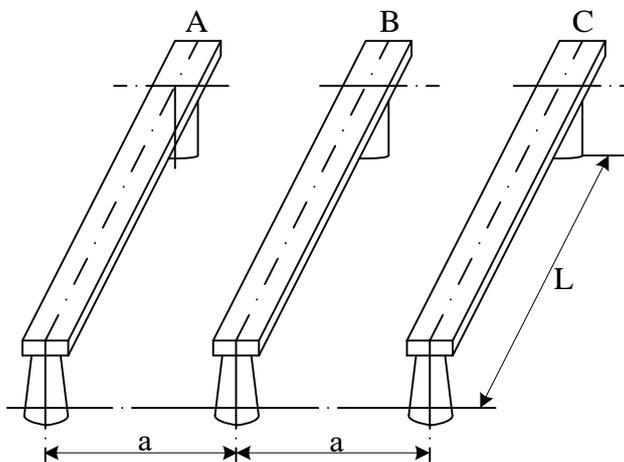


Рис. 2.1. Шины, расположенные в одной плоскости

2.3.2. Определение динамического коэффициента η , характеризующего увеличение напряжения в материале шин при учете динамического воздействия.

Если основная частота собственных колебаний шины $f_1 > 200$ Гц, то динамический коэффициент принимают равным 1. Если частота $f_1 < 200$ Гц, то динамический коэффициент находят по кривой (рис. 2.2) в зависимости от отношения f_1/f_c , где $f_c = 50$ Гц – частота тока в сети.

2.3.3. Определение наибольших (расчетных) удельных электродинамических нагрузок при трехфазном КЗ:

$$F_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} \cdot l \cdot (i_{y\delta}^{(3)})^2 \cdot K_{\phi} \cdot K_{расч} \quad (2.6)$$

где $i_{y\delta}$ – ударный ток короткого замыкания, А;

$K_{расч}$ – коэффициент, зависящий от взаимного расположения проводников;

a – расстояние между осями проводников, м;

l – длина пролета, м;

$$i_{уд} = k_{уд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{п} \quad (2.7)$$

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \quad (2.8)$$

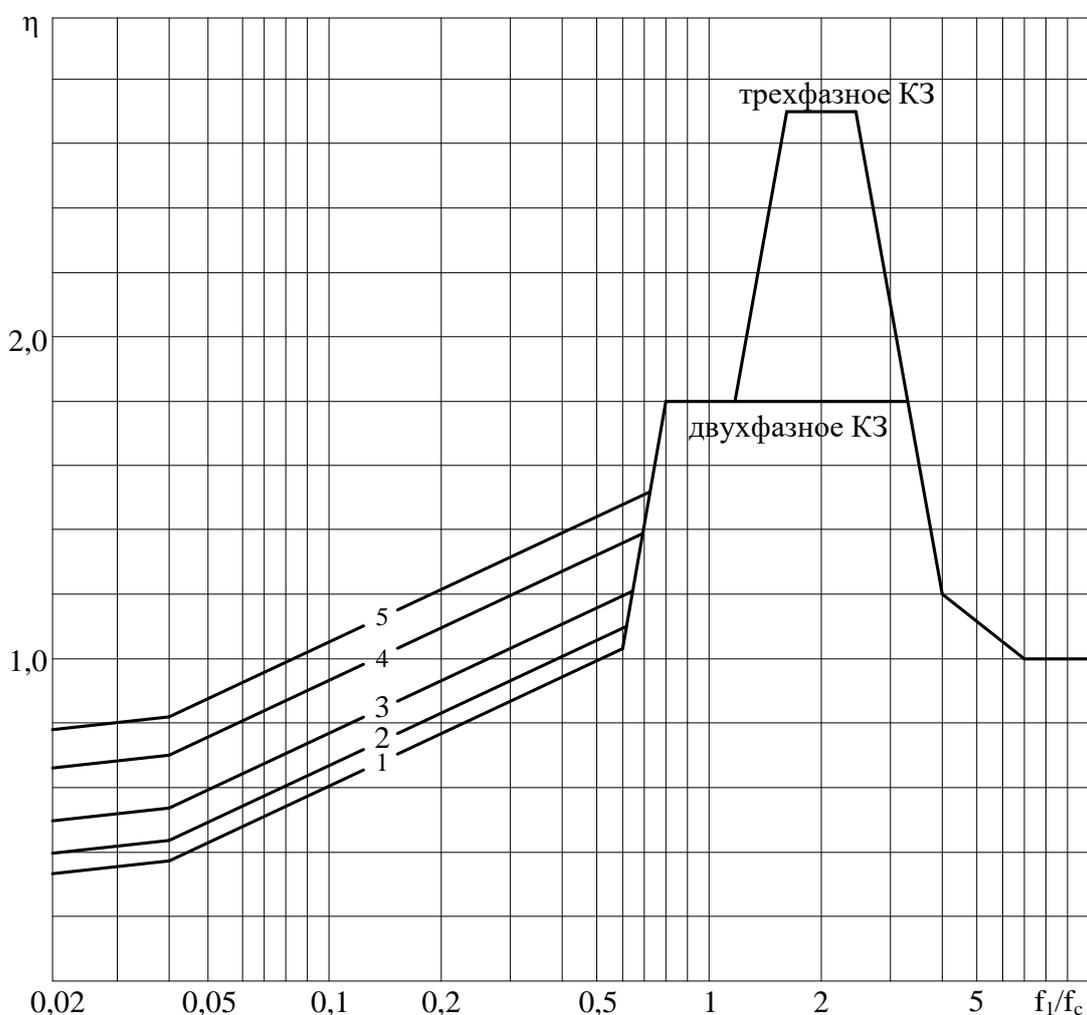


Рис. 2.2. Зависимость динамического коэффициента для изоляторов и шин от частоты собственных колебаний шины: кривая 1 – при $K_{уд} \geq 1,60$; кривая 2 – при $K_{уд} \geq 1,40$; кривая 3 – при $K_{уд} \geq 1,25$; кривая 4 – при $K_{уд} \geq 1,10$; кривая 5 – при $K_{уд} \geq 1,00$

2.3.4. Определение максимального напряжения в материале шины:

$$\sigma_{\max} = q_{\max} L^2 \frac{\eta}{\lambda W} k_{\phi}, \quad (2.9)$$

где λ – параметр (см. табл. 2.1); W – момент сопротивления поперечного сечения шины, м^3 (см. табл. 1.2); k_{ϕ} – коэффициент формы (рис. 2.3).

Для того чтобы определить коэффициент формы для заданной марки шины, необходимо найти отношения $\frac{b}{h}$ и $\frac{a-h}{b+h}$. Далее по кривой, соответствующей от-

ношению $\frac{b}{h}$, и ординате, соответствующей отношению $\frac{a-h}{b+h}$, определяют коэффициент формы.

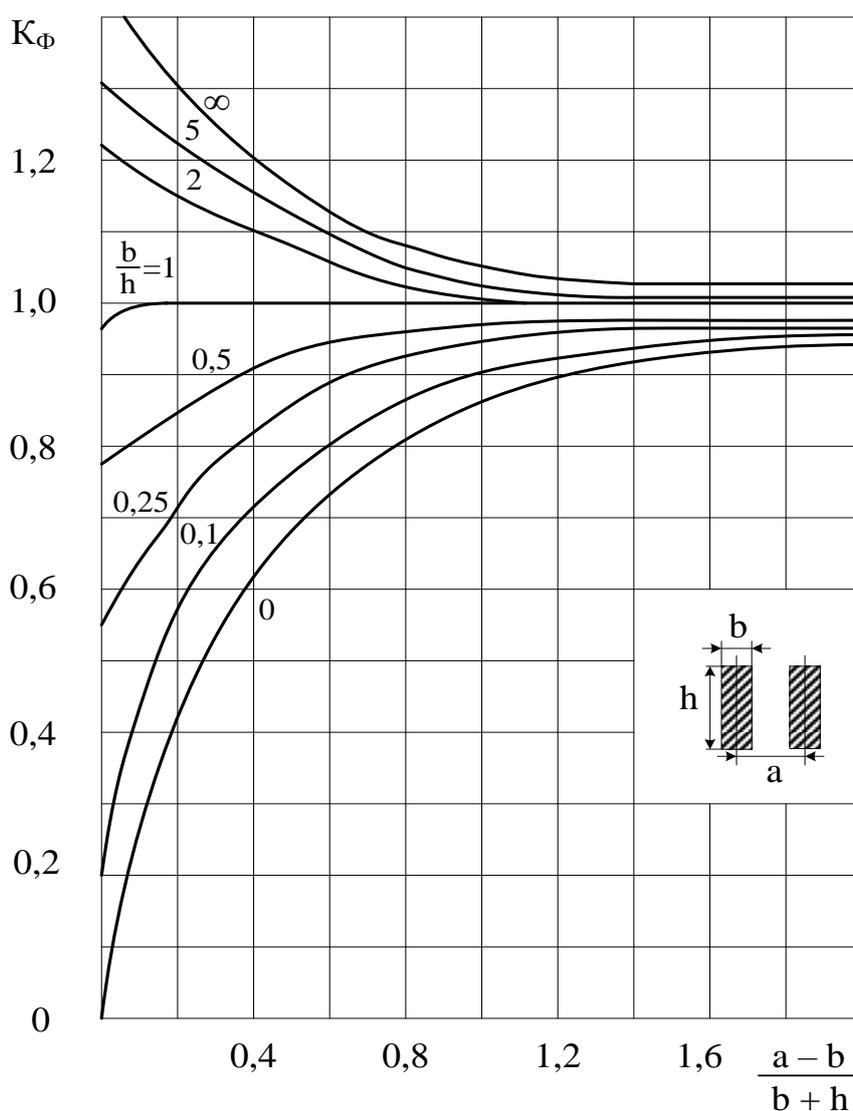


Рис. 2.3. Диаграмма для определения коэффициента формы шин прямоугольного сечения

После определения максимального напряжения в материале шины проверяют выполнение условия по формуле (2.1).

Проверка шинной конструкции на электродинамическую стойкость

Исходные данные для расчета:

Имеется двухпролетная трехфазная система жестких шин, материал шин – медь, расстояние между осями проводников отдельных фаз составляет $a = 1,1$ м; длина пролета между опорными изоляторами $L = 0,8$ м, сверхпереходной ток $I'' = 28$ кА; шины расположены в одной плоскости, имеют прямоугольное сечение 80/10 мм.

Требуется:

- проверить шинную конструкцию на электродинамическую стойкость в режиме короткого замыкания для крепления шины «плашмя»;
- определить соответствие условиям электродинамической стойкости марки материала шин МГМ и изоляторов типа ОНСУ-350 УХЛ, Т1, из которых собрана данная шинная конструкция.

Решение:

1. Составляется расчетная схема.

При проверке на электродинамическую стойкость шинной конструкции, обладающей высокой жесткостью, шину в любом пролете между изоляторами, кроме крайних, следует рассматривать как стержень (балку) с заземленными концами. Принимаем расчетную схему балки с жестким опиранием на обеих опорах пролета (рис. 2.4) в соответствии с подразд. 2.1.



Рис. 2.4. Расчетная схема шинной конструкции

2. Для того чтобы рассчитать основную частоту собственных колебаний шины, необходимо найти момент инерции, m^4 , по формуле [см. табл. 2.2 и расчетную схему (рис. 2.4)]:

$$J_y = \frac{0,08 \cdot 0,01^3}{12} = 6,67 \cdot 10^{-9};$$

- для соответствующей шинной конструкции необходимо определить массу. Для медной шины размером 80×10 масса на единицу длины: $m = 7,12$ кг/м ;
- $r_1 = 4,73$ (см. табл. 2.1);
- модуль упругости материала (меди) $E = 10 \cdot 10^{10}$ Па.

Тогда основная частота собственных колебаний шины:

$$f_1 = \frac{4,73^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,8^2} \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{10} \cdot 6,67 \cdot 10^{-9}}{7,12}} = 53,877 \approx 54 \text{ Гц.}$$

3. Для того чтобы определить динамический коэффициент η , необходимо определить зависимость:

$$\frac{f_1}{f_c} = \frac{54}{50} = 1,08.$$

Ударный коэффициент определяется по формуле (2.8) при $T_a = 0,05$:

$$k_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,05}} = 1,82.$$

Динамический коэффициент определяется по графику (рис. 2.2):

$$\eta = 1,8.$$

4. Далее по формуле (2.7) находится ударный ток трехфазного КЗ, кА:

$$i_{уд}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 28 \cdot 10^3 \cdot 1,82 = 72.$$

5. Затем определяется наибольшая электродинамическая нагрузка, Н/м:

$$q_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^7 \cdot 72000^2}{1,1} = 816,2.$$

6. Для того чтобы вычислить максимальное напряжение в материале шин, необходимо рассчитать:

а) момент сопротивления шин поперечного сечения, м³,

$$W_y = \frac{0,08 \cdot 0,01^2}{6} = 1,33 \cdot 10^{-6},$$

б) коэффициент формы:

$$\frac{h}{b} = \frac{0,01}{0,08} = 0,125; \quad \frac{a-b}{b+h} = \frac{1,1-0,01}{0,08+0,01} = 12,1.$$

В соответствии с рис. 2.3 $k_\phi = 1$.

Затем определяется максимальное напряжение в материале шин, МПа:

$$\sigma_{max} = 816,2 \cdot 0,8^2 \frac{1,8}{12 \cdot 1,33 \cdot 10^{-6}} = 58,91 \cdot 10^6.$$

7. Рассчитывается максимальная нагрузка на изоляторы, Н:

$$F_{max} = 1 \cdot 816,2 \cdot 0,8 \cdot 1,8 \cdot 0,95 = 1116,6$$

при $\beta = 1$ (см. табл. 2.1).

Вывод

В соответствии с руководящими указаниями допустимое напряжение материала медных шин марки МГМ (см. справочные данные) составляет $\sigma_{\text{доп}} = 171,8...178$ МПа. Из условия электродинамической стойкости следует, что $\sigma_{\text{max}} < \sigma_{\text{аіі}}$.

Поскольку $59 \text{ МПа} < 171 \text{ МПа}$, следовательно, первое условие электродинамической стойкости выполняется.

