

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Физика и электротехника»

В. В. Соленков, А. В. Козлов, К. М. Медведев

ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

ПРАКТИКУМ

Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию в области энергетики и энергетического оборудования в качестве практикума по выполнению лабораторных работ для студентов учреждений высшего образования, обучающихся по специальностям 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»

Электронный аналог печатного издания

Рецензент: зав. каф. «Электротехника» БелГУТа канд. техн. наук, доц. В. А. Пацкевич; зам. зав. отделом технических средств контроля за добычей нефти РУП «ПО «Белоруснефть» БелНИПИнефть канд. техн. наук О. В. Лымарь

Соленков, В. В.

C60

Трехфазные электрические цепи. Переходные процессы в линейных электрических цепях : практикум / В. В. Соленков, А. В. Козлов, К. М. Медведев ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. – 123 с. – Систем. требования: РС не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Мb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: https://elib.gstu.by. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-487-2.

Подготовлено в соответствии с программой дисциплины «Теоретические основы электротехники». Изложены основные вопросы теории линейных электрических цепей курса теоретических основ электротехники. Кроме задач, схемы и параметры которых выбраны произвольно с целью подчеркнуть тот или иной метод расчета, приведены задачи, возникающие при исследовании процессов в реальных электротехнических устройствах. Некоторые задачи содержат методические указания.

Для студентов технических специальностей вузов.

УДК 621.3.011.7(075.8) ББК 31.211я73

ISBN 978-985-535-487-2

- © Соленков В. В., Козлов А. В., Медведев К. М., 2022
 © Учреждение образования «Гомельский
- государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2022

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий практикум подготовлен в соответствии с программами курса «Теоретические основы электротехники» для специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)». В него включены восемь расчетно-лабораторных работ (далее – РЛР) по разделам «Трехфазные электрические цепи» и «Переходные процессы в линейных электрических цепях».

Все работы поставлены на универсальных учебно-исследовательских лабораторных стендах (УИЛС-1), оборудованных соответствующим набором элементов (резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов и др.) и современных средств электрических измерений.

Использование стендов УИЛС-1 и соответствующего методического обеспечения позволяет реализовать фронтальный метод проведения лабораторных работ непосредственно после изучения конкретной темы или раздела курса на лекциях и практических занятиях. При этом каждая бригада студентов (2–3 человека) выполняет свой индивидуальный вариант лабораторной работы благодаря наличию на стенде элементов с регулируемыми параметрами.

Все лабораторные работы выполняются при пониженном напряжении (не выше 40 В) и токах нагрузки не более 150–200 мА. Это повышает безопасность работы на стендах, а также позволяет снизить потребление электроэнергии.

Программа лабораторных работ позволяет внедрить перспективную форму обучения, предусматривающую чередование расчета реальных электрических цепей с экспериментальными исследованиями этих цепей в лаборатории и ориентированную на самостоятельную работу студентов под руководством и контролем преподавателя.

Далее приводятся методические рекомендации по проведению цикла РЛР по исследованию установившихся режимов в трехфазных электрических цепях и переходных процессов в линейных электрических цепях постоянного тока.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ «ФИЗИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»

Лабораторные стенды УИЛС-1 являются действующими электроустановками и при определенных условиях могут стать источником опасности поражения электрическим током. Тело человека обладает свойством электропроводности и при соприкосновении с токоведущими частями установки, находящейся под напряжением, оно становится звеном электрической цепи. Возникающий в теле человека электрический ток может вызвать электрическую травму (ожог кожи и т. п.) или нанести тяжелые поражения нервной, сердечной и дыхательной системам организма (электрический удар).

Поэтому при работе в лаборатории необходимо всегда помнить о возможности поражения электрическим током, быть предельно собранным, внимательным и строго выполнять следующие правила:

1. Перед началом работы следует убедиться в целостности и исправности блоков и элементов наборного поля, соединительных проводов и перемычек. Пользоваться неисправными элементами, а также оголенными проводами без штырей *запрещается*.

2. Сборку электрической цепи необходимо производить только при отключенных источниках питания. При этом должна быть обеспечена достаточная плотность контактов во всех разъемных соединениях.

