

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

В. Ф. Белей

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ПОДСТАНЦИИ

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический
материал по выполнению контрольной работы для студентов заочной формы
обучения по направлению подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2022

Рецензент:

доктор технических наук, профессор кафедры энергетики
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
В.И. Гнатюк

Белей В.Ф.

Электрические станции и подстанции: учебно-методическое пособие – локальный электронный методический материал по выполнению контрольной работы для студентов заочной формы обучения по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника /В.Ф. Белей. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 18с.

В учебно-методическом пособии по выполнению контрольной работы представлены методика расчета и пример выполнения контрольной работы по дисциплине «Электрические станции и подстанции», а также необходимый справочный материал. Контрольная работа предназначена для практического закрепления теоретического материала по курсу «Электрические станции и подстанции».

Рис. – 6, табл. – 4, список литературы – 3 наименований.

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие. Рекомендовано к использованию в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 30.06.2022 г. Печ. л. 1.125.

Введение

Дисциплина «Электрические станции и подстанции» относится к базовым профилирующим дисциплинам направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Содержание контрольной работы соответствует программе дисциплины «Электрические станции и подстанции» для студентов, перечисленного выше направления подготовки.

В деле совершенствования подготовки студентов по данной дисциплине важную роль играет получение практических навыков инженерных расчетов. Это достигается в процессе выполнения практических занятий, которые являются самостоятельной работой студента под руководством преподавателя, и преследует следующие задачи:

- Закрепление знания схем электрической станции и подстанций; б) выполнение технико-экономических расчетов;
- Умение производить выбор оборудования;
- Ознакомление с теоретическими основами работы и конструкцией электрических аппаратов;
- Освоение методики выбора электрических аппаратов и токоведущих частей.

Часть задач в процессе работы над дисциплиной студентам рекомендуется изучить самостоятельно. Данная дисциплина обобщает весь изученный ранее материал и готовит студента к подготовке выпускной квалификационной работы.

Учебно-методическое пособие включает в себя две задачи по следующим темам:

- Расчет термической стойкости жесткого неизолированного проводника
- Расчет электродинамических нагрузок на шинах при трехфазном КЗ

Содержание

1 Теоретические сведения к заданиям	5
1.1 Теоретические сведения к заданию №1:.....	5
1.2 Теоретические сведения к заданию №2:.....	11
2 Задание на контрольную работу	13
2.1. Задание №1	13
2.2. Задание №2	14
Критерии и нормы оценки контрольной работы.....	16
Список рекомендуемых источников.....	18

1 Теоретические сведения к заданиям

1.1 Теоретические сведения к заданию №1:

При выборе сечений проводников по допустимой температуре анализируют суточные графики нагрузки установки и определяют наибольший рабочий ток соответствующего присоединения. Чтобы температура проводника не превышала допустимого значения, наибольший рабочий ток присоединения не должен превышать допустимого значения (таблица 1.1):

$$I_{\text{доп.}} \geq I_{\text{раб.нб.}}, \quad (1.1)$$

где $I_{\text{доп.}}$ – допустимый ток, А;

$I_{\text{раб.нб.}}$ – наибольший рабочий ток присоединения, А.

Таблица 1.1 – Допустимые продолжительные токи для шин прямоугольного сечения

Размеры шин, мм.	Медные шины			Алюминиевые шины		
	Ток, А (при количестве полос на фазу)			Ток, А (при количестве полос на фазу)		
	1	2	3	1	2	3
15x3	210	—	—	165	—	—
20x3	275	—	—	215	—	—
25x3	340	—	—	265	—	—
30x4	475	—	—	365	—	—
40x4	625	—	—	480	—	—
40x5	700	—	—	540	—	—
50x5	860	—	—	665	—	—
50x6	955	—	—	740	—	—
60x6	1125	1740	2240	870	1350	1720
80x6	1480	2110	2720	1150	1630	2100
100x6	1810	2470	3170	1425	1935	2500
60x8	1320	2160	2790	1025	1680	2180
80x8	1690	2620	3370	1320	2040	2620
100x8	2080	3060	3930	1625	2390	3050
120x8	2400	3400	4340	1900	2650	3380
60x10	1475	2560	3300	1155	2010	2650
80x10	1900	3100	3990	1480	2410	3100
100x10	2310	3610	4650	1820	2860	3650
120x10	2650	4100	5200	2070	3200	4100