Затем определяется минимальная механическая разрушающая сила на изгиб для изолятора ОНСУ-350 УХЛ, Т1 (равная 3,5 кН) по справочным данным.

Из уравнения (2.4) следует, что

$$F_{\text{max}} \leq F_{\text{доп}} = 0,6 F_{\text{разр}}; \quad 1116,6 \text{ Н} < 2100 \text{ Н},$$

следовательно, второе условие выполняется

Поскольку оба условия выполняются, то шинная конструкция при креплении шины «плашмя» удовлетворяет требованиям электродинамической стойкости.

Исходные данные к задаче

Вариант	Параметр				
	I', кА	Размеры шины, мм	L, м	a, м	Материал шин
1	5	40×4	0,7	0,6	Cu
2	5,5	40×5	0,74	0,65	Al
3	6	50×5	0,78	0,7	Cu
4	6,5	50×6	0,82	0,75	Al
5	7	60×6	0,86	0,8	Cu
6	7,5	60×8	0,9	0,85	Al
7	8	60×10	0,94	0,9	Cu
8	8,5	80×6	0,98	0,95	Al
9	9	80×8	1,02	1	Cu
10	9,5	80×10	1,06	1,05	Al
11	10	100×6	1,1	1,1	Cu
12	10,5	100×8	1,14	1,15	Al
13	11	100×10	1,18	1,2	Cu
14	11,5	40×4	1,22	0,6	Al
15	12	40×5	1,26	0,65	Cu
16	12,5	50×5	1,3	0,7	Al
17	13	50×6	1,34	0,75	Cu
18	13,5	60×6	1,38	0,8	Al
19	14	60×8	1,42	0,85	Cu
20	14,5	60×10	1,46	0,9	Al
21	15	80×6	1,5	0,95	Cu
22	15,5	80×8	0,7	1	Al
23	16	80×10	0,74	1,05	Cu

24	16,5	100×6	0,78	1,1	Al
25	17	100×8	0,82	1,15	Cu
26	17,5	100×10	0,86	1,2	Al
27	18	40×4	0,9	0,6	Cu
28	18,5	40×5	0,94	0,65	Al
29	19	50×5	0,98	0,7	Cu
30	19,5	50×6	1,02	0,75	Al

Ход работы

- 1) Внимательно изучить теоретические сведения
- 2) Произвести расчеты согласно выбранному варианту
- 3) Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под электродинамической стойкостью, расчетными видами КЗ и в чем их физический смысл?
2. Какие существуют способы увеличения электродинамической стойкости?
3. Какие существуют виды расчетных схем шинной конструкции?
4. Как влияет схема взаимного расположения шин на электродинамическую стойкость?
5. Какими условиями определяется электродинамическая стойкость шинной конструкции?

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 3

«Нагрев токоведущих частей при коротком замыкании»

Цель практической работы:

Сформировать знания, умения и навыки в области выполнения расчетов и подбора шин прямоугольного сечения по наибольшему допустимому току.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- воздействие тока короткого замыкания на проводники и токоведущие части

уметь:

- рассчитывать допустимый ток

Учебная литература по практической работе:

Сибикин, Ю.Д. Эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю.Д. Сибикин. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. - 448 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации

При протекании тока короткого замыкания (КЗ) температура проводников и токоведущих частей электрических аппаратов повышается. Поскольку ток КЗ значительно превышает ток рабочего режима, то нагрев может достигать опасных значений, превышающих наибольшие допустимые температуры. Критерием термической стойкости проводников является допустимая температура его нагрева токами КЗ.

Предельные значения допустимых температур нагрева при КЗ устанавливаются с учетом снижения механических свойств проводниковых материалов, изолирующих свойств изоляционных материалов, а также надежности работы контактных систем при повышении их температуры. Значительное повышение температуры влияет на снижение временного сопротивления разрыву проводников материалов и пробивного напряжения изоляции, а также на интенсивное окисление контактов аппаратов и контактных (особенно болтовых) соединений проводников. Длительное повышение температуры сокращает срок службы изоляции, приводит к её плавлению или обугливанию.

Условия проверки

Для проверки проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость при КЗ предварительно должны быть выбраны не только исходная расчетная схема и расчетная точка КЗ, но и расчетный вид КЗ и расчетная продолжительность КЗ.

Расчетным видом КЗ при проверке проводников и электрических аппаратов электроустановок напряжением 110 кВ и выше является трех- или однофазное КЗ, в электроустановках свыше 1 кВ – вплоть до 35 кВ (трехфазное КЗ), а в электроустановках генераторного напряжения электростанций – трехфазное или двухфазное КЗ в зависимости от того, какое из них приводит к большему термическому воздействию.

Расчетную продолжительность КЗ при проверке проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость при КЗ следует определять сложением времени действия основной релейной защиты, в зону действия которой входят проверяемые проводники и аппараты, и полного времени отключения ближайшего к месту КЗ выключателя, а при проверке кабелей на невозгораемость – сложением времени действия резервной релейной защиты и полного времени отключения соответствующего выключателя.

Проверка проводников на термическую стойкость при коротком замыкании заключается в определении их температуры нагрева к моменту отключения КЗ и сравнении этой температуры с предельно допустимой температурой нагрева при КЗ.

Проводник удовлетворяет условию термической стойкости, если температура нагрева проводника к моменту отключения КЗ ϑ_k не превышает предельно допустимую температуру нагрева соответствующего проводника при КЗ $\vartheta_{k, \text{доп}}$, т. е., если выполняется условие:

$$\vartheta_k \leq \vartheta_{k, \text{доп}}. \quad (3.1)$$

Исходя из этого условия, для проверки сборных шин жесткой конструкции на термическую стойкость при коротких замыканиях необходимо:

- выбрать по наибольшему длительному току сборные шины жесткой конструкции;
- проверить по условию термической стойкости в режиме короткого замыкания сборные шины жесткой конструкции.

Порядок расчета термической стойкости сборных шин жесткой конструкции

Расчет термической стойкости сборных шин проводится в следующей последовательности:

3.3.1. По заданному длительному току нагрузки ($I_{\text{доп.ном}}$) необходимо принять сечение прямоугольных сборных шин S , мм².

Допустимые токовые нагрузки на голые шины стандартных сечений приведены в справочных материалах при температуре окружающей среды +25 °С. При отклонении температуры окружающей среды от нормативной +25 °С необходимо произвести перерасчет допустимого тока для шин стандартного сечения по формуле:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.ном}} \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{дл.доп}} - \vartheta_0}{\vartheta_{\text{дл.доп}} - \vartheta_{0\text{нор}}}}, \quad (3.2)$$

где $I_{\text{доп.ном}}$ – допустимый ток на шину при температуре окружающей среды $\vartheta_{0\text{нор}} = 25\text{ }^\circ\text{C}$. При расположении шин поперечного сечения «плашмя» токи должны быть уменьшены на 5 % для шин с шириной полос до 60 мм и на 8 % – для шин шириной полос более 60 мм; ϑ_0 – действительная температура окружающей среды; – длительно допустимая температура нагрева шин.

По найденному длительно допустимому току определяются размеры шинной конструкции.

3.3.2. Определяется тепловой импульс (интеграл Джоуля), $\text{A}^2\cdot\text{с}$, для шинной конструкции по формуле:

$$V_k = (I'')^2 (t_k + T_a), \quad (3.3)$$

где t_k – расчетная продолжительность КЗ, T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, рассчитываемая по формуле:

$$T_a = \frac{x_\Sigma}{314 R_\Sigma} \quad (3.4)$$

Бывают случаи, когда по условию задачи время отключения выключателя не дается, тогда необходимо расчетную продолжительность КЗ приравнять к времени срабатывания защиты.

3.3.3. По кривым, характеризующим зависимость температуры нагрева проводника, в режиме короткого замыкания от теплового параметра $A = f(\vartheta_k)$ (рис. 3.1) необходимо найти нагрев принятого сечения сборных шин в режиме КЗ.

$$A = \frac{B}{S^2 * A_i} \quad (3.5)$$

Параметр A_i необходимо принимать по кривым рис. 3.1 для длительно допустимой температуры нагрева проводника перед моментом возникновения короткого замыкания (ϑ_H).

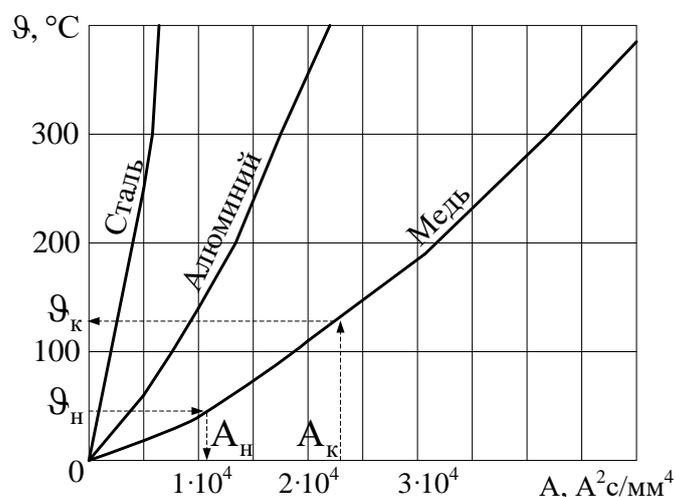


Рис. 3.1. Кривые для определения нагрева токоведущих частей электрических аппаратов

Температуру, до которой нагрета шина перед моментом КЗ (ϑ_H), необходимо найти по формуле:

$$\vartheta_H = \vartheta_{\text{ср}} + (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_{\text{ср}}) \left(\frac{I_{\text{раб}}}{I_{\text{доп}}} \right)^2, \quad (3.6)$$

где ϑ_1 – начальная температура проводника в момент возникновения режима КЗ, °С (рис. 3.2); $\vartheta_{\text{доп}}$ – температура окружающей среды, °С; $\vartheta_{\text{аіі}}$ – допустимая температура нагрева проводника максимальным рабочим током, °С

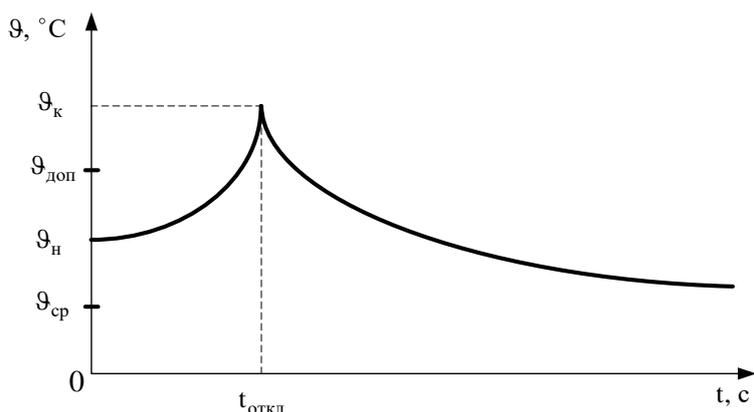


Рис. 3.2. Диаграмма изменения температуры проводника при нагреве его током КЗ

Из диаграммы (рис. 3.2) следует, что надежная работа проводников электроустановки в нормальном режиме может быть обеспечена только при условии $\vartheta_{\text{к}} < \vartheta_{\text{к.доп}}$.

После найденного значения ϑ_1 по рис. 3.1 определяется параметр A_1 .

Формула (3.5) позволяет найти конечное значение теплового параметра для шинной конструкции, выполненной из известного материала.

Следующим шагом является обратная операция определения температуры по известному тепловому параметру (см. рис. 3.1), а также сравнение предельно допустимой температуры нагрева проводника с температурой, определенной в ходе расчетов.

При невыполнении условия $\vartheta_{\text{к}} < \vartheta_{\text{к.доп}}$ необходимо увеличить принятое сечение до значения, удовлетворяющего указанному выше условию, для чего необходимо воспользоваться упрощенной методикой определения сечения проводника и произвести расчет в следующей последовательности:

- определить минимально допустимое по условию термической устойчивости при коротком замыкании сечение шины, мм², по следующей формуле:

$$S_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{C}, \quad (3.7)$$

где параметр C ($A \cdot c^{1/2}/mm^2$) принимать для заданного материала шин по исходным данным и по справочным данным.

- с учетом расчетного параметра S_{min} принимается ближайшее большее стандартное сечение шины и допустимый ток для этого сечения;
- для принятого сечения находится начальная, перед коротким замыканием, температура нагрева шины по формуле (3.6);
- по формуле (3.5) и графику (рис. 3.1) для начальной температуры нагрева шины сечением $S_{прин}$ и ϑ_n находится температура нагрева ϑ_k вновь принятого сечения шины током короткого замыкания, которая затем сравнивается с допустимой $\vartheta_{к\cdot доп}$.

Пример 3. Проверка шинной конструкции на термическую стойкость

Исходные данные для расчета:

Допустимый расчетный ток – $I_{дл} = 1200$ А.

Сверхпереходной ток КЗ – $I'' = 45$ кА.

Время действия основной защиты – $t_з = 0,9$ с.

Температура окружающей среды – 35 °С.

Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока трехфазного КЗ – $T_a = 0,05$ с.

Положение шин – шины установлены на ребро.

Материал шины – медь.

Требуется:

- выбрать по наибольшему допустимому току шинную конструкцию, выполненную из меди;
- проверить по термической стойкости сборные шины жесткой конструкции в режиме короткого замыкания.

Решение:

1. Выбор шин.

Допустимые длительные токи для медных шин приняты из расчета длительно допустимой температуры их нагрева: $\vartheta_{доп} = +70$ °С, при температуре воздуха

$\vartheta_{ср.ном} = +25$ °С.

В соответствии с этим уточняется значение допустимого расчетного тока для шин, A , по формуле (3.2):

$$I_{доп} = 1200 \sqrt{\frac{70-35}{70-25}} = 1058,25.$$

Выбираются медные шины сечением $S = 60 \times 6 = 360$ мм², с длительно допустимым током $I_{доп} = 1125$ А.

2. Далее определяется тепловой импульс для шинной конструкции.

Для определения теплового импульса необходимо знать расчетную продолжительность КЗ.

В качестве коммутационного аппарата принят вакуумный выключатель ВВ/TEL-10-20/1600 У2 (выключатель вакуумный напряжением 10 кВ; номинальный ток – 1600 А; полное время отключения не более 55 мс, $t_{отк} = 0,055$ с).