3. Напряжение к стендам подается преподавателем.

4. Перед включением источника питания необходимо его регулятор вывести в нулевое положение, а на регулируемых элементах (резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности) установить заданные значения параметров. Переключатели пределов измерительных приборов установить на значения, превышающие расчетные электрические величины.

5. Включение цепи под напряжение можно производить *только с разрешения преподавателя* (или мастера производственного обучения) после проверки правильности ее сборки.

6. Любые изменения в структуре цепи можно производить только *при отключенном источнике питания*. Повторное включение цепи под напряжение производится *только с разрешения преподавателя*.

7. При обнаружении неисправностей, могущих вызвать поражение электрическим током или порчу оборудования, следует *немедлен*- но отключить источник питания и поставить об этом в известность преподавателя (или мастера производственного обучения).

8. По окончании работ в лаборатории *преподаватель обязан* отключить главный щит (снять напряжение со стендов).

К работе в лаборатории студенты допускаются *только после инструктажа по технике безопасности* (дата проведения инструктажа фиксируется преподавателем в специальном кафедральном журнале).

Ответственность за соблюдение правил техники безопасности возлагается на студентов, работающих в лаборатории, а контроль за их выполнением ведется преподавателями и сотрудниками кафедры, участвующими в проведении лабораторных занятий.

Выполнение каждой РЛР предполагается в два этапа. *Первый* эman (подготовительный) работы выполняется заранее во время, предусмотренное для самостоятельной работы.

На этом этапе студент обязан:

1) изучить теоретический материал по учебнику, конспекту лекций либо примерам, рассмотренным на практических занятиях;

2) уяснить цель и содержание работы;

3) выполнить расчетную часть работы (т. е. произвести расчет цепи с учетом заданных параметров элементов и определить требуемые по заданию величины);

4) подготовить *протокол исследований*, в котором для каждого пункта рабочего задания привести:

– схемы проведения эксперимента с необходимыми измерительными приборами;

– таблицы для записи расчетных величин, а также показаний приборов и вычисленных по ним величин;

– расчетные формулы, качественные графические построения, диаграммы и т. п.

Протокол исследований выполняется в рабочей тетради каждым студентом отдельно (независимо от числа студентов в бригаде) и представляется преподавателю перед выполнением экспериментальной части работы.

Без подготовленного протокола исследований студент к выполнению экспериментальной части работы не допускается.

Второй этап работы (экспериментальная часть и анализ результатов) выполняется непосредственно на рабочем месте в учебной лаборатории во время занятий по расписанию. При проведении экспериментов следует соблюдать правила техники безопасности и правила работы в электроустановках.

Получив разрешение преподавателя на выполнение экспериментальной части, бригада студентов (2–3 человека) выполняет сборку исследуемой цепи и проводит измерения физических величин согласно заданию.

Результаты измерений обрабатываются и заносятся в соответствующие таблицы протокола. Все записи делаются ручкой четко и аккуратно. Если в процессе измерений допущены ошибки, неправильные результаты, занесенные в протокол, зачеркиваются и записываются новые значения.

По окончании каждой части работы (до разборки цепи), необходимо оценить правильность полученных результатов и представить преподавателю для проверки соответствующую таблицу, а по окончании всей работы – протокол для визирования и отметки в групповом журнале.

Расчетно-лабораторная работа № 1

СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ФАЗ ТРЕХФАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Цель работы: 1) исследование различных схем соединения фаз трехфазных источников энергии; 2) оценка возможных последствий неправильного (ошибочного) соединения фаз трехфазных источников энергии.

1. Основные теоретические положения

Трехфазная электрическая цепь может быть представлена как совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе на угол 120° и полученные в одном источнике электрической энергии.

Простейшая трехфазная цепь состоит из трех основных элементов:

– источника (синхронного генератора), посредством которого механическая энергия преобразуется в электрическую;

– линии передачи со всем необходимым оборудованием;

– приемников (потребителей), которые могут быть как трехфазными, так и однофазными.