В случае, когда нагрузка – фиксированное значение наибольший рабочий ток можно определить по формуле:

$$I_{\text{нб.прод.}} = \frac{P_{\text{н.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.}} \cdot \cos\varphi}, \quad (1.2)$$

где $P_{\text{н.}}$ – мощность нагрузки;

$U_{\text{ном.}}$ – номинальное напряжение;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности

При КЗ около генератора (синхронного компенсатора) расчетная схема может быть приведена к двухлучевой (рис. 1.1). Здесь в одну ветвь, обозначенную буквой Г, выделен один или несколько генераторов (синхронных компенсаторов). Остальные источники энергии путем преобразования схемы объединены во вторую ветвь, обозначенную буквой С (система).

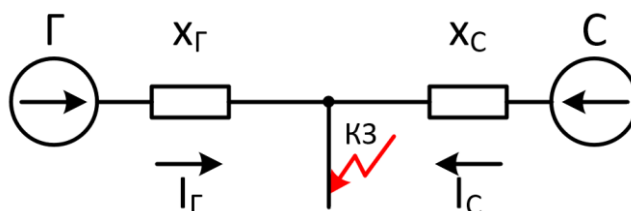


Рисунок 1.1 – Эквивалентная двухлучевая схема

Периодическая составляющая тока $I_{\text{пГ}}$ в ветви Г изменяется во времени в соответствии с параметрами генераторов (компенсаторов), характеристиками регуляторов возбуждения, удаленностью точки замыкания и др. Периодическая составляющая тока $I_{\text{пС}}$ ветви С неизменна во времени. Ток в месте КЗ (точка К) равен сумме токов $I_{\text{пГ}}$ и $I_{\text{пС}}$.

Если точка КЗ удалена от источников энергии, схема замещения может быть представлена одним лучом с эквивалентным сопротивлением $X_{\text{ЭК}}$ и неизменным во времени током $I_{\text{п}}$.

Интеграл Джоуля в двухлучевой схеме равен:

$$B_{\text{п.}} = \int_0^{t_{\text{к}}} (I_{\text{пС}} + I_{\text{пГ}})^2 dt = I_{\text{пС}}^2 t_{\text{к}} + 2I_{\text{пС}} t_{\text{к}} \int_0^{t_{\text{к}}} I_{\text{пГ}} dt + \int_0^{t_{\text{к}}} I_{\text{пГ}}^2 dt, \quad (1.3)$$

где $I_{\text{пС}}$ – периодическая составляющая тока в ветви Г;

$I_{\text{пГ}}$ – периодическая составляющая тока в ветви С.

Здесь фигурируют два интеграла — от периодической составляющей и квадрата периодической составляющей тока ветви Г. Чтобы определить эти

интегралы, введем понятия относительных интегралов: от периодической составляющей и от квадрата периодической составляющей тока КЗ:

$$Q_* = \frac{\int_0^{t_k} I_{пт} dt}{I_{п0} t_k}; B_* = \frac{\int_0^{t_k} I_{пт}^2 dt}{I_{п0}^2 t_k}, \quad (1.4)$$

где $I_{пт}$ – периодическая составляющая тока ветви Г;

$I_{п0}$ – начальное значение периодической составляющей ветви Г:

$$I_{п0} = \frac{I_{б.}}{\frac{X_d''}{2}} \quad (1.5)$$

Относительные интегралы Q_* и B_* являются функциями времени; они меньше единицы и могут быть представлены как отношения заштрихованных площадей, ограниченных кривыми $I_{пт}$ или $I_{пт}^2$, и ординатой, соответствующей t_k , к площадям соответствующих прямоугольников со сторонами $I_{п0}$ или $I_{п0}^2$ и t_k (рис. 1.2).