Расчетная продолжительность КЗ, с, находится по формуле (3.4):

$$t_k = 0,055 + 0,9 = 0,955.$$

Тогда тепловой импульс, $A^2 \cdot c$,

$$W_{\hat{e}} = (45000)^2 (0,955 + 0,05) = 2035 \cdot 10^6.$$

Для определения начальной температуры шины, $^{\circ}C$, при токовой нагрузке 1058,25 А используется формула (3.6):

$$\vartheta_H = 35 + (70 - 35) \left(\frac{1058,25}{1125} \right)^2 = 65,96.$$

3. По кривым рис. 3.1 определяется параметр A_H ; для начальной температуры нагрева шин $\vartheta_H = 65,96$ $^{\circ}C$, который для медных шин, $A^2 \cdot c / \text{мм}^4$, составляет $A_H = 1,15 \cdot 10^4$.

4. Далее по формуле (3.5) находится температура нагрева проводника к моменту отключения КЗ, $A^2 \cdot c / \text{мм}^4$:

$$A_K = 1,15 \cdot 10^4 + \frac{2035 \cdot 10^6}{480^4} = 2,033 \cdot 10^4.$$

По кривым рис. 3.1 определяется температура нагрева проводника к моменту отключения КЗ, которая при данных условиях составляет 110 $^{\circ}C$.

Далее определяется предельно допустимая температура нагрева медной шины при коротких замыканиях (для меди она равна 300 $^{\circ}C$):

По наибольшему допустимому току была подобрана шина прямоугольного сечения, размером $S = 60 \times 6 = 360$ мм^2 .

Расчет показал, что конечная температура нагрева шин меньше предельно допустимой, следовательно, данная шинная конструкция удовлетворяет условию термической стойкости.

Исходные данные к задаче

Вариант	Параметр					
	$I_{дл}$, А	I' , кА	t_3 , с	$\tau_{н\delta}$, $^{\circ}C$	T_a , с	Материал шин
1	200	5	0,3	49	0,04	Al
2	250	5,5	0,4	48	0,045	Cu
3	300	6	0,5	47	0,05	Al
4	350	6,5	0,6	46	0,055	Cu
5	400	7	0,7	45	0,06	Al
6	450	7,5	0,8	44	0,04	Cu

7	500	8	0,9	43	0,045	Al
8	550	8,5	1	42	0,05	Cu
9	600	9	1,1	41	0,055	Al
10	650	9,5	1,2	40	0,06	Cu
11	700	10	1,3	39	0,04	Al
12	750	10,5	1,4	38	0,045	Cu
13	800	11	1,5	37	0,05	Al
14	850	11,5	0,3	36	0,055	Cu
15	900	12	0,4	35	0,06	Al
16	950	12,5	0,5	34	0,04	Cu
17	1000	13	0,6	33	0,045	Al
18	1050	13,5	0,7	32	0,05	Cu
19	1100	14	0,8	31	0,055	Al
20	1150	14,5	0,9	30	0,06	Cu
21	1200	15	1	29	0,04	Al
22	1250	15,5	1,1	28	0,045	Cu
23	1300	16	1,2	27	0,05	Al
24	1350	16,5	1,3	26	0,055	Cu
25	1400	17	1,4	25	0,06	Al
26	1450	17,5	1,5	24	0,04	Cu
27	1500	18	0,3	23	0,045	Al
28	1550	18,5	0,4	22	0,05	Cu
29	1600	19	0,5	21	0,055	Al
30	1650	19,5	0,6	20	0,06	Cu

Ход работы

- 1) Внимательно изучить теоретические сведения
- 2) Произвести расчеты согласно выбранному варианту
- 3) Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается физический смысл термического действия токов короткого замыкания?
2. Как влияют параметры короткого замыкания на термическую стойкость оборудования?
3. Какими способами можно увеличить термическую стойкость электрических аппаратов и проводников?
4. В каком порядке осуществляется проверка шинной конструкции на термическую стойкость?

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 4

«Выбор сечения шин открытого участка токопровода в цепи генератора по условию продолжительного режима работы»

Цель практической работы:

Сформировать знания, умения и навыки в области выполнения расчетов и определения экономического сечения шины в цепи генератора по условию продолжительного режима работы.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- продолжительный режим: определение и характеристики
- расчетов токов при продолжительной работе оборудования;

уметь:

- рассчитывать экономическое сечение шин.

Учебная литература по практической работе:

Сибикин, Ю.Д. Эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю.Д. Сибикин. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. - 448 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации

Электрооборудование выбирают по условиям продолжительных режимов и проверяют по условиям кратковременных режимов (КЗ различных видов, обрывы проводов, нарушение устойчивости параллельной работы и т. д.), определяющим из которых, как правило, является режим КЗ. При этом необходимо располагать расчетными условиями, параметрами и технико-экономическими характеристиками выпускаемого и осваиваемого перспективного электрооборудования. Под расчетными понимается наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия, в которых может оказаться электрический аппарат или проводник при различных режимах работы в электроустановках.

Выбор сечения шин и токоведущих частей – важная задача на этапе проектирования объектов электроэнергетики, поскольку от сечения шин и токопроводов напрямую зависят приведенные затраты. При малых значениях сечения в процессе эксплуатации материал токопровода будет перегреваться, что приведет к ускоренному износу (даже повреждениями) и, как следствие, увеличению эксплуатационных расходов. Большие значения сечения требуют соответствующих капитальных вложений, т. к. увеличивается расход материала. Среднее значение площади сечения, при котором наблюдается минимум приведенных затрат, называется *экономической площадью сечения*.

Порядок расчета сечения шин открытого участка токопровода в цепи генератора

Порядок расчёта необходимо произвести в следующей последовательности.

4.2.1. Определение экономической площади сечения производится на основе параметров длительного рабочего режима и экономической плотности тока:

$$S_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{раб.мах}}}{j_{\text{эк}}}, \quad (4.1)$$

Где $I_{\text{раб.мах}}$ – максимальный рабочий ток генератора, А; $j_{\text{эк}}$ - экономическая плотность тока, А/мм².

4.2.2. Утяжеленный режим работы у генераторов практически отсутствует, так как продолжительная перегрузка по току не превышает 5 %:

$$I_{\text{раб.мах}} = 1,05 I_{\text{раб.ном}}, \quad (4.2)$$

где $I_{\text{раб.ном}}$ – номинальный рабочий ток генератора, А.

Номинальный рабочий ток рассчитывается с использованием паспортных данных генератора:

$$I_{\text{раб.ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos\varphi}, \quad (4.3)$$

Экономическая плотность тока не зависит от параметров режима работы и определяется в зависимости от времени действия наибольшей нагрузки за год.

4.2.3. Время наибольшей нагрузки, ч, определяется по заданному суточному графику нагрузки:

$$T_{\text{наиб}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_{\text{зи}} \Delta t_i \right) n_{\text{з}} + \left(\sum_{i=1}^n P_{\text{ли}} \Delta t_i \right) n_{\text{л}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (4.4)$$

4.2.4. Из справочных данных выбирается значение экономической плотности тока.

4.2.5. Из справочных данных по рассчитанному сечению подбираем ближайшее из номинального ряда значений сечение, вид и материал шин. Для подбора необходимого сечения возможно использование параллельного соединения нескольких секций на фазу так, чтобы суммарное сечение было как можно ближе к расчетному.

4.2.6. Выбранную шинную конструкцию необходимо проверить по длительно допустимому току по условию:

$$n_{\text{ш}} I_{\text{доп}} \geq I_{\text{раб.мах}}, \quad (4.5)$$

$n_{\text{ш}}$ - количество секций шин, работающих в параллель.

Если шина не удовлетворяет условию длительно допустимого тока, то необходимо увеличить количество шин.

Пример 4. Выбор сечения шин открытого участка токопровода в цепи генератора по условию продолжительного режима работы

Требуется подобрать сечение, материал и тип шины открытого участка токопровода в цепи генератора ТГВ-500 – 4У3, используя суточный график нагрузки (рис. 4.2).

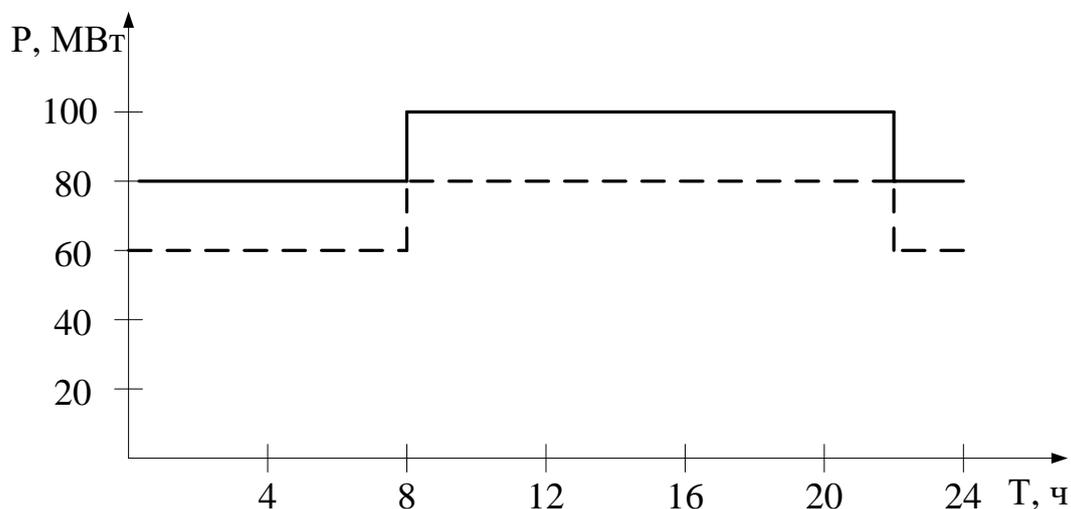


Рис. 4.2. Суточный график нагрузки: ———— – зимний график (200 дней); - - - - летний график (165 дней)

Исходные данные для расчета:

Суточный график нагрузки.

Определяются следующие паспортные данные генератора ТГВ-500 – 4У3, необходимые для расчета:

- номинальная активная мощность генератора $P_{\hat{i}\hat{i}} = 500 \text{ МВт}$;
- номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 20 \text{ кВ}$;
- коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,85$.

Требуется:

Подобрать сечение, материал и тип шины открытого участка токопровода в цепи генератора ТГВ-500 – 4У3.

Решение:

1. Расчетный ток генератора в нормальном режиме, А, определяется по формуле:

$$I_{\text{раб.ном}} = \frac{500 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,85} = 16980,1.$$

2. Максимальный рабочий ток, А:

$$I_{\text{раб.мах}} = 1,05 \cdot 16980,1 = 17829,9.$$

3. Время наибольшей нагрузки определяется по суточному графику, ч:

$$T_{\text{наиб}} = \frac{(80 \cdot 10^6 \cdot 10 + 100 \cdot 10^6 \cdot 14) 200 + (60 \cdot 10^6 \cdot 10 + 80 \cdot 10^6 \cdot 14) 165}{500 \cdot 10^6} = 1447,6.$$

Для алюминиевой шины выбирается значение экономической плотности тока: $j_{\text{эк}} = 1,3 \text{ а/мм}^2$.

4. Экономическая площадь сечения, мм^2 :

$$S_{\text{эк}} = \frac{17829,9}{1,3} = 13715.$$

Выбирается алюминиевая четырехполосная шина с расположением полос по сторонам квадрата сечением 4800 мм^2 . Для добора необходимого сечения следует принять 3 секции шин в параллельную работу на одну фазу, мм^2 ($n_{\text{ш}} = 3$):

$$S_{\text{ш}} = 3 \cdot 4800 = 14400.$$

Основные характеристики выбранных алюминиевых четырехполосных шин представлены на рис. 4.3 и в табл. 4.1.

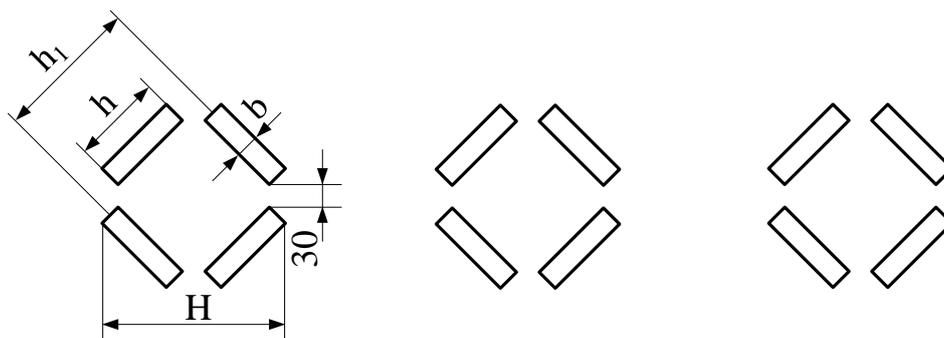


Рис. 4.3. Расположение четырехполосных шин в цепи генератора

Таблица 4.1

Основные характеристики выбранных шин

Размеры, мм				Поперечное сечение четыреполосной шины, мм^2	Допустимый ток, А
h	b	h ₁	H		Алюминий
120	10	184	216	4800	7300

5. Выбранную шину проверяем по длительно допустимому току, А:

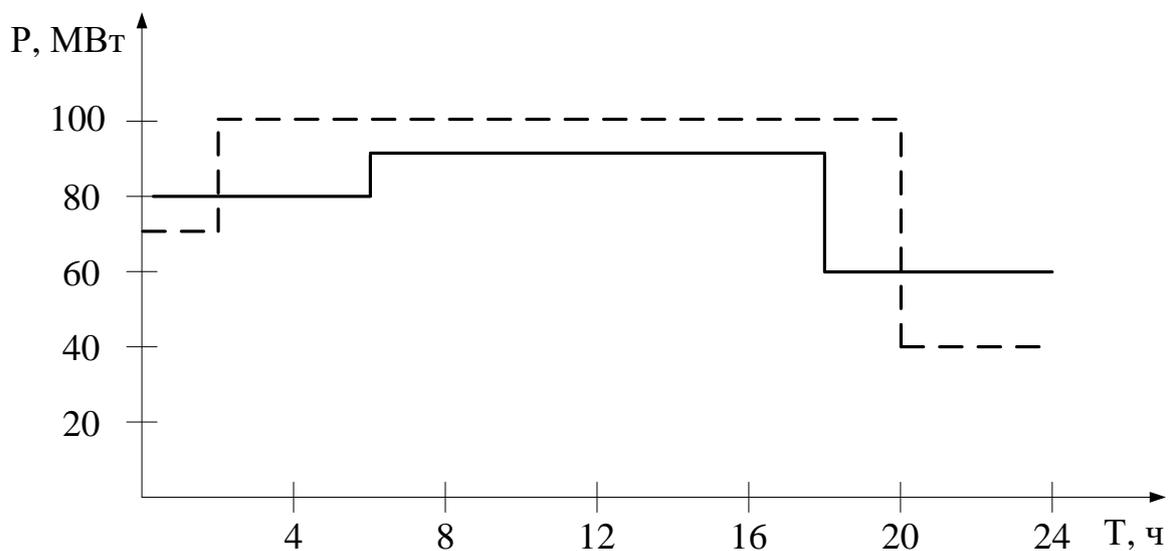
$$3 \cdot 7300 = 21900; \quad 21900 \text{ А} \geq 17829 \text{ А}.$$

Исходные данные к задаче

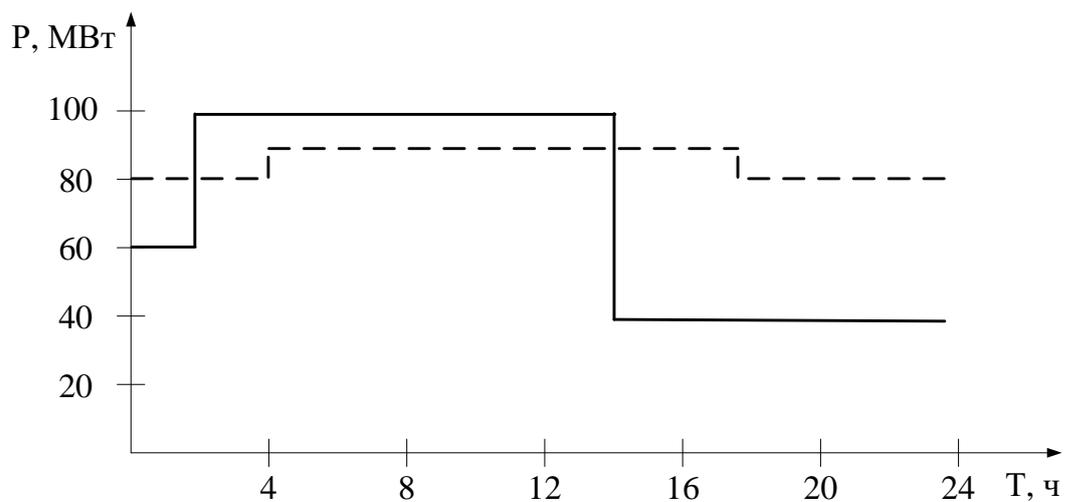
Параметр	Предпоследняя цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер схемы	1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)	1)	2)
Тип генератора	Последняя цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Т-6-2УЗ	Т-20-2УЗ	ТВС-32ТЗ	ТВФ-110-2ЕУЗ	ТВВ-160-2ЕУЗ	ТГВ-200-2УЗ	ТГВ-300-2УЗ	ТВВ-320-2ЕУЗ	ТГВ-500-2УЗ	ТЗВ-800-2УЗ

СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗОК (ВАРИАНТЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ)