Особенность простейшего трехфазного генератора заключается в том, что три его обмотки, от которых получает электрическую энергию внешняя цепь, конструктивно сдвинуты в пространстве на угол 120° одна относительно другой. В связи с этим наводимые в обмотках ЭДС (каждая из них во времени изменяется по синусоидальному закону) отличаются одна от другой по фазе на 120°. Принято каждую из обмоток называть «фазой» генератора и обозначать латинскими буквами *A*, *B* и *C*. При этом начала фаз обозначают теми же буквами *A*, *B* и *C*, а концы – буквами *X*, *Y* и *Z*. За положительное направление ЭДС в каждой фазе принято направление от конца фазы к началу (рис. 1.1).

Обычно наведенные в фазах ЭДС имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120°. Такая система ЭДС называется *симметричной*. Если же ЭДС не равны по величине или сдвинуты друг относительно друга на угол, не равный 120°, систему ЭДС называют *несимметричной*.

Если ЭДС какой-либо отдельной фазы (например, фазы *A*), принять за исходную и считать ее начальную фазу равной нулю, то

мгновенные значения симметричной системы ЭДС можно записать в тригонометрической форме:

$$e_A = E_m \sin\omega t B; \quad e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) B,$$
$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) B, \quad (1.1)$$

а соответствующие комплексы действующих значений – в виде:

$$\underline{E}_A = E \mathbf{B}, \quad \underline{E}_B = Ee^{-j120^\circ}\mathbf{B}, \quad \underline{E}_C = Ee^{-j240^\circ} = Ee^{j120^\circ}\mathbf{B}.$$
 (1.2)

В любой момент времени для симметричной системы ЭДС справедливы равенства:

$$e_A + e_B + e_C = 0$$
 или $\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0.$ (1.3)

На схеме замещения каждую из фаз генератора условно изображают так, как показано на рис. 1.1. Для простоты обмотки генератора не показывают, а их сопротивлениями ввиду их малости по сравнению с сопротивлениями нагрузки обычно пренебрегают.



Puc. 1.1

Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС приведена на рис. 1.2.

На векторной диаграмме (рис. 1.2, *a*) изображена симметричная система ЭДС прямой последовательности фаз, в которой ЭДС \underline{E}_B отстает на 120° от ЭДС \underline{E}_A , а ЭДС \underline{E}_C – на такой же угол от ЭДС \underline{E}_B . Если изменить направление вращения ротора генератора, то последо-

вательность фаз изменится на обратную, как показано на рис. 1.2, *б*. От последовательности (порядка чередования) фаз зависит направление вращения асинхронных двигателей. Для определения последовательности фаз применяют специальные приборы – фазоуказатели.



Puc. 1.2

Если фазы обмотки генератора электрически не соединены между собой, то они образуют *несвязанную* трехфазную систему. В этом случае каждая из фаз должна соединяться со своим приемником двумя проводами. Несвязанные цепи не получили применения вследствие их неэкономичности, вызванной большим расходом проводов, соединяющих генераторы и приемники. Более экономичными являются *связанные* цепи, в которых обмотки генератора соединяют между собой.

Известны два способа соединения фаз обмотки трехфазного генератора – *звездой* и *треугольником*.

При соединении звездой концы фаз X, Y и Z обмотки генератора соединяют в одну общую точку 0 или N, которую называют нейтральной точкой (или нейтралью) генератора (рис. 1.3, *a*).



Puc. 1.3

Напряжения между началом и концом каждой фазы генератора называют *фазными*. За условные положительные направления фазных напряжений приняты направления от начала к концу каждой фазы. На практике часто пренебрегают внутренним сопротивлением фаз генератора; поэтому фазные напряжения U_A , U_B и U_C считают численно равными фазным ЭДС, т. е.

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A, \quad \underline{U}_B = \underline{E}_B \quad \mathbf{M} \quad \underline{U}_C = \underline{E}_C. \tag{1.4}$$

Напряжения U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} между одноименными зажимами (т. е. началами) разных фаз называют *линейными*. За условное положительное направление каждого линейного напряжения принято направление от начала любой фазы к началу отстающей фазы.