С введением понятий относительных интегралов токов ветви Г выражение для двухлучевой схемы принимает следующий вид:

$$B_{п.} = (I_{пс}^2 + 2I_{пс}I_{п0Г}Q_* + I_{п0Г}^2B_*) \quad (1.6)$$

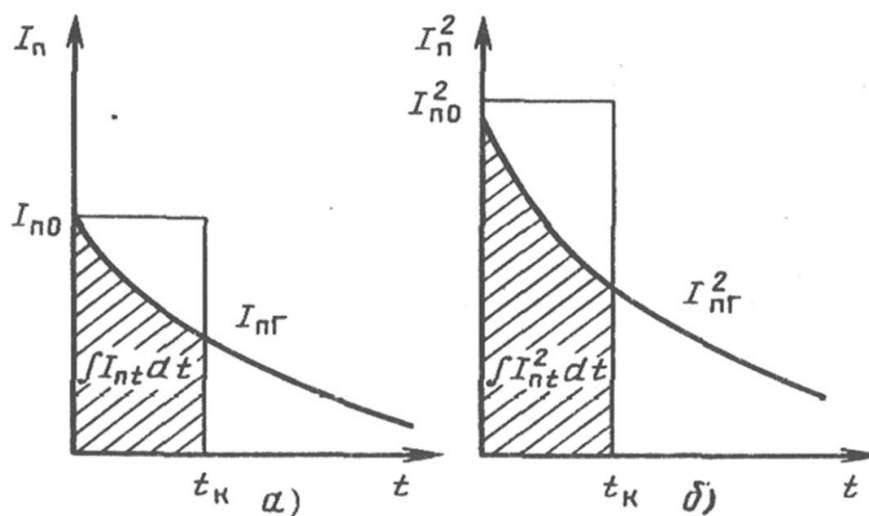


Рисунок 1.2 - схемы, поясняющие метод определения относительных интегралов Q_* и B_* .

Относительные интегралы $Q_*(t)$ и $B_*(t)$ могут быть определены по кривым (рис. 1.3), построенным в результате расчетов на ЭВМ. Для этого были вычислены относительные интегралы токов генераторов и синхронных компенсаторов различных типов для наиболее тяжелых условий, а именно: при номинальной нагрузке в предшествующем КЗ режиме и при форсировке возбуждения, возрастающей скачком до предельного значения при КЗ на выводах синхронной машины.

По характеру изменения относительных интегралов генераторы и синхронные компенсаторы были разделены на две группы. К группе I отнесены турбогенераторы (кроме ТВВ-800) и синхронный компенсатор типа КСВ-100. К группе II отнесены гидрогенераторы, турбогенератор типа ТВВ-800 и синхронные компенсаторы, кроме КСВ-100. Типовые кривые построены по наибольшим значениям относительных интегралов генераторов и компенсаторов соответствующей группы.

С помощью диаграммы на рис. 1.3 могут быть определены относительные интегралы ветви Г для заданных условий и заданного времени. Интеграл квадратичного тока может быть определен из выражения (1.6)