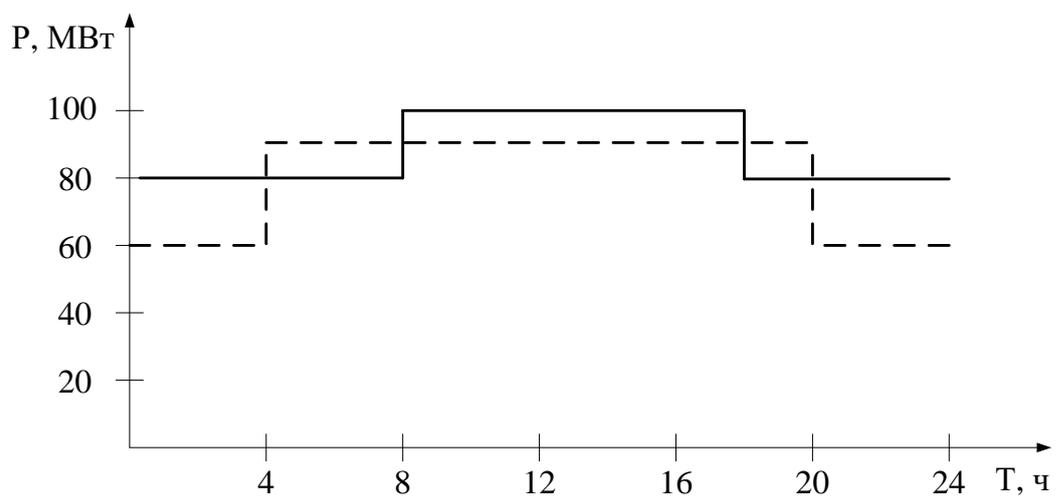
Вариант 1



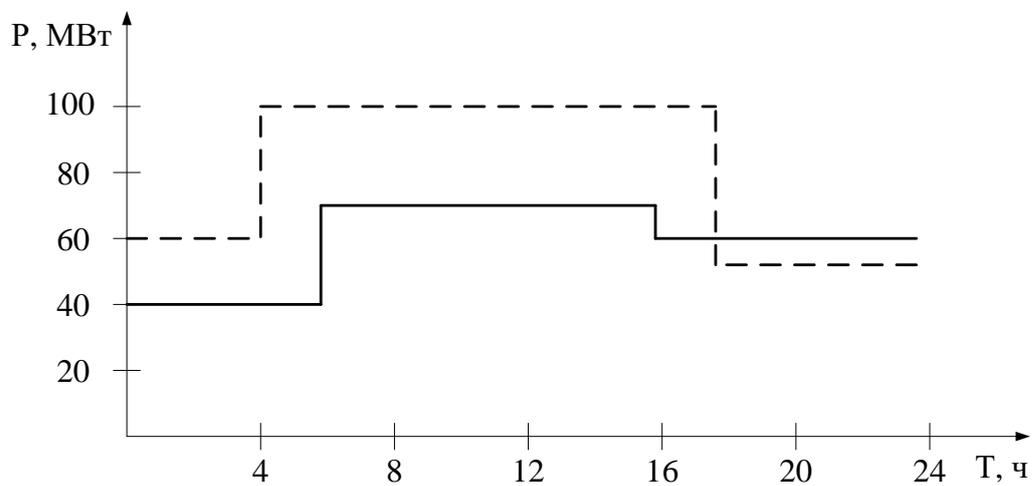
Вариант 2



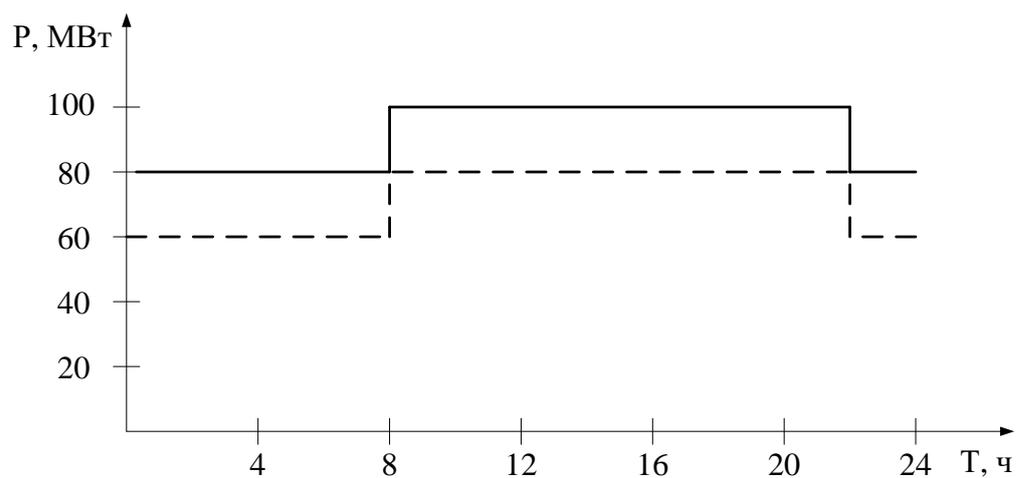
Вариант 3



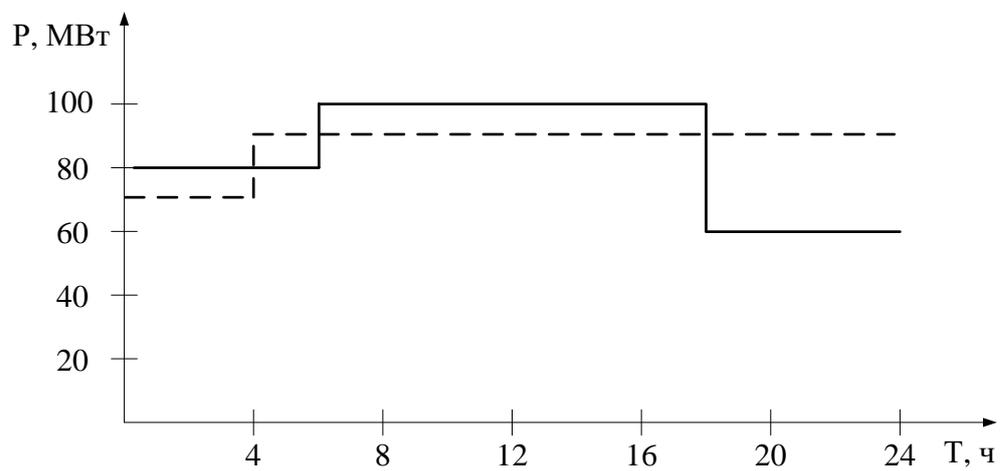
Вариант 4



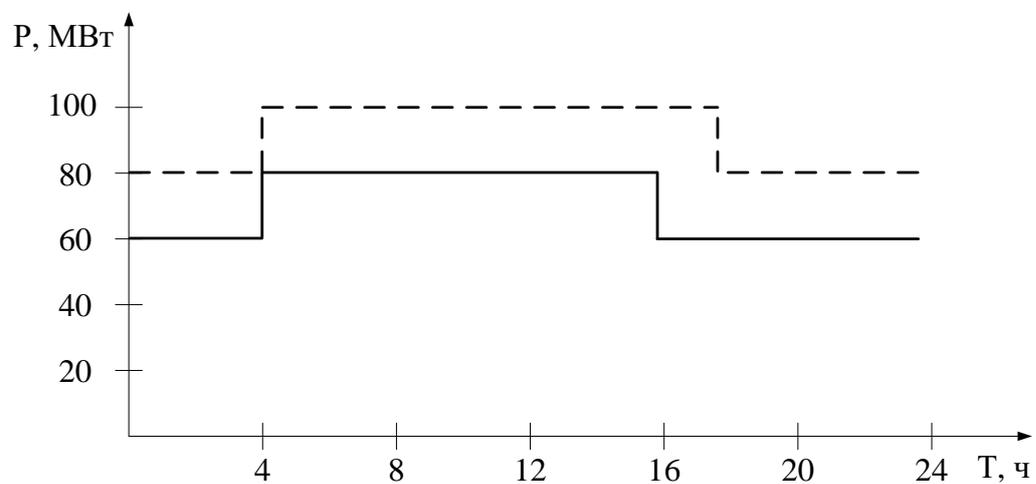
Вариант 5



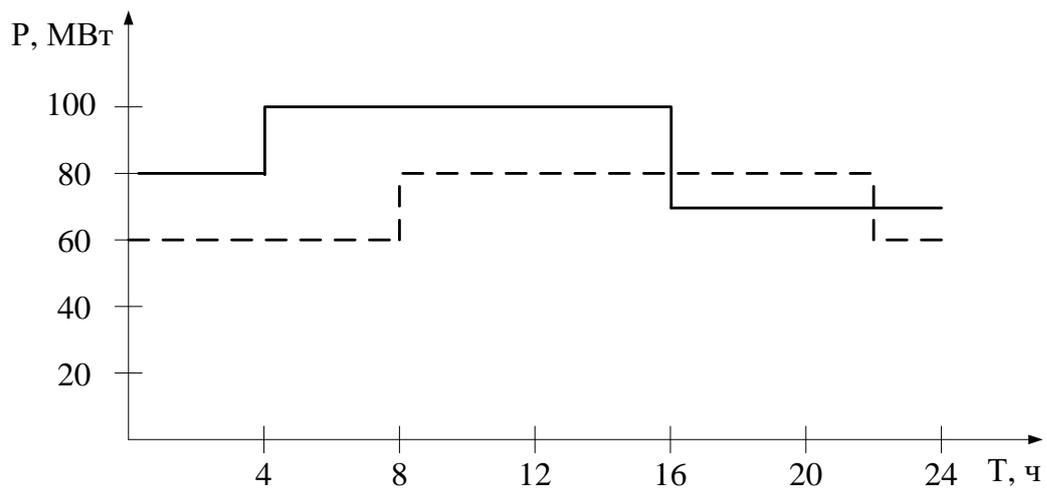
Вариант 6



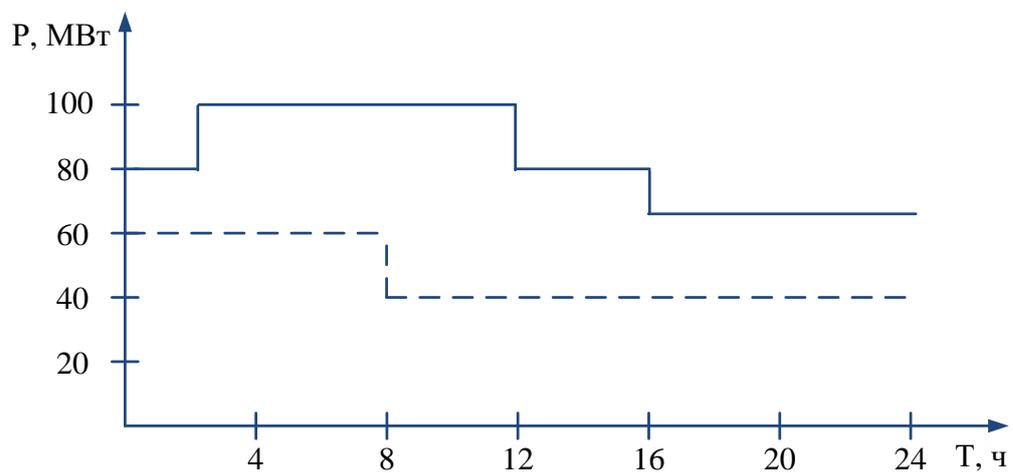
Вариант 7



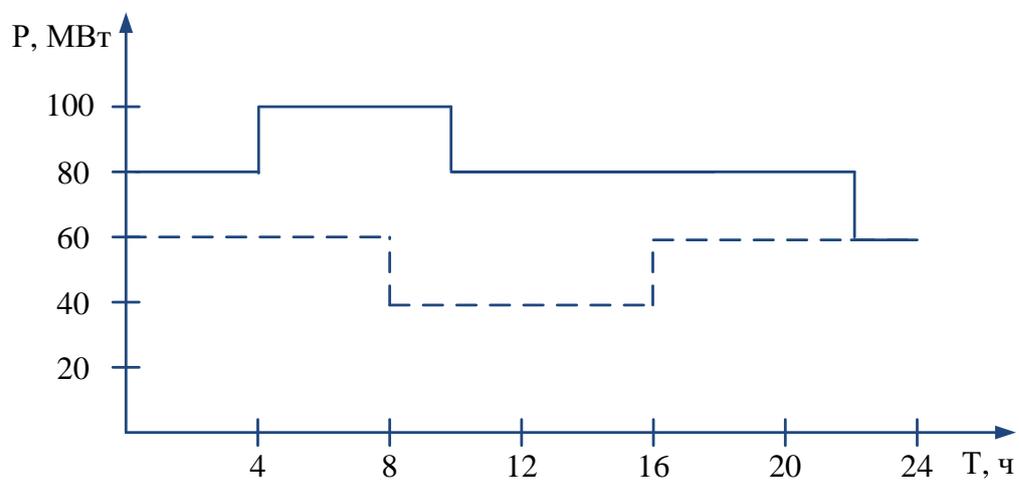
Вариант 8



Вариант 9



Вариант 10



Ход работы

- 1) Внимательно изучить теоретические сведения
- 2) Произвести расчеты согласно выбранному варианту
- 3) Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности продолжительного режима работы?
2. В чем суть практического значения экономического сечения?
3. Каков принцип расположения шин в цепях генератора?
4. Каков порядок выбора сечения открытого участка токопровода в цепи генератора?

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 5

«Расчет термической стойкости проводников и аппаратов»

Цель практической работы:

Сформировать знания, умения и навыки в области выполнения расчетов и проверки на термическую стойкость алюминиевых шин к трансформатору собственных нужд (ТСН) станции.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- воздействие токов короткого замыкания на нагрев оборудования и проводников

уметь:

- проверять на термическую стойкость оборудование и проводники

Учебная литература по практической работе:

Сибикин, Ю.Д. Эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю.Д. Сибикин. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. - 448 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации

Подробные характеристики воздействия тока короткого замыкания на нагрев проводников и оборудования представлены в практическом блоке № 3.

Пример решения практического задания

На станции, принципиальная схема которой приведена на рисунке 5.1, установлены два турбогенератора мощностью по 60 МВт, 10,5 кВ, $X''_d = 0,264$, $T_{aГ} = 0,26$ с, а также два трансформатора собственных нужд мощностью по 10 МВА. При нормальной работе станции нагрузка трансформаторов составляет по 5 МВт, $\cos\varphi = 0,85$. В случае вынужденного отключения одного из них нагрузка второго удваивается. Связь станции с сетью системы осуществляется через два трансформатора. Эквивалентное сопротивление этих трансформаторов и сети системы, отнесенное к базисной мощности 150 МВА, составляет $X_C = 0,35$, а периодическая постоянная времени системы $T_{aC} = 0,05$ с. Время отключения КЗ принимается равным $t_K = 0,5$ с.

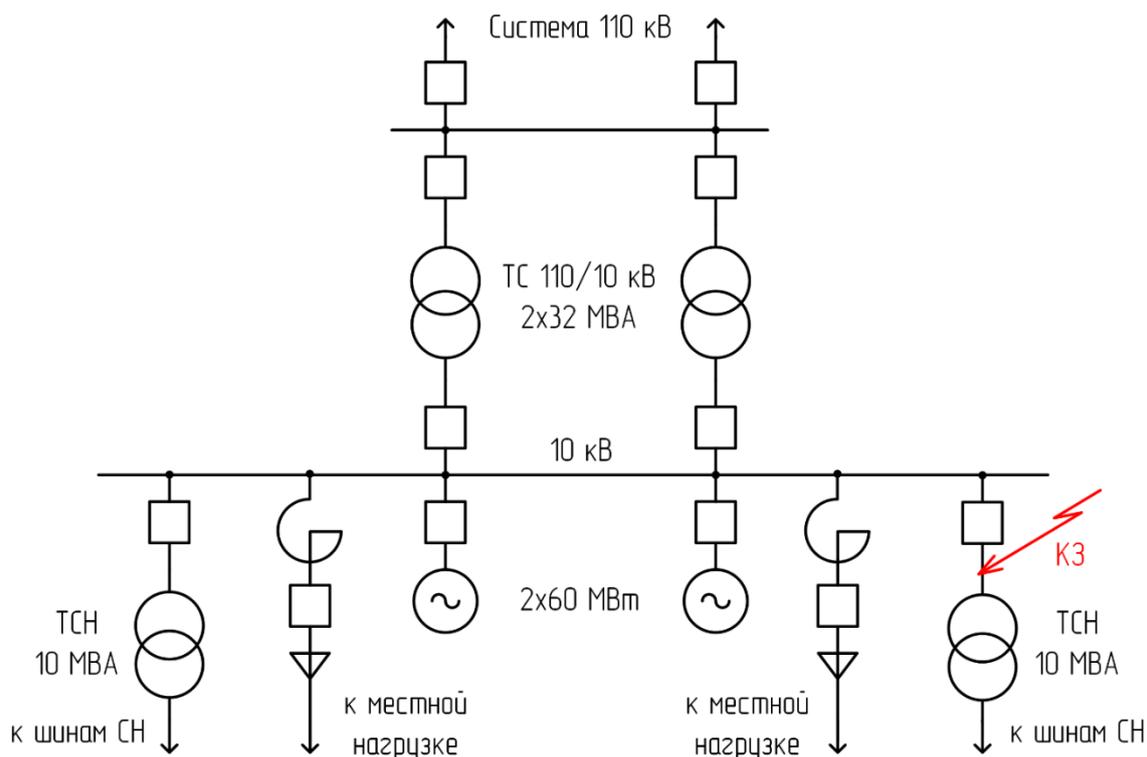


Рисунок 5.1 – Расчетная точка КЗ на электрической схеме станции

Решение: Термическая стойкость – способность аппарата или проводника противостоять кратковременному тепловому действию тока КЗ без повреждений, препятствующих дальнейшей исправной работе. Критерием термической стойкости является конечная температура, которая ограничивается механической прочностью металлов, деформациями частей аппаратов и нагревостойкостью изоляции (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Допустимые температуры проводников в нормальном и аварийном режимах

Тип проводника	Допустимая температура, °С	
	Нормальный режим	Короткое замыкание
Неизолированные медные и латунные проводники	70	300
Неизолированные алюминиевые проводники	70	200
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией 6 кВ	65	200
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией 10 кВ	60	200
Кабели и провода с ПВХ изоляцией	55	150

Выполняем выбор шин. Сечение алюминиевых шин к ТСН выбирается по наибольшему продолжительному току. С учетом исходных данных максимальный рабочий ток в цепи ТСН соответствует работе станции с одним ТСН с нагрузкой 2х5 МВт:

$$I_{\text{нб.прод}} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3 \cdot 0,85} = 650 \text{ А.}$$

По справочным данным (таблица 2) предварительно выбираются алюминиевые шины сечением $50 \times 5 = 250 \text{ мм}^2$ с допустимым (номинальным) током 665 А.

Таблица 5.2 – Допустимые продолжительные токи для шин прямоугольного сечения

Размеры шины, мм	Медные шины Ток, А (при количестве полос на фазу)			Алюминиевые шины Ток, А (при количестве полос на фазу)		
	1	2	3	1	2	3
15 x 3	210	—	—	165	—	—
20 x 3	275	—	—	215	—	—
25 x 3	340	—	—	265	—	—
30 x 4	475	—	—	365	—	—
40 x 4	625	—	—	480	—	—
40 x 5	700	—	—	540	—	—
50 x 5	860	—	—	665	—	—
50 x 6	955	—	—	740	—	—
60 x 6	1125	1740	2240	870	1350	1720
80 x 6	1480	2110	2720	1150	1630	2100
100 x 6	1810	2470	3170	1425	1935	2500
60 x 8	1320	2160	2790	1025	1680	2180
80 x 8	1690	2620	3370	1320	2040	2620
100 x 8	2080	3060	3930	1625	2390	3050
120 x 8	2400	3400	4340	1900	2650	3380
60 x 10	1475	2560	3300	1155	2010	2650
80 x 10	1900	3100	3990	1480	2410	3100
100 x 10	2310	3610	4650	1820	2860	3650
120 x 10	2650	4100/	5200	2070	3200	4100

Выполняем проверку шин. Определим токи в ветвях схемы при КЗ.

Базисный ток:

$$I_6 = \frac{150}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 8,25 \text{ кА.}$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока ветви генератора:

$$I_{\text{пoГ}} = \frac{I_6}{X_{\Gamma}/2} = \frac{8,25}{0,264/2} = 62,5 \text{ кА.}$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока ветви системы:

$$I_{\text{пoC}} = \frac{I_6}{X_{\text{C}}} = \frac{8,25}{0,35} = 23,6 \text{ кА.}$$

Для упрощенного вычисления интеграла Джоуля применяем относительные интегралы B_* и Q_* , которые определяются по справочным кривым (рисунок 5.2). Две диаграммы соответствуют различным временным интервалам, кривые с индексом I соответствуют турбогенераторам, кривые с индексом II – гидрогенераторам. С учетом заданного времени отключения КЗ ($t_{\text{к}} = 0,5 \text{ с}$) определим относительные интегралы по справочным кривым (рисунок 2): $B_{*I} = 0,52$; $Q_{*I} = 0,71$.

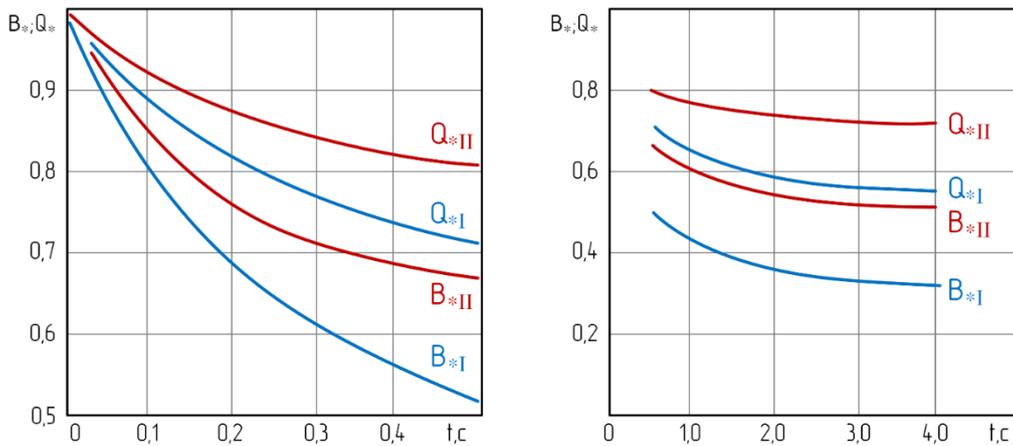


Рисунок 5.2 – Кривые для определения относительных интегралов

Определим интеграл Джоуля $B_{\text{п}}$ от периодической составляющей тока КЗ:

$$\begin{aligned} B_{\text{п}} &= (I_{\text{пC}}^2 + 2I_{\text{пC}}I_{\text{пoГ}}Q_* + I_{\text{пoГ}}^2B_*)t = \\ &= (23,6^2 + 2 \cdot 23,6 \cdot 62,5 \cdot 0,71 + 62,5^2 \cdot 0,52)0,5 = 2360 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \end{aligned}$$

Определим интеграл Джоуля $B_{\text{а}}$ от аperiodической составляющей тока КЗ:

$$\begin{aligned} B_{\text{а}} &= I_{\text{пC}}^2 T_{\text{аC}} + I_{\text{пoГ}}^2 T_{\text{аГ}} + \frac{4I_{\text{пC}}I_{\text{пoГ}}}{\frac{1}{T_{\text{аC}}} + \frac{1}{T_{\text{аГ}}}} = \\ &= 26,3^2 \cdot 0,05 + 65,2^2 \cdot 0,26 + \frac{4 \cdot 23,6 \cdot 62,5}{\frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,26}} = 1290 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \end{aligned}$$

Полный интеграл Джоуля:

$$B = B_{\text{п}} + B_{\text{а}} = (2360 + 1290) \cdot 10^6 = 3650 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$$

С учетом вычисленного значения интеграла Джоуля определяем интеграл квадратичной плотности тока (функцию А):

$$A = \frac{B}{s^2} = \frac{3650 \cdot 10^6}{250^2} = 5,84 \cdot 10^4 \frac{\text{A}^2\text{с}}{\text{мм}^4}.$$

Значение функции A характеризует приращение температуры проводника, обусловленное термическим действием тока КЗ за время его протекания. Зависимость приращения температуры от функции A является нелинейной и определяется справочными кривыми с учетом материала проводника и вида изоляции (рисунок 5.3).