На рис. 1.3, б приведена топографическая векторная диаграмма напряжений генератора, фазы которого соединены звездой. Из диаграммы видно, что комплексы действующих значений линейных напряжений связаны с комплексами действующих значений фазных напряжений следующими равенствами:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B, \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C \quad \mathbf{M} \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \quad (1.5)$$

Необходимо обратить внимание на то, что стрелка, соответствующая условному положительному направлению, например, напряжения U_{AB} направлена от точки A к точке B (рис. 1.3, a), а вектор U_{AB} на комплексной плоскости, наоборот, – от точки B к точке A в соответствии с (1.5) и правилами векторной алгебры. То же касается векторов U_{BC} и U_{CA} .

Из треугольника ANB следует, что

$$U_{\pi} = 2U_{\phi} \cos 30^{\circ} = \sqrt{3}U_{\phi}, \qquad (1.6)$$

т. е. линейные напряжения в $\sqrt{3}$ раз больше фазных.

Кроме того, комплексы действующих значений линейных на-пряжений

$$\underline{U}_{AB} = U_{\pi} e^{j30^{\circ}}, \ \underline{U}_{BC} = U_{\pi} e^{-j90^{\circ}} \ \mathbf{M} \ \underline{U}_{CA} = U_{\pi} e^{j150^{\circ}}$$
(1.7)

так же, как и комплексы фазных напряжений U_A , U_B и U_C , образуют симметричную систему напряжений.

При соединении фаз генератора в замкнутый треугольник соответствующие зажимы X и B, Y и C, Z и A объединяют между собой (рис. 1.4, *a*). При этом линейные и фазные напряжения генератора оказываются равными, т. е.

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{A}, \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_{B} \quad \text{i} \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_{C}. \tag{1.8}$$

При отсутствии нагрузки фазы генератора оказываются соединенными последовательно. Однако такое соединение не равносильно короткому замыканию (как это имело бы место при подобном соединении источников постоянного напряжения), так как при симметричной системе ЭДС их сумма в соответствии с (1.3) равна нулю.



Puc. 1.4

На рис. 1.4, б приведена топографическая векторная диаграмма напряжений генератора, фазы которого соединены треугольником.

При соединении фазных обмоток генератора иногда возникают ошибки, из-за которых вместо замкнутого треугольника (рис. 1.4, *a*) получается другое соединение (рис. 1.5, *a*).



Puc. 1.5

Причиной этого может быть другое направление намотки одной из обмоток или ошибочное включение ее конца и начала. Пока треугольник разомкнут, т. е. точки A и Z не соединены, напряжение между ними оказывается равным двойному фазному напряжению $2U_{\phi}$ (рис. 1.5, δ). Если их соединить, произойдет короткое замыкание.

Переворачивание полярности одной из обмоток при их соединении звездой (рис. 1.6, *a*) образует «веер» фазных напряжений [5], как показано на рис. 1.6, *б*.



Puc. 1.6

Короткого замыкания при этом не будет, но линейное напряжение, близкое к номинальному, сохранится лишь между фазами A и C. Напряжения U_{BC} и U_{AB} уменьшатся и будут примерно равны фазному напряжению. Таким образом, нарушение симметрии линейных напряжений при соединении обмоток генератора «веером» вместо звезды в сетях освещения приведет к уменьшению накала ламп, а в сетях, питающих электродвигатели, – к несимметрии токов в обмотках электродвигателей, искажению вращающего магнитного поля, резкому снижению вращающего момента электродвигателей, а также к изменению направления их вращения.

Подробный расчет и анализ трехфазной цепи с ошибочным соединением одной из фазных обмоток генератора приведен в задаче 2 Приложения 6.

2. Исходные данные

Перед выполнением РЛР № 1 каждая бригада получает задание, вариант которого состоит из двух цифр. Первая из них соответствует номеру стенда и номеру столбца в табл. 1.1, где содержатся сведения о величине фазной ЭДС симметричного трехфазного источника, а вторая – номеру схемы соединения фаз трехфазного источника, приведенных на рис. 1.7 и 1.8.