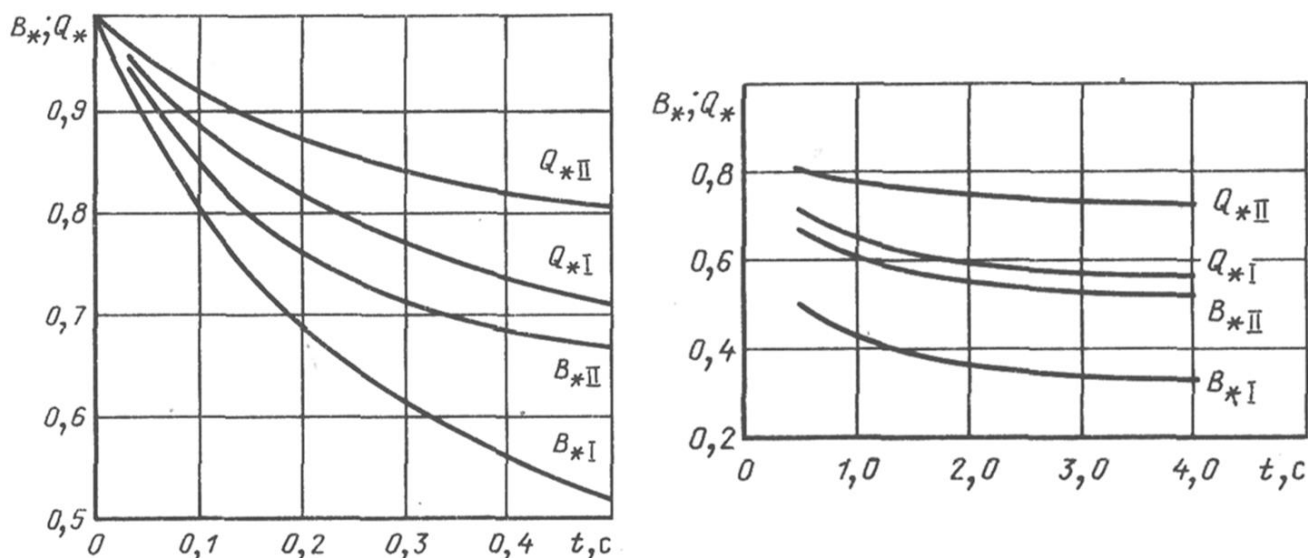


Рисунок 1.3 – Кривые для определения относительных интегралов Q_* и B_*

Апериодические составляющие токов КЗ в ветвях Г и С двухлучевой схемы затухают экспоненциально с постоянными времени $T_{aГ}$ и $T_{aС}$. При этом $T_{aГ}$ значительно больше $T_{aС}$. При обычно встречающихся значениях $T_{aС} = 0,04 \div 0,20$ с., $T_{aГ} = 0,09 \div 0,45$ с. и $t = 0,1 \div 0,4$ с. Интеграл Джоуля B_a может быть определен из выражения:

$$B_a = I_{пс}^2 T_{aС} + I_{поГ}^2 T_{aГ} + \frac{4I_{пс}I_{поГ}}{\frac{1}{T_{aС}} + \frac{1}{T_{aГ}}} \quad (1.7)$$

Конечная температура проводника при КЗ может быть определена аналитически, исходя из следующих допущений:

- Процесс нагревания принимается адиабатическим, поскольку продолжительность КЗ значительно меньше постоянной времени нагревания проводника;

- Зависимость удельного сопротивления материала проводника от температуры принимается линейной;

- Удельная теплоемкость материала проводника принимается не зависящей от температуры, поскольку изменение её незначительно по сравнению с изменением удельного сопротивления;

- Распределение тока КЗ по сечению проводника принимается равномерным.

Исходное дифференциальное уравнение, описывающее процесс нагрева проводника при КЗ, имеет следующий вид:

$$\frac{1}{s} \rho_1 \frac{\tau + \vartheta}{\tau + \vartheta_1} i_k^2 dt = s c d\vartheta, \quad (1.8)$$

где i_k – полный ток КЗ;

ϑ – текущее значение температуры проводника в переходном процессе;

ϑ_1 – начальная температура проводника;

ρ_1 – удельное сопротивление материала проводника при начальной температуре;

s – сечение проводника;

c – удельная теплоемкость материала проводника.

Начальную температуру ϑ_1 удобно принять равной нулю. Тогда после интегрирования имеем:

$$\frac{B}{s^2} = \frac{c}{\rho_0} \tau \ln \frac{\tau + \vartheta_2}{\tau}, \quad (1.9)$$

где $B = \int_0^{t_k} i_k^2 dt$ – интеграл Джоуля, $A^2 \cdot c$;

$\frac{B}{s^2} = A$ – интеграл квадратичной плотности тока КЗ, $A^2 \cdot c / m^4$

Начальную температуру шины при токовой нагрузке можно определить по выражению:

$$\vartheta_1 = \vartheta_B + (\vartheta_{ном.} - \vartheta_{Bном.}) \left(\frac{I}{I_{ном.}} \right)^2 \quad (1.10)$$

По выражению (1.9) можно построить зависимость конечной температуры проводника от интеграла квадратичной плотности тока КЗ для неизолированных медных и алюминиевых проводников (рисунок 1.4).