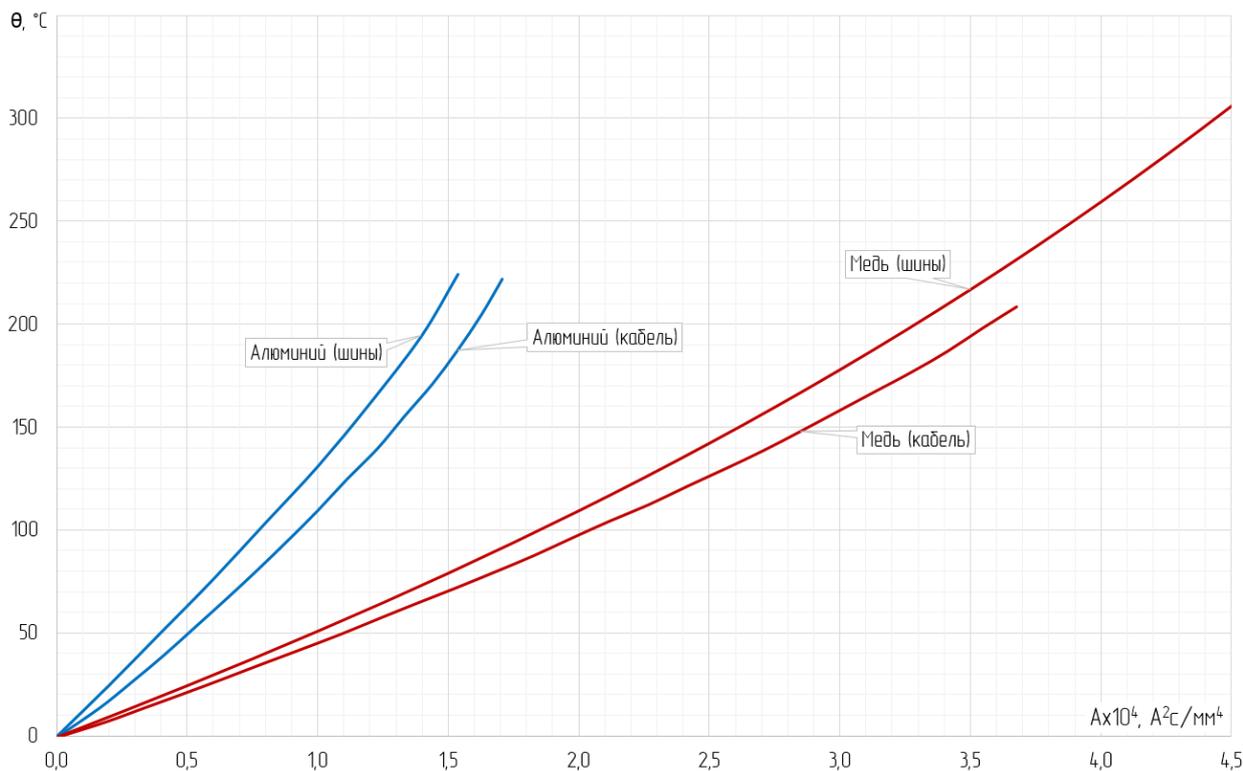


Рисунок 5.3 – Кривые для определения конечной температуры шин и кабелей при КЗ

Вертикальная ось диаграммы (рисунок 5.3) соответствует значению температуры проводника. Анализ рисунка показывает, что начало кривых соответствует нулевой температуре. Однако в условиях эксплуатации температура проводника в момент времени, предшествующий КЗ, как правило отличается от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и зависит от температуры окружающей среды и начального разогрева током предшествующего режима. Поэтому разогрев проводника, обусловленный термическим действием тока КЗ (функция A), происходит из некоторого значения начальной температуры. В связи с этим для определения конечной температуры в случае КЗ необходимо уточнить значение температуры проводника в предшествующем режиме (рисунок 5.4).

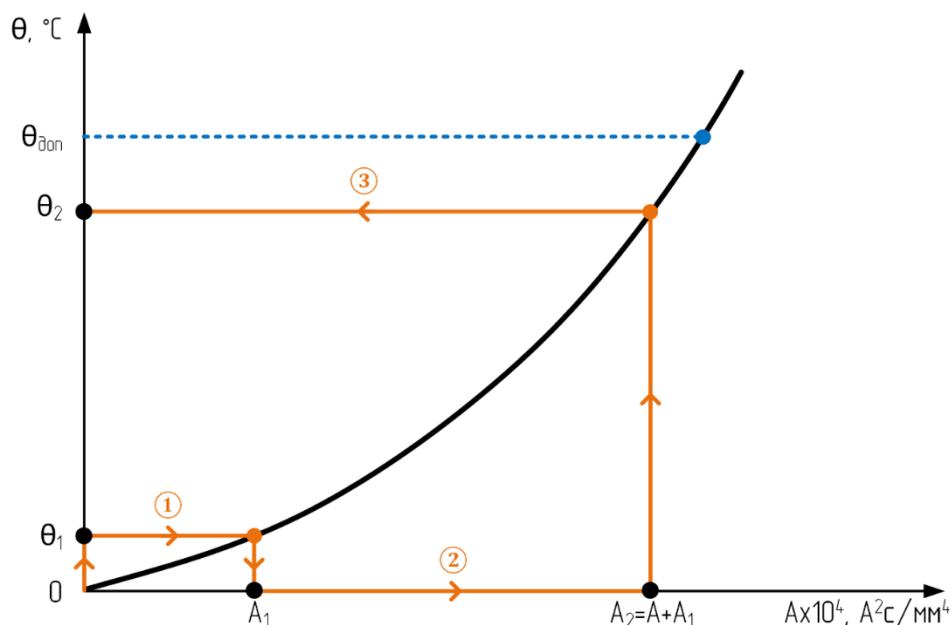


Рисунок 5.4 – Алгоритм определения конечной температуры проводника при КЗ

Уточним конечную температуру выбранной шины при КЗ с учетом первоначального разогрева током нормального режима. Начальная температура шины зависит от фактической $\theta_{\text{в}}$ и номинальной $\theta_{\text{в,ном}}$ температуры среды (воздух) (таблица 5.3), номинальной температуры проводника $\theta_{\text{ном}}$ (таблица 5.1), фактической и номинальной токовой нагрузки.

Таблица 5.3 – Номинальные температуры окружающей среды

Тип среды	Номинальная температура, °C
Воздух (для проводников)	+ 25
Воздух (для аппаратов)	+ 35
Земля	+ 15
Вода	+ 15

Таким образом, при токовой нагрузке 650 А начальная температура шины равна:

$$\theta_1 = \theta_{\text{в}} + (\theta_{\text{ном}} - \theta_{\text{в,ном}}) \left(\frac{I}{I_{\text{ном}}} \right)^2 = 25 + (70 - 25) \left(\frac{650}{665} \right)^2 = 68^\circ\text{C}.$$

Соответствующее значение функции A_1 по справочным кривым (рисунок 5.3):

$$A_1 = 0,51 \cdot 10^4 \frac{A^2 \cdot c}{\text{мм}^4}$$

Определяем значение функции A_2 :

$$A_2 = A_1 + A = (0,51 + 5,84) \cdot 10^4 = 6,35 \cdot 10^4 \frac{A^2 \cdot c}{\text{мм}^4}.$$

По справочной диаграмме (рисунок 5.3) определяем конечное значение температуры. Из диаграммы следует, что термическое действие тока КЗ на алюминиевые шины сечением 250 мм² приведет к их разогреву существенно выше допустимой температуры 200 °С. Следует отметить, что в рассматриваемом случае недопустимость превышения температуры можно было установить и без учета начального разогрева током нормального режима (по величине функции А). Однако в общем случае начальный разогрев может существенно влиять на конечную температуру при КЗ.

Таким образом, выбранные алюминиевые шины сечением 250 мм² не удовлетворяют требованиям термической стойкости при расчетной величине тока КЗ. Необходимо подобрать сечение шин, удовлетворяющее данному критерию.

Для определения минимального сечения шины, отвечающего требованию термической стойкости, применяется приближенное выражение:

$$s_{min} = \frac{\sqrt{B}}{C}$$

Приближенное выражение учитывает допустимые и номинальные значения функции А для выбранного проводника за счет величины параметра $C = \sqrt{A_{2\text{доп}} - A_{1\text{ном}}}$ (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Значения параметра С в зависимости от типа проводника

Тип проводника	Параметр С, А·с ^{0,5} /мм ²
Неизолированные медные шины	168
Неизолированные алюминиевые шины	89
Кабели с алюминиевыми жилами 6 кВ	97
Кабели с алюминиевыми жилами 10 кВ	100
Кабели с медными жилами 6 кВ	142
Кабели с медными жилами 10 кВ	146

Определяем минимальное сечение шины, отвечающее установленному критерию:

$$s_{min} = \frac{\sqrt{B}}{C} = \frac{\sqrt{3650 \cdot 10^6}}{89} = 678 \text{ мм}^2.$$

С учетом приближенного значения по справочным данным (таблица 5.2) выбираем алюминиевые шины сечением $80 \times 8 = 640 \text{ мм}^2$ с допустимым током 1320 А.

Уточним конечную температуру выбранной шины при КЗ с учетом первоначального разогрева током нормального режима. При токовой нагрузке 650 А начальная температура шины равна:

$$\theta_1 = \theta_B + (\theta_{\text{НОМ}} - \theta_{\text{В.НОМ}}) \left(\frac{I}{I_{\text{НОМ}}} \right)^2 = 25 + (70 - 25) \left(\frac{650}{1320} \right)^2 = 35,9^\circ\text{C}.$$

Соответствующее значение функции A_1 по справочным кривым (рисунок 5.3):

$$A_1 = 0,26 \cdot 10^4 \frac{A^2 \cdot c}{\text{мм}^4}$$

Определяем значение функции A с учетом нового сечения:

$$A = \frac{B}{S^2} = \frac{3650 \cdot 10^6}{640^2} = 0,89 \cdot 10^4 \frac{A^2 \cdot c}{\text{мм}^4},$$

Определяем значение функции A_2 :

$$A_2 = A_1 + A = (0,26 + 0,89) \cdot 10^4 = 1,15 \cdot 10^4 \frac{A^2 \cdot c}{\text{мм}^4}.$$

С учетом значения функции A_2 по справочным кривым (рисунок 5.3) определяем конечную температуру шины: $\theta_2 = 160^\circ\text{C}$.

Проверка показала, что алюминиевые шины сечением $80 \times 8 = 640\text{мм}^2$ удовлетворяют требованию термической стойкости, поскольку их конечная температура при КЗ не превышает допустимого значения.

Исходные данные к задаче

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Мощность турбогенераторов	70	65	65	60	70	65	65	60
Эквивалентное сопротивление системы	0,35	0,3	0,35	0,25	0,35	0,28	0,32	0,29

Ход работы

- 1) Внимательно изучить теоретические сведения
- 2) Произвести расчеты согласно выбранному варианту
- 3) Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что такое термическая стойкость электрического аппарата?
2. Какова последовательность проверки аппарат на термическую стойкость?

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 6

«Решение основных задач в области электроэнергетики»

Цель практической работы:

Сформировать знания, умения и навыки в области выполнения расчетов следующих видов задач: расчет токов нормального и утяжеленного режимов, расчет параметров схемы замещения, расчет токов короткого замыкания.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- воздействие токов короткого замыкания на нагрев оборудования и проводников;
- нормальный и утяжеленный режимы: определение, характеристики

уметь:

- рассчитывать токи короткого замыкания, токи нормального и утяжеленного режимов.

Учебная литература по практической работе:

Сибикин, Ю.Д. Эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю.Д. Сибикин. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. - 448 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации

Задача 1

Условие: проверить на электродинамическую стойкость многопролетный токопровод 110 кВ (рисунок 6.1) при следующих условиях: длина пролета $l = 10$ м, расстояние между фазами $a = 1,4$ м. Проводники трубчатые из алюминиевого сплава АДЗ1Т1 имеют диаметр $D = 100$ мм, толщину стенки $t = 10$ мм, массу $m' = 7,64$ кг/м. Модуль упругости материала проводника $E = 7 \cdot 10^{10}$ Н/м², условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 147$ Н/мм²

Использованы опорные изоляторы типа ОНС-110-2000 (минимальная разрушающая нагрузка $P_{рз} = 19600$ Н, высота $h = 1100$ мм). Периодическая составляющая тока при трехфазном КЗ $I_{п} = 35$ кА, время паузы при АПВ $t_{п} = 0,4$ с.

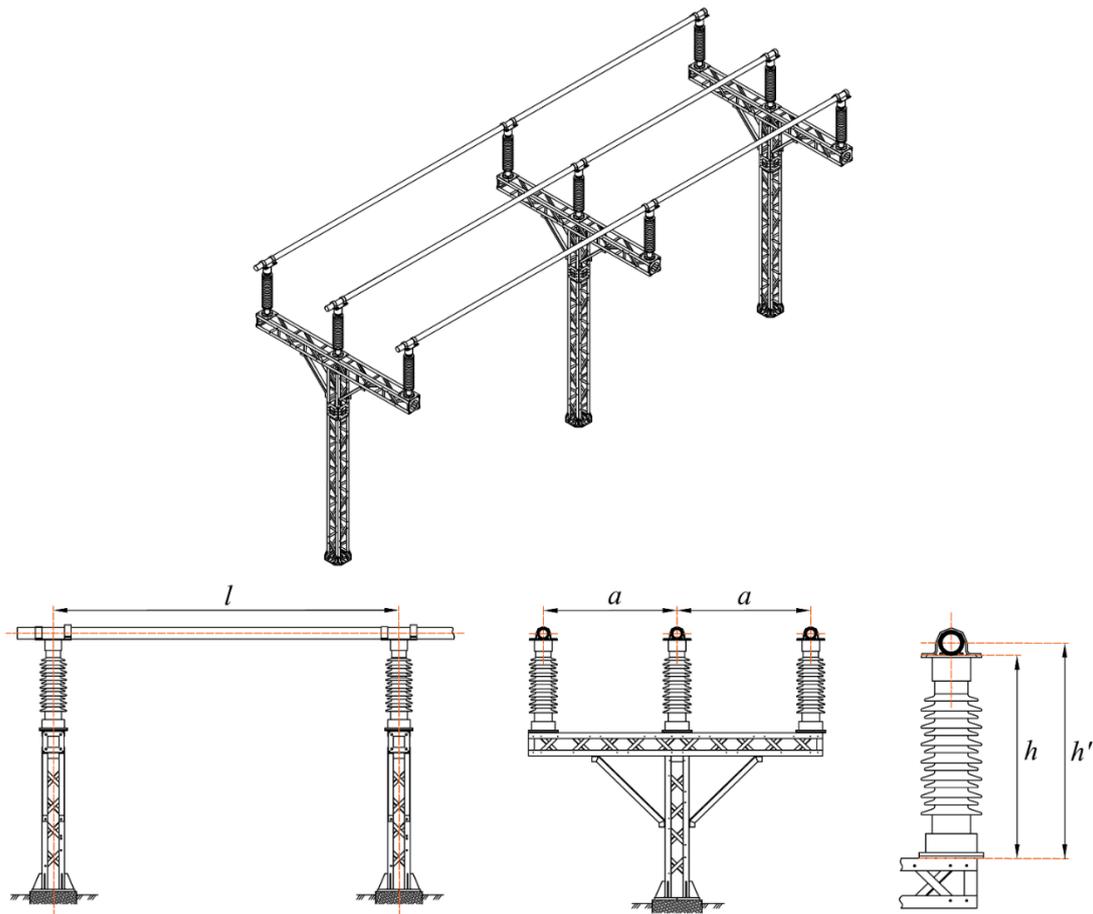


Рисунок 6.1 – Внешний вид и основные размеры многопролетного токопровода 110 кВ

Решение: Электродинамическая стойкость – способность аппарата или проводника противостоять кратковременному электродинамическому действию тока КЗ без повреждений, препятствующих дальнейшей исправной работе. Многопролетный токопровод с жесткими проводниками представляет собой упругую систему, которая при КЗ под действием электродинамических сил приходит в сложное колебательное движение. Проводники изгибаются и передают нагрузку на опоры, обладающие также некоторой упругостью. В материале проводников и изоляторов возникают значительные напряжения. Расчет токопровода с заданными параметрами на электродинамическую стойкость состоит в определении максимальной мгновенной нагрузки на изоляторы и максимального мгновенного механического напряжения в проводниках в переходном колебательном процессе. Таким образом, при решении задачи устанавливается соответствие между электрическими и механическими величинами, характеризующими состояние токопровода.