Таблица 1.1

Вариант задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фазная ЭДС, В	15	17	20	22	24	16	23	18	21

Таким образом, в работе используются:

1. Блок трехфазного напряжения частотой 50 Гц (расположен в нижнем съемном блоке слева от наборного поля). Представляет собой трехфазный источник с независимыми фазами, напряжения которых регулируются ступенчато от 0 до 40 В с интервалом в 1 В. Допустимый ток в каждой фазе – не более 1 А.

2. Две схемы соединения фаз трехфазного источника: в одной из них фазные ЭДС соединены звездой (в соответствии с рис. 1.7); во второй схеме фазные ЭДС соединены последовательно в открытый треугольник (в соответствии с рис. 1.8).

3. Величина фазной ЭДС трехфазного источника энергии.

4. Измерительные приборы и осциллограф, установленные на стенде.



3. Расчетная часть

1. Рассчитать значения напряжений: для схем соединения фаз источника звездой – U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} ; для схем соединения фаз источника треугольником – U_{Δ} , где U_{Δ} – напряжение между крайними точками треугольника. Результаты расчета занести в табл. 1.2.

2. По результатам расчета построить векторные топографические диаграммы ЭДС и напряжений, как показано на рис. 1.5, б и 1.6, б.

Таблица 1.2

-	Напряжение, В							
Значение		Схема 2						
папряжения	U _{AB}	U_{BC}	U _{CA}	U_{\varDelta}				
Расчетное (в комплексной форме)								
Измеренное								

4. Экспериментальная часть

1. Определить прямую последовательность фаз трехфазного источника. Для этого необходимо:

а) крайнюю левую фазу трехфазного источника, обозначенную на стенде буквой «А», принять за фазу *A*;

б) выводы каждой фазы, расположенные слева, принять за начала фаз, а выводы, расположенные справа, – за концы фаз;

в) с помощью соединительных проводов начала и концы фаз вынести на наборное поле. Концы фаз соединить между собой и к общей точке подключить нечувствительный вход каналов I или II осциллографа;

г) потенциальные входы каналов I и II подключить к генератору так, как показано на рис. 1.9;

д) установить на экране осциллографа начальную фазу напряжения фазы *A* источника равной нулю;

е) масштаб развертки по горизонтальной оси выбрать таким, чтобы на экране осциллографа были видны напряжения двух каналов.



Если напряжение канала II отстает от напряжения канала I, то соответствующая фаза источника, подключенная к каналу II, является фазой *B*. Если же напряжение канала II опережает напряжение канала I, то фаза источника, подключенная к каналу II, является фазой *C*. Аналогично исследовать третью фазу источника. Зафиксировать названия фаз и расположение их начал и концов в дневнике для исследований.

2. С помощью вольтметра В7-58/2 выставить равные ЭДС трехфазного источника согласно варианту задания. Соединить фазы источника по схеме, приведенной на рис. 1.7.

3. Измерить величины напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} и занести их в табл. 1.2.

4. Соединить фазы источника по схеме, приведенной на рис. 1.8. Измерить величину напряжения U_{AZ} и занести его в табл. 1.2.

Результаты измерений сопоставить с соответствующими данными расчета. В случае их существенного различия установить возможные причины (ошибки в расчетах; ошибки при сборке цепи; неисправность соединительных проводов и т. п.). После их устранения эксперимент повторить.

5. Анализ полученных результатов. Выводы

Для того чтобы провести анализ полученных результатов, необходимо:

1) по данным табл. 1.2 оценить различия между расчетными и экспериментальными значениями заданных напряжений. Объяснить причины этих различий;

2) в выводах сделать заключение о возможных последствиях ошибочного соединения фаз трехфазных источников энергии.

6. Содержание отчета

Отчет по РЛР № 1 должен содержать:

1) титульный лист по стандартной форме;

2) цель работы;

3) исходные данные (схемы соединения фаз и величина фазной ЭДС трехфазного источника энергии);

4) расчет заданных напряжений в комплексной форме записи;

5) таблицу с результатами расчета и измерений;

6) векторные топографические диаграммы ЭДС и напряжений для каждой из заданных схем трехфазного источника энергии;

7) выводы.

Контрольные вопросы

1. Каковы преимущества трехфазных электрических цепей по сравнению с однофазными?