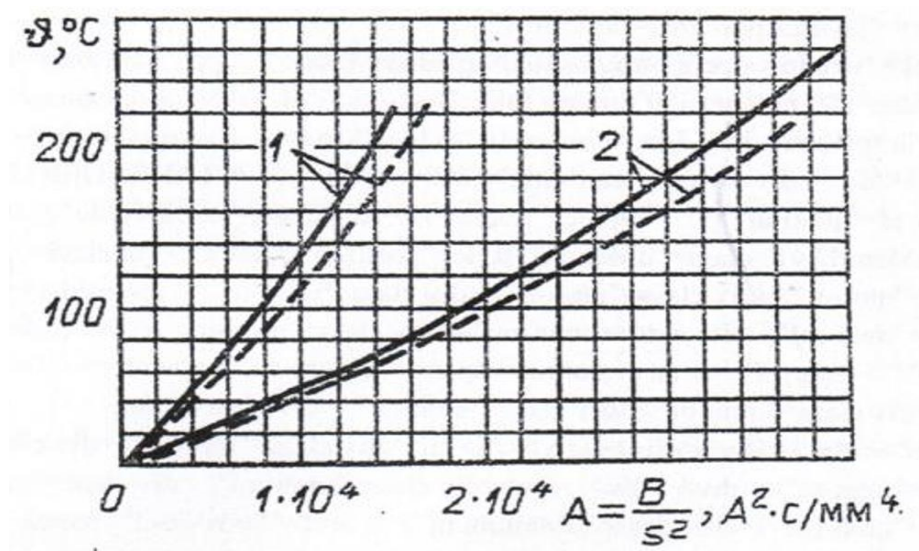


Рисунок 1.4 – Кривые для определения конечной температуры шин и кабелей при КЗ: Сплошные линии относятся к шинам, пунктирные – к кабелям с многожильными жилами; 1 – алюминий; 2 – медь

1.2 Теоретические сведения к заданию №2:

При расчете нагрузок на шины последние считаются достаточно длинными и концевые эффекты не учитываются. Электродинамические нагрузки, действующие на параллельные шины, распределены по длине равномерно.

Для параллельных шин, расположенных в одной плоскости, максимальные значения нагрузок при двух- и трехфазных КЗ наступают примерно через 0,01 с и равны, Н/м,

$$q_{max} = \frac{\alpha i^2}{a}, \quad (1.11)$$

где $\alpha = 2 \cdot 10^{-7}$ Н/А² при двухфазном и $\alpha = \sqrt{3} \cdot 10^{-7}$ Н/А² при трехфазном КЗ;

a – расстояние между осями шин, м.

Если размеры поперечного сечения шин близки к расстоянию между ними, то при расчете нагрузок следует учитывать коэффициент формы. В этом случае для шинной конструкции при двухфазном КЗ, а также для проводников одной фазы, состоящих из двух элементов, при любом виде КЗ наибольшие нагрузки вычисляются как:

$$q_{max} = \frac{k_{\phi} \cdot \alpha i_{уд}^2}{a}, \quad (1.12)$$

где k_{ϕ} – коэффициент формы;

$i_{уд}$ – ударный ток короткого замыкания в каждом элементе

Для шин, расположенных по вершинам треугольника (в частном случае в одной плоскости), наибольшие нагрузки при трехфазном КЗ находятся согласно по формуле:

$$q_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} i_{уд}^2 \cdot \xi, \quad (1.13)$$

где ξ – коэффициент расположения, который показывает, во сколько раз максимальные результирующие, изгибающие, растягивающие или сжимающие нагрузки в данной шинной линии отличаются от максимальных нагрузок, действующих в системе проводников, расположенных в одной плоскости на расстоянии a между соседними фазами при равных токах короткого замыкания (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Коэффициент максимальной нагрузки

Расположение шин	Расчетная фаза	Коэффициент ξ для максимальной нагрузки	
		Результирующей	Изгибающей
В одной плоскости (рисунок 2.2а)	А, С	0,93	0,93
	В	1,00	1,00
По вершинам прямоугольного равнобедренного треугольника (рисунок 2.2 б)	А	0,87	0,87
	В	0,95	0,43
	С	0,95	0,93
По вершинам равностороннего треугольника (рисунок 2.2в)	А	1,00	0,94
	В	1,00	0,50
	С	1,00	0,94
По вершинам равностороннего треугольника (рисунок 2.2г)	А, В, С	1,00	0,50