Выполняем расчет механических величин. К основным механическим величинам при прочностных расчетах относятся момент инерции сечения проводника и момент сопротивления. Вид расчетных формул зависит от формы поперечного сечения проводника (прямоугольное, круглое, трубчатое).

Момент инерции сечения трубчатого проводника зависит от внешнего (D) и внутреннего ($d = D - 2t$) диаметров:

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi(0,1^4 - 0,08^4)}{64} = 2,96 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Момент сопротивления:

$$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32 \cdot D} = \frac{2 \cdot J}{D} = \frac{2 \cdot 2,96 \cdot 10^{-6}}{0,1} = 59,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Выполняем расчет при статической нагрузке. Поскольку расчет производится в цепях переменного тока, то ток КЗ представляет собой периодически изменяющуюся величину, зависящую от вида КЗ, периодической составляющей тока, постоянной времени затухания аperiodической составляющей, а также фазы включения. Создаваемые током электродинамические силы также являются функциями времени и изменяются по величине и направлению, а их воздействие с учетом упругости проводников и опор вызывает сложный колебательный процесс в токопроводах. Для упрощения расчета сложных процессов сначала рассматривается воздействие статических нагрузок, после чего происходит переход к динамическим воздействиям через справочные коэффициенты.

Интенсивность нагрузки зависит от величины тока КЗ и расстояния между фазами:

$$F_{max} = 2,825 \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} (\sqrt{2} I_{п})^2 = 2,825 \frac{2 \cdot 10^{-7}}{1,4} (\sqrt{2} \cdot 35)^2 \cdot 10^6 = 986 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Многопролетный токопровод заменяем двухпролетным. При увеличении числа пролетов в токопроводе с неразрезными проводниками, свободно лежащими на опорах, максимальный изгибающий момент (M_{max}) и максимальная нагрузка на опоры (P_{max}) имеют место на второй от каждого конца опоре, что позволяет проверить наиболее нагруженные участки на основе эквивалентной двухпролетной модели токопровода.

Нагрузка на опоры зависит от интенсивности нагрузки и длины пролета:

$$P_{ст} = 1,25 F'_{max} l = 1,25 \cdot 986 \cdot 10 = 12\,300 \text{ Н.}$$

Изгибающий момент:

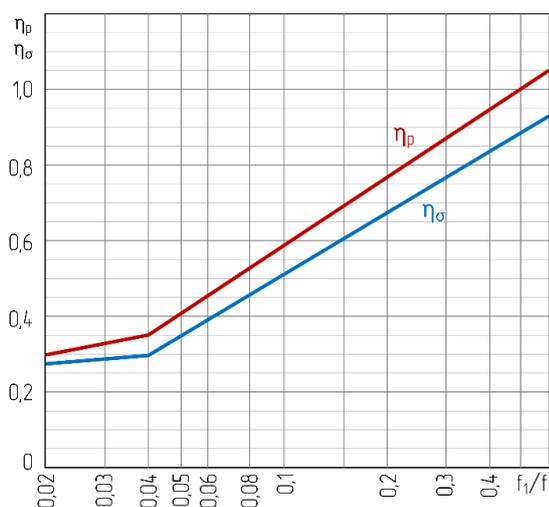
$$M_{ст} = 0,125 F'_{max} l^2 = 0,125 \cdot 986 \cdot 10^2 = 12\,300 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Механическое напряжение в проводниках:

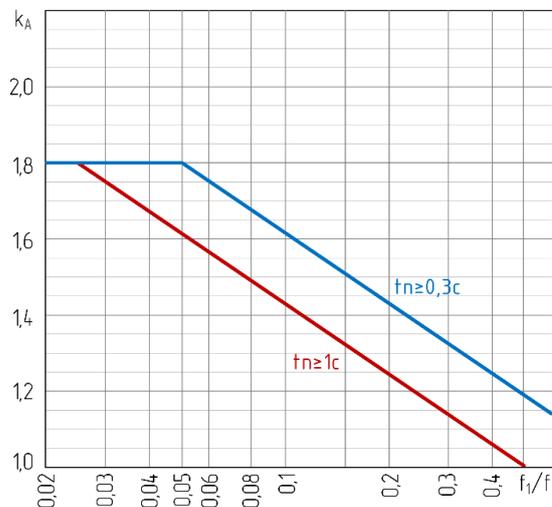
$$\sigma_{ст} = \frac{M_{ст}}{W} = \frac{12\,300}{59,2 \cdot 10^{-6}} = 208 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 208 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}.$$

Выполняем расчет при динамической нагрузке. Динамические воздействия определяются не только величиной вынуждающей силы, но и соотношением собственной частоты проводника и частоты действующей силы (частоты тока КЗ). В токопроводах напряжением 110 кВ и выше основная частота f_1 проводников не превышает 10 Гц и опоры обладают некоторой упругостью, которая

должна быть учтена при расчете. В этих условиях максимальные значения $P_{ДИНmax}$ и $\sigma_{ДИНmax}$ определяют умножением $P_{СТ}$ и $\sigma_{СТ}$ на соответствующие динамические коэффициенты η_p и η_σ , которые могут быть определены по упрощенным частотным характеристикам (рисунок 6.2а), которые учитывают упругость опор и являются функциями только основной частоты f_1 проводников.



а)



б)

Рисунок 6.2 – Кривые для упрощенного расчета токопроводов 110 кВ и выше: зависимости для динамических коэффициентов (а) и коэффициента АПВ (б) от частоты

Учитываем неуспешное АПВ. После отключения КЗ вынужденные колебания проводников токопровода под действием электродинамических сил переходят в свободные затухающие колебания. При автоматическом повторном включении (если повреждение не самоустранилось) электродинамические силы возникают вновь. Свободные колебания переходят в сложные вынужденные колебания, при которых нагрузка на опоры и напряжение в проводниках резко увеличиваются. Влияние неуспешного АПВ на динамические нагрузки учитывается через соответствующий коэффициент k_A , зависящий от продолжительности бес-токовой паузы (рисунок 6.2б).

Собственная частота проводника зависит от его массогабаритных и механических характеристик, а также конструкции токопровода (учитывается коэффициентом λ):

$$f_1 = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot J}{m' l^4}} = \frac{3,92^2}{2\pi} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 2,96 \cdot 10^{-6}}{7,64 \cdot 10^4}} = 3,93 \text{ Гц}$$

Отношение собственной частоты к частоте вынуждающей силы:

$$\frac{f_1}{f} = \frac{3,93}{50} \approx 0,08.$$

С учетом отношения частот по справочным диаграммам (рисунок 6.2) определяем значения динамических коэффициентов и коэффициента АПВ (с учетом времени паузы):

$$\eta_p = 0,52; \eta_\sigma = 0,46; k_A = 1,68$$

Максимальная мгновенная нагрузка на изоляторы и максимальное мгновенное механическое напряжение в проводниках при динамическом воздействии:

$$P_{\text{дин}} = P_{\text{ст}} \eta_p k_A = 12\,300 \cdot 0,52 \cdot 1,68 = 10\,750 \text{ Н}$$

$$\sigma_{\text{дин}} = \sigma_{\text{ст}} \eta_\sigma k_A = 208 \cdot 0,46 \cdot 1,68 = 160 \text{ Н/мм}^2$$

Проверяем допустимость нагрузок. Допустимая нагрузка на изоляторы при КЗ принимается (согласно ПУЭ) равной 60% минимальной разрушающей нагрузки $P_{\text{рз}}$. С учетом разности точки приложения силы (центр токопровода) и высоты изолятора (рисунок 6.1) допустимая нагрузка на изоляторы равна:

$$P_{\text{доп}} = 0,6 P_{\text{рз}} \frac{h}{h'} = 0,6 P_{\text{рз}} \frac{h}{h + 0,5D} = 0,6 \cdot 19\,600 \cdot \frac{1100}{1100 + 50} = 11\,250 \text{ Н}$$

Допустимое напряжение в материале проводников (согласно ПУЭ) зависит от значения условного предела текучести материала ($\sigma_{0,2}$), при котором остаточная деформация не превышает 0,2 %, и коэффициента пластической деформации (q), значение которого зависит от формы и размеров поперечного сечения проводника (таблица 6.1).

$$\sigma_{\text{доп}} = \sigma_{0,2} q = 147 \cdot 1,4 = 206 \text{ Н/мм}^2$$

Таблица 6.1 – Значения коэффициента пластической деформации

Отношение толщины стенки проводника к его диаметру	Значение коэффициента q
0,05	1,34
0,075	1,37
0,10	1,40
0,125	1,44
0,15	1,48
0,20	1,51

Вывод. Расчетные максимальные нагрузки на изоляторы и механические напряжения в проводниках не превышают допустимых значений. Следовательно, токопровод отвечает требованиям электродинамической стойкости:

$$P_{\text{дин}} < P_{\text{доп}}$$

$$\sigma_{\text{дин}} < \sigma_{\text{доп}}$$

Задача 2

Условие: в муниципальном образовании Гусевского ГО находится одна ТЭЦ старого образца, а также несколько котельных, которые не могут покрыть пики в отопительный сезон. Гусевская ТЭЦ вырабатывает 66 Гкал/час. Спрос на тепловую энергию в Гусевском ГО на 2024 год ориентировочно составит 87.6 Гкал/час. Необходимо выбрать тип и мощность электростанции для удовлетворения потребности в тепловой нагрузке.

Решение: В связи с наличием топлива для Гусевской ТЭЦ целесообразным решением будет возведение вблизи города новой ТЭЦ, способной покрыть потребность в тепловой нагрузке и обеспечить генерацию новых электрических мощностей.

Выбор установленной мощности электростанции будет осуществляться на основе тепловой мощности. По исходным данным, на 2024 год непокрытая тепловая нагрузка составит 21,6 Гкал/час.

Определим целесообразную рабочую электрическую мощность ТЭЦ, исходя только из величины тепловой нагрузки.

$$N_{\text{ТЭЦ}} = y_p * \alpha_{\text{ТЭЦ}} * Q$$
$$N_{\text{ТЭЦ}} = 2 * 0,8 * 21,6 = 34,56 \text{ МВт}$$

Задача 3

Условие: произвести расчёт наибольших токов нормального и послеаварийного режимов цепи генератора: $P_{\text{НОМ.Г}} = 0,4 \text{ МВт}$, $\cos\varphi = 0,9$, $U_{\text{НОМ.Г}} = 0,4 \text{ кВ}$, цепи двух параллельно работающих линий: $S_{\text{НОМ}} = 25 \text{ МВА}$, $U_{\text{НОМ}} = 110 \text{ кВ}$, $n = 2$, цепи сборных шин 110 кВ $S_{\text{НОМ}} = 25 \text{ МВА}$, $U_{\text{НОМ}} = 110 \text{ кВ}$.

Решение: Для выбора электрических проводников и аппаратов принимают во внимание наибольший расчётный ток нормального режима $I_{\text{НОРМ.РАСЧ}}$ и утяжелённый расчётный ток цепи $I_{\text{УТЖ.РАСЧ}}$ при повышенной продолжительной нагрузке.

Цепь генератора. Наибольший ток нормального режима принимается при загрузке генератора до номинальной мощности $P_{\text{НОМ}}$ при номинальном напряжении и $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$.

$$I_{\text{НОРМ.РАСЧ}} = \frac{P_{\text{НОМ.Г}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ.Г}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{0,40}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,9} = 0,642 \text{ кА}$$

Наибольший ток послеаварийного или ремонтного режима определяется при условии работы генератора при снижении напряжения на его зажимах на 5 %

$$I_{\text{УТЖ.РАСЧ}} = \frac{P_{\text{НОМ.Г}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ.Г}} \cdot 0,95 \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,95 \cdot 0,9} = 0,675 \text{ кА}$$

Цепь двух параллельно работающих линий. Наибольший ток нормального режима принимается при загрузке линий до номинальной мощности $S_{\text{НОМ}}$

$$I_{\text{норм.расч}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{n\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{25}{2\sqrt{3} \cdot 110} = 0.066 \text{ кА}$$

Наибольший ток послеаварийного или ремонтного режима определяется при условии выхода из строя одной из линий

$$I_{\text{утж.расч}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0.131 \text{ кА}$$

Цепь сборных шин. Ток, проходящий по сборным шинам, не превышает $I_{\text{норм.расч}}$ самого мощного генератора или трансформатора, присоединенного к этим шинам:

$$I_{\text{норм.расч}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,131 \text{ кА}$$

Наибольший ток ремонтного или послеаварийного режима принимается с учётом длительно допустимых систематических перегрузок:

$$I_{\text{утж.расч}} = K_{\text{П}} \cdot I_{\text{норм.расч}} = 1,4 \cdot 0,126 = 0.183 \text{ кА}$$

Задача 4

Условие: произвести расчёт параметров схемы замещения, включающей последовательно соединенные элементы: система, трансформатор, генератор. Параметры системы: $U_{\text{пс}}=110$ кВ, $I_{\text{кз}}=21900$ А, параметры трансформатора связи: $U_{k\%}=6,5$ %, $U_{\text{вн}}=15$ кВ, $S_{\text{НОМ}}=0,63$ МВА, параметры генератора: $X_d''=0,161$, $P_{\text{НОМ.Г}}=0,4$ МВт, $\cos\varphi=0,9$.