2. Что представляет собой трехфазная электрическая цепь? Из каких основных элементов она состоит? Каковы функции этих элементов?

3. Как устроен трехфазный источник энергии (трехфазный синхронный генератор)? Объяснить принцип действия такого источника.

4. Что представляет собой трехфазная симметричная система ЭДС? Как определяют прямую (обратную) последовательность чередования фазных ЭДС?

5. Как принято обозначать условные положительные направления ЭДС трехфазного источника энергии на электрических схемах замещения?

6. Каковы основные способы соединения фазных обмоток (в дальнейшем – фаз) трехфазного источника энергии? Привести электрическую схему замещения каждого из них.

7. Какие напряжения трехфазного источника в случае соединения его фаз *звездой* называют *фазными*, а какие – *линейными*? Как принято обозначать условные положительные направления фазных и линейных напряжений на электрических схемах замещения?

8. Привести векторную топографическую диаграмму напряжений трехфазного источника в случае соединения его фаз звездой (треугольником).

9. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями трехфазного источника энергии в случае соединения его фаз звездой (треугольником)? 10. Почему соединение фаз трехфазного источника треугольником не равносильно короткому замыканию (как это имело бы место при подобном соединении источников постоянного напряжения)?

11. Всегда ли при симметричной системе фазных ЭДС симметрична система и линейных ЭДС?

12. Привести возможные ошибки при соединении фаз трехфазного источника звездой (треугольником). Объяснить последствия каждой из них. Расчетно-лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК–ТРЕУГОЛЬНИК» (нагрузка однородная активная)

Цель работы: 1) исследование свойств и особенностей расчета трехфазной цепи при соединении фаз источника (трехфазного генератора, вторичной обмотки трехфазного трансформатора) и приемника треугольником; 2) приобретение навыков анализа работы трехфазной цепи по схеме «треугольник–треугольник» с помощью векторных диаграмм напряжений и токов.

1. Основные теоретические положения

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть как однофазными, так и трехфазными. К однофазным приемникам относятся электрические лампы накаливания, другие осветительные приборы, различные бытовые приборы, однофазные двигатели и т. п.; к трехфазным – трехфазные асинхронные электродвигатели, индукционные печи.

Подобно фазам обмоток генератора фазы трехфазных приемников, а также однофазные приемники могут соединяться либо треугольником, либо звездой. При этом способ соединения фаз обмоток генератора *не предопределяет* способ соединения фаз приемников.

Все трехфазные приемники подразделяют на *симметричные* и *несимметричные*. *Симметричными* называют приемники, комплексные сопротивления фаз которых одинаковы, т. е. (в случае соединения фаз приемника треугольником)

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = Z_{\phi} e^{j\phi}.$$
(2.1)

Если это условие не выполняется, приемники называют *несимметричными*. При этом трехфазная *несимметричная* нагрузка может быть *равномерной*, если

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}, \ a \ \phi_{ab} \neq \phi_{bc} \neq \phi_{ca}$$
(2.2)

или однородной, если

$$\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca}, \quad a \quad Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}.$$
(2.3)

На рис. 2.1, *а* приведена трехфазная цепь по схеме «треугольник-треугольник».



Puc. 2.1

При соединении фаз генератора в замкнутый треугольник соответствующие зажимы $X \, u \, B$, $Y \, u \, C$, $Z \, u \, A$ объединяют между собой. При отсутствии нагрузки фазы генератора оказываются соединенными последовательно. Однако, как было отмечено выше (см. РЛР № 1), такое соединение не равносильно короткому замыканию, поскольку при симметричной системе ЭДС их сумма в соответствии с (1.3) в любой момент времени равна нулю.

Согласно (1.8) линейные напряжения генератора U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} будут равны соответствующим фазным напряжениям U_A , U_B и U_C , т. е.

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{A}, \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_{B}, \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_{C}.$$

Фазы приемника \underline{Z}_{ab} , \underline{Z}_{bc} и \underline{Z}_{ca} соединены между собой также треугольником и подключены к источнику с помощью проводов Aa, Bb и Cc, которые называют *линейными*. В линейных проводах протекают *линейные токи* $\underline{I}_A, \underline{I}_B$ и \underline{I}_C , за условные положительные направления которых приняты направления от источника к приемнику.

Таким образом, к каждой фазе приемника приложено соответствующее фазное напряжение генератора. Поэтому фазные напряжения генератора одновременно являются фазными напряжениями приемника, т. е.

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_A, \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_B, \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_C.$$

Токи \underline{I}_{ab} , \underline{I}_{bc} и \underline{I}_{ca} в фазах приемника называют фазными токами. Их условные положительные направления совпадают с условными положительными направлениями фазных напряжений \underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} и \underline{U}_{ca} .

Очевидно, при известном (заданном) фазном напряжении генератора фазные токи приемника могут быть определены по закону Ома в виде:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_{ab}}, \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_{bc}}, \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_{ca}}.$$
 (2.4)

Линейные токи определяются с учетом фазных токов из уравнений, составленных по I закону Кирхгофа для узлов *a*, *b* и *c* (рис. 2.1):

$$\underline{I}_{A} = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \quad \underline{I}_{B} = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \quad \underline{I}_{C} = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$
(2.5)

При симметричной активной нагрузке токи в фазах приемника (рис. 2.2, a) одинаковы по величине, совпадают по фазе с соответствующими фазными напряжениями источника и сдвинуты друг относительно друга на угол 120°. Линейные токи, построенные в соответствии с (2.5), образуют также симметричную систему, причем

$$I_{\pi} = 2I_{\phi} \cos 30^{\circ} = \sqrt{3}I_{\phi}.$$
 (2.6)



Puc. 2.2

В случае несимметричного активного приемника токи в фазах приемника, а также токи в линейных проводах окажутся разными (рис. 2.2, δ) и равенство (2.6) нарушается.

При обрыве одной из фаз симметричного приемника (например, фазы ca) токи в фазах ab и bc, а также линейный ток I_{B} останутся прежними. Линейные токи I_A и I_C в соответствии с (2.5) окажутся равными по величине фазным: $\underline{I}_A = \underline{I}_{ab}$ и $\underline{I}_C = -\underline{I}_{bc}$ (рис. 2.3, *a*), т. е. уменьшатся по величине в $\sqrt{3}$ раз.



Puc. 2.3

При обрыве одного из линейных проводов (например, провода *Cc*) напряжение на фазе и ток в фазе <u>Z</u>_{ab} симметричного приемника (рис. 2.3, δ) не изменятся. Что касается напряжений на фазах \underline{Z}_{bc} и <u>Z</u>_{ca}, то их величина окажется равной половине фазного напряжения генератора, т. е. 0,5 U₄. Следовательно, токи в этих фазах также уменьшатся в 2 раза и осветительные приборы будут работать в полнакала, что является недопустимым и определяет подобный режим работы трехфазной цепи как аварийный.

Таким образом, особенность соединения фаз приемника треугольником заключается в том, что изменение режима одной из его фаз не влияет на режим работы остальных фаз, так как они подключены к неизменным линейным напряжениям генератора. Изменяться будут лишь линейные токи в проводах, соединенных с данной фазой.

Поэтому соединение треугольником широко используется для включения несимметричных однофазных приемников, в частности, осветительных приборов в трехпроводную осветительную сеть.

В заключение следует отметить, что на практике фазы трехфазных генераторов соединяют в треугольник крайне редко по следующим соображениям (причинам) [6]:

22

1) при таком соединении для создания заданного линейного напряжения фазы генератора приходится рассчитывать на напряжение в $\sqrt{3}$ раз большее, чем при соединении звездой, что приводит к увеличению размеров и стоимости генератора;

2) в случае отклонения ЭДС генератора от синусоидальной формы вследствие наличия высших гармоник сумма мгновенных значений ЭДС не будет равна нулю и в обмотках генератора при отсутствии нагрузки возникнут токи, которые вызовут дополнительный нагрев обмоток и снижение КПД генератора;

3) наличие одного технологического напряжения, что сужает круг приемников, подключаемых к генератору.

Что касается фаз вторичной обмотки трехфазного силового трансформатора, то такое соединение не только распространено, но иногда выполняется с целью получения внутри трансформатора токов гармоник, кратных трем.

2. Исходные данные

В РЛР № 2 студенты каждой бригады исследуют четыре режима трехфазной цепи по схеме «треугольник–треугольник» (рис. 2.1): симметричный, несимметричный, с обрывом фазы приемника и с обрывом одного из линейных проводов.

В табл. 2.1 в соответствии с номером стенда, на котором работает бригада, указаны: величина фазного напряжения симметричного трехфазного источника; номера резисторов в фазах приемника, а также фаза приемника и линия, в которых происходит обрыв.

В симметричном режиме в две фазы приемника следует включать одинаковые сопротивления R_1 , R_2 или R_3 (размещенные в блоке переменного сопротивления) или R_7 и R_8 (из ящика для элементов), а в третью – сопротивление $R_{\text{бпс}}$, которое в симметричном режиме необходимо установить равным сопротивлению других фаз.

В несимметричном режиме сопротивление *R*_{бпс} должно быть в 2–2,5 раза больше сопротивлений других фаз.

Таким образом, в работе используются:

1. Блок трехфазного напряжения.

2. Блок переменного сопротивления (БПС).

3. Резисторы R_1 , R_2 , R_3 или R_7 и R_8 .

4. Измерительные приборы, установленные на стенде.

						Таблица
Номер	<i>U</i> . B	Эле	менты в фа	13ax	0	Обрыв Примойного
стенда	<i>U</i> φr, D	ab	bc	са	фазы	провода
1	8	<i>R</i> ₂	<i>R</i> ₃	R _{бпс}	ab	Aa
2	12	<i>R</i> ₂	R _{бпс}	<i>R</i> ₃	bc	Bb
3	11	<i>R</i> ₇	R_8	R _{бпс}	са	Сс
4	8	R _{бпс}	R_1	<i>R</i> ₃	ab	Bb
5	7	R _{бпс}	R_7	<i>R</i> ₈	bc	Сс
6	10	<i>R</i> ₂	R _{бпс}	<i>R</i> ₃	са	Aa
7	6	R _{бпс}	R_2	<i>R</i> ₃	ab	Сс
1	7	R _{бпс}	R_2	<i>R</i> ₃	bc	Сс
2	11	<i>R</i> ₃	R_2	R _{бпс}	ab	Aa
3	12	<i>R</i> ₇	R _{бпс}	R ₈	са	Bb
4	9	R_3	R _{бпс}	R_1	bc	Aa
5	8	R _{бпс}	R_8	<i>R</i> ₇	са	Bb
6	9	R_2	R_3	R _{бпс}	ab	Сс
7	7	R_2	R _{бпс}	R ₃	bc	Сс
1	9	<i>R</i> ₂	R _{бпс}	<i>R</i> ₃	ab	Bb
2	14	R _{бпс}	R_3	<i>R</i> ₂	bc	Сс
3	13	<i>R</i> ₇	R _{бпс}	R ₈	са	Aa
4	10	R_1	R ₃	R _{бпс}	са	Сс
5	9	R_8	<i>R</i> ₇	R _{бпс}	ab	Bb
6	14	R _{бпс}	<i>R</i> ₃	<i>R</i> ₂	bc	Aa
7	8	<i>R</i> ₂	<i>R</i> ₃	R _{бпс}	са	Bb
1	7	R _{бпс}	<i>R</i> ₃	<i>R</i> ₂	са	Сс
2	11	R _{бпс}	<i>R</i> ₂	<i>R</i> ₃	bc	Bb
3	12	<i>R</i> ₈	<i>R</i> ₇	R _{бпс}	ab	Aa
4	9	<i>R</i> ₁	R _{бпс}	<i>R</i> ₃	bc	Aa
5	8	R _{бпс}	<i>R</i> ₇	<i>R</i> ₈	са	Bb
6	9	<i>R</i> ₂	R _{бпс}	<i>R</i> ₃	bc	Сс
7	7	<i>R</i> ₃	R_2	R _{бпс}	ab	Сс

3. Расчетная часть

Для каждого из режимов рассчитать значения фазных токов приемника и