Таблица 2.1 – Варианты для задания №1

Вариант	$S_{Г}$, МВА	X_d''	$T_{аГ}$, с	$S_{Т}$, МВА	S , МВА	X_C	$T_{аС}$, с	$t_{к}$, с
1	60	0,264	0,26	18	140	0,3	0,05	0,2
2	60	0,264	0,26	10	160	0,35	0,04	1,0
3	60	0,264	0,26	14	150	0,4	0,06	0,5
4	60	0,264	0,26	12	140	0,4	0,05	0,3
5	60	0,264	0,26	10	160	0,3	0,04	0,4
6	100	0,191	0,30	12	150	0,35	0,04	1,0
7	100	0,191	0,30	18	140	0,35	0,06	0,4
8	100	0,191	0,30	14	160	0,4	0,05	0,5
9	100	0,191	0,30	14	150	0,3	0,06	0,2
10	100	0,191	0,30	12	140	0,3	0,05	0,3
11	120	0,157	0,37	18	160	0,4	0,06	0,4
12	120	0,157	0,37	10	150	0,35	0,05	0,3
13	120	0,157	0,37	12	140	0,4	0,04	0,5
14	120	0,157	0,37	18	160	0,3	0,04	1,0
15	120	0,157	0,37	16	150	0,35	0,06	0,2

2.2. Задание №2

Определить наибольшие результирующие и изгибающие электродинамические нагрузки при трехфазном КЗ, действующие на шины, расположенные в одной плоскости (рисунок 2.1а), а также по вершинам прямоугольного равнобедренного треугольника (рисунок 2.1б) и равностороннего треугольника (рисунок 2.1в). Расстояние между шинами (во всех конструкциях) a м, ударный ток КЗ $i_{уд.}$ кА.

Исходные данные для выполнения задания №2 выбираются по указанию преподавателя из таблицы 2.2

Таблица 2.2 – Варианты для задания №2

Вариант	рисунок	a , м.	$i_{уд.}$, кА.	Вариант	рисунок	a , м.	$i_{уд.}$, кА.
1	а	0,4	45	9	а	0,5	55
2	б	0,3	50	10	б	0,5	60
3	в	0,5	55	11	в	0,4	45
4	г	0,6	60	12	г	0,3	50
5	а	0,3	60	13	а	0,6	50
6	б	0,4	45	14	б	0,6	55
7	в	0,3	50	15	в	0,6	60
8	г	0,5	55				