Решение: Базисные токи рассчитываются исходя из базисной мощности и напряжения:

$$I_{\text{бI}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{бI}}}$$

Сопротивление системы:

$$X_c = \frac{U_{\text{пс}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{кз}}} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 21900} = 2,9$$

$$X_c^* = X_c \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{срном}}^2} = 2,9 \cdot \frac{250}{110 \cdot 10^6} = 0.06 \text{ о. е.}$$

ЭДС системы:

$$E_c = \frac{U_{\text{б1}}}{U_{\text{ср}}} = \frac{110}{110} = 1 \text{ о. е.}$$

Сопротивление трансформаторов связи:

$$X_{\text{общ}} = \frac{U_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{S_6}{Ub1} = \frac{12,5}{100} \cdot \frac{110^2}{25} \cdot \frac{250}{110} = 1.375 \text{ о. е.}$$

$$X_{T1} = X_{T2} = X_{\text{общ}} \cdot 1,875 = 4,794 \text{ о. е.}$$

$$X_{B1} = X_{\text{общ}} \cdot 0,125 = 0,32 \text{ о. е.}$$

$$X_{\text{НН1}} = X_{\text{НН2}} = X_{\text{общ}} \cdot 1,75 = 4,474 \text{ о. е.}$$

$$X_T = \frac{U_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{S_6}{Ub1} = \frac{6,5}{100} \cdot \frac{15^2}{0,63} \cdot \frac{250}{110} = 0,446 \text{ о. е.}$$

Сопротивление генераторов Г, приведенное к базисным условиям:

$$X_{G1} = Xd'' \cdot \frac{S_b}{S_G} = 0.161 \cdot \frac{250}{(0.4/0.9)} = 0.9 \text{ о. е.}$$

Сверхпереходная ЭДС генераторов:

$$E_G = \sqrt{(U_N + I_N \cdot Xd'' \cdot 0.6)^2 + (I_N \cdot Xd'' \cdot 0.8)^2}$$

$$E_G = \sqrt{(1 + 1 \cdot 0.161 \cdot 0.6)^2 + (1 \cdot 0.161 \cdot 0.8)^2} = 1.574 \text{ о. е.}$$

Задача 5

Условие: произвести расчёт тока короткого замыкания на шине 110 кВ (К 1) (рисунок 6.3) $E_{G\text{э}} = 1,574 \text{ о. е.}$, $k_{\text{уд.г}} = 1,9$, $k_{\text{уд.с}} = 1,6$

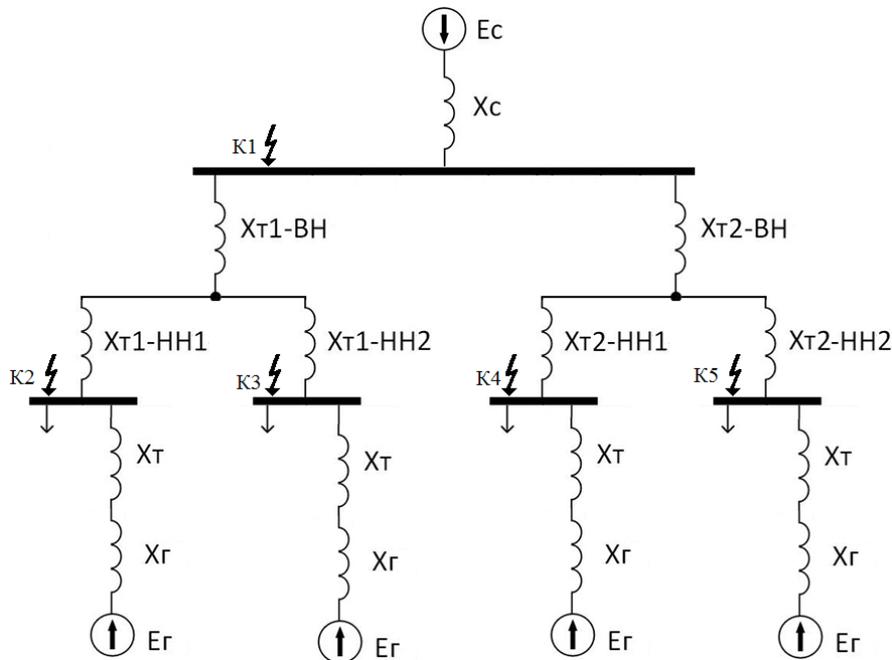


Рисунок 6.3 – Схема замещения

Решение: Для расчёта КЗ на шине 110 кВ схема замещения преобразуется в двухлучевую, после чего выполняется расчёт токов в ветвях источников тока КЗ.

Периодический ток КЗ генератора определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{пог}} = \frac{E_{\text{гэ}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{э}}} \cdot I_{\text{б1}} = \frac{1.574}{\sqrt{3} \cdot 1.026} \cdot 1.312 = 1.162 \text{ кА}$$

Периодический ток КЗ системы определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{пос}} = \frac{U_{\text{с}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{с}}} \cdot I_{\text{б1}} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot 0.06} \cdot 1.312 = 12.644 \text{ кА}$$

Максимальный ударный ток КЗ:

$$i_{\text{удг}} = k_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{пог}} = 1.9 \cdot \sqrt{2} \cdot 1.162 = 3.122 \text{ кА}$$

$$i_{\text{удс}} = k_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{пос}} = 1.6 \cdot \sqrt{2} \cdot 12.625 = 28.61 \text{ кА}$$

Суммарные токи в точке КЗ:

$$I_{\text{по}} = I_{\text{пог}} + I_{\text{пос}} = 1.162 + 12.625 = 13.806 \text{ А}$$

$$I_{\text{удс}} = i_{\text{удг}} + i_{\text{удс}} = 3.122 + 28.567 = 31.732 \text{ кА}$$

Исходные данные к задаче 1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина пролета, м	15	14	13	12	11	10	9	8
Расстояние между фазами, м	1,7	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1
Диаметр проводников, мм	60	70	80	90	105	110	120	130

Исходные данные к задаче 2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Выработка ТЭЦ, Гкал/час	35	55	75	95	115	135	155	175
Потребление, Гкал/час	60	70	80	90	100	110	120	130

Исходные данные к задаче 3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Мощность в цепи генератора $P_{\text{ном.г}}$, МВт	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
Мощность цепи двух парал-	15	17	19	21	23	25	27	29

лельно работаю- щих линий $S_{\text{НОМ}}$, МВА								
Мощность цепи сборных шин $S_{\text{НОМ}}$, МВА	15	17	19	21	23	25	27	29

Исходные данные к задаче 4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$, А	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000

Исходные данные к задаче 5

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$E_{\text{гэ}}$, о.е	1,45	1,56	1,67	1,78	1,45	1,56	1,67	1,78

Ход работы

- 1) Внимательно изучить теоретические сведения
- 2) Произвести расчеты всех задач согласно выбранному варианту
- 3) Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Принцип расчета токов короткого замыкания.
2. Принцип составления и расчета схемы замещения.
3. Принцип расчета токов нормального и утяжеленного режимов
4. Электродинамическая стойкость: определение, характеристика, способ проверки оборудования.

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 7

«Выбор электрооборудования электростанции»

Цель практической работы:

Сформировать знания, умения и навыки для выбора электрооборудования по основным параметрам сети.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- принцип расчета основных параметров сети
- сферы применения высоковольтного оборудования

уметь:

- производить проверку оборудования для его работы при определенных режимах системы

Учебная литература по практической работе:

Сибикин, Ю.Д. Эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю.Д. Сибикин. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. - 448 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации

Произвести проверку выключателя ВВ/TEL ISM17.5 по условиям выбора. Параметры расчёте: $I_{\text{ном.расч}} = 642 \text{ А}$, $I_{\text{утж}} = 675 \text{ А}$, $I_{\text{пт}} = 5,659 \text{ кА}$, $T_a = 0,2 \text{ с}$, $i_{\text{уд}} = 13,58 \text{ кА}$, $I_{\text{по}} = 5,659 \text{ кА}$. Технические характеристики выключателя представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Технические характеристики выключателя ВВ/TEL ISM17.5

Наименование параметра	Величина
Номинальное напряжение, кВ	15
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	17,5
Номинальный ток, А	1000
Номинальный ток отключения, кА	20
Номинальное содержание апериодической составляющей, %	40
Ток электродинамической стойкости, кА	20
Ток термической стойкости (3с), кА	20
Время протекания тока термической стойкости, с	3
Собственное время отключения, с	0.027
Полное время отключения, с	0.055
Собственное время включения, с	0.042
Минимальная бестоковая пауза при АПВ, с	0.3

Решение: В соответствии с ГОСТ 687-78 выключатели выбираются и проверяются по ряду условий (таблица 7.2):

Таблица 7.2 – Условия выбора и проверки выключателей

Условие выбора и проверки	Вид проверки
1	2
$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{с.НОМ}}$	выбор по уровню изоляции
$I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{н.р}}$	выбор по номинальному току
$K_{\text{п}} \cdot I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{утж}}$	выбор по току в утяжеленном режиме
$I_{\text{отк.НОМ}} \geq I_{\text{п.т}}$	проверка по отключающей способности
$i_{\text{а.НОМ}} \geq i_{\text{а.т}}$	
$I_{\text{вкл.НОМ}} \geq I_{\text{п.0}}$	проверка по включающей способности
$i_{\text{вкл.НОМ}} \geq i_{\text{уд}}$	
$I_{\text{пр.скв}} \geq I_{\text{п.0}}$	проверка по электродинамической стойкости
$i_{\text{пр.скв}} \geq i_{\text{уд}}$	
$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_k$	проверка по термической стойкости

Проверка по напряжению и токам:

$$U_{\text{НОМ}} = 15 \text{ кВ} \geq U_{\text{с.НОМ}} = 15 \text{ кВ}$$

$$I_{\text{НОМ}} = 1000 \text{ А} \geq I_{\text{НОМ.расч}} = 642 \text{ А}$$

$$K_{\text{п}} I_{\text{НОМ}} = 1000 \text{ А} \geq I_{\text{утж}} = 675 \text{ А}$$

Проверим выключатель по отключающей способности:

$$I_{\text{откл.НОМ}} = 16 \text{ кА} \geq I_{\text{пт}} = 5,659 \text{ кА}$$

Время начала расхождения контактов выключателя:

$$\tau = t_{\text{собст}} + t_{\text{откл}} = 0,027 + 0,03 = 0,057 \text{ с}$$

Определим аperiodическую составляющую тока КЗ в момент начала расхождения контактов:

$$i_{\text{ат}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п0}} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 5,659 \cdot e^{-\frac{0,057}{0,2}} = 6,018 \text{ кА}$$

Проверка по электродинамической стойкости:

$$i_{\text{пр.скв}} = 20 \text{ кА} \geq i_{\text{уд}} = 13,58 \text{ кА}$$

$$I_{\text{пр.скв}} = 20 \text{ кА} \geq I_{\text{п0}} = 5,659 \text{ кА}$$

Проверка по включающей способности:

$$i_{\text{вкл.НОМ}} = 20 \text{ кА} \geq i_{\text{уд}} = 13,58 \text{ кА}$$

$$i_{\text{аНОМ}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{\text{откНОМ}} \cdot \beta_{\text{НОМ}}}{100} = \frac{\sqrt{2} \cdot 20 \cdot 36}{100} = 10,182 \text{ кА}$$

Термический импульс (интеграл Джоуля) определим при $t_{\text{отк}} = 0,5 \text{ с} < 2 \text{ с}$ (при действии резервных защит) по упрощённой формуле:

$$B_k \approx I_{\text{п0}}^2 \cdot (t_{\text{отк}} + T_a) = 5,659^2 \cdot (0,055 + 0,03) = 2,722 \cdot 10^6 (\text{А}^2 \cdot \text{с})$$

Термическая стойкость аппарата:

$$I_{\text{ТЕР}}^2 \cdot t_{\text{ТЕР}} = 20^2 * 3 = 1200 \cdot 10^6 (\text{А}^2 \cdot \text{с})$$

Исходные данные к задаче

Произвести выбор и проверку высоковольтных выключателей для следующих параметров сети:

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_{\text{ном.расч}}, \text{А}$	400	450	500	550	600	650	700	750
$i_{\text{уд}}, \text{кА}$	10	12	14	16	18	20	22	24
Номинальное напряжение, кВ	15	6	35	15	6	35	15	6

Ход работы

- 1) Внимательно изучить теоретические сведения
- 2) Произвести выбор оборудования согласно выбранному варианту
- 3) Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

- 1) Сферы применения высоковольтных выключателей
- 2) Виды высоковольтных выключателей, основные преимущества и недостатки
- 3) Принцип выбора высоковольтных выключателей для применения в сети

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Рекомендуемая литература

1. Балаков, Ю. Н. Проектирование схем электроустановок : учеб. пособие / Ю. Н. Балаков, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов. - 3-е изд., стер. - Москва : МЭИ, 2009. - 287 с.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов . - Санкт-Петербург [и др.] : Питер, 2008. - 319 с.
3. Сибикин, Ю.Д. Эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю.Д. Сибикин. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. - 448 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Локальный электронный методический материал

Дарья Константиновна Кугучева

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Редактор И. Голубева

Локальное электронное издание

Уч.-изд. л. 4,2. Печ. л. 3,9.

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1