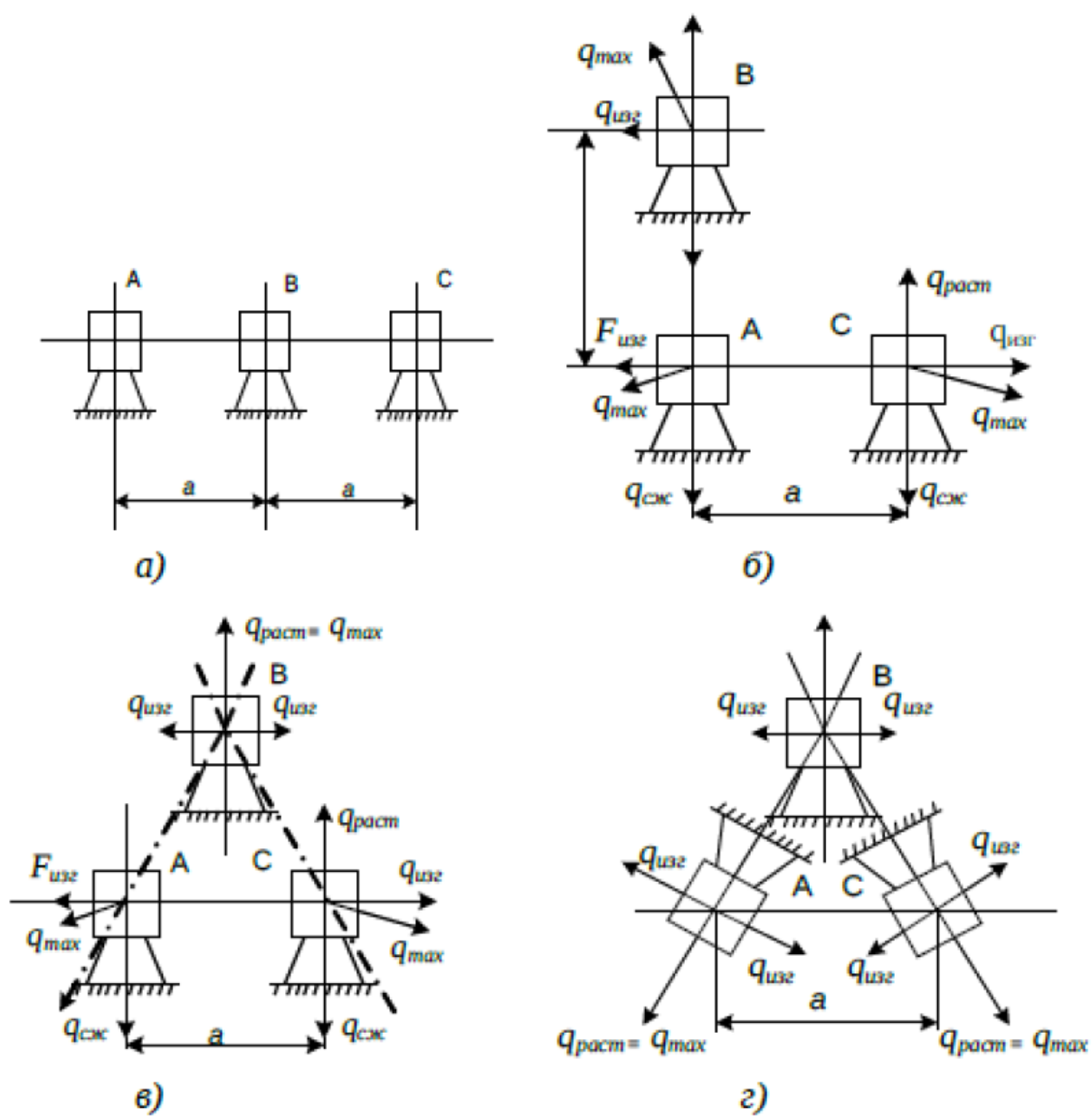


Рисунок 2.2 – Шинные конструкции

Критерии и нормы оценки контрольной работы

Контрольная работа перед сдачей ее на проверку преподавателем должна быть подписана студентом. Работа представляется преподавателю, выдавшему задание. Контрольная работа проверяется преподавателем, который дает краткий устный отзыв. В нем дается заключение о допуске или недопуске работы к защите. При наличии существенных недостатков контрольная работа возвращается студенту и должна быть им доработана, а после повторно представлена для проверки.

Критериями оценки работы являются:

- Полнота выполнения работы;
- Степень изученности литературных источников по рассматриваемому вопросу;
- Обоснованность выводов и предложений;
- Обоснованность и качество расчётов;
- Соблюдения требований государственных стандартов к оформлению работы;
- Содержание доклада при защите работы и качество ответов на вопросы;
- Самостоятельность выполнения задания.

Критерии оценивания различаются для расчетной части и устных ответов при защите работы. По результатам выполнения расчетной части и последующей защиты проекта выставляется оценка: «зачтено» или «не зачтено».

Оценка «зачтено» за выполнение расчетных заданий выставляется при следующих условиях:

- Методика и порядок расчета верные.
- Ошибки отсутствуют, либо имеются несущественные вычислительные ошибки.
- Имеются вычислительные ошибки, обусловленные невнимательностью при расчетах, которые не привели к существенному искажению результата.
- Имеются незначительные ошибки в методологии, ошибки в промежуточных расчетах или выборе коэффициентов, обусловленные неполным пониманием принципа расчета, при этом конечный результат имеет приемлемые отклонения.

Оценка «не зачтено» выставляется если при расчетах применена неверная методология, нарушен порядок расчета, имеется серьезная системная ошибка, обусловленные непониманием принципа расчета и приведшие к ошибочному результату.

Целью устной защиты является демонстрация понимания решаемых задач и самостоятельности при выполнении работы. Вопросы к устной защите контрольной работы ограничиваются описанием хода решения, а также

интерпретацией полученных результатов и не выходят за рамки заданий. Оценка «зачтено» за устные ответы по работе выставляется при соблюдении следующих условий:

- Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект.
- В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации.
- В состоянии найти необходимую информацию для решения поставленной задачи.

Итоговая оценка «зачтено» выставляется только в том случае, если в обеих частях были получены оценки «зачтено».

Список рекомендуемых источников

1. Васильев А. А. Электрическая часть станций и подстанций: учеб. пособие по спец. "Электрические станции"/Васильев А. А. - Москва: Энергоатомиздат, 1990. — 576 с.
2. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 52736—2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. Москва: Стандартинформ, 2007.
3. Балаков Ю.Н., Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. Проектирование схем электроустановок: учебное пособие для вузов/Балаков Ю.Н. — Москва: Издательский Дом МЭИ, 2006. — 288 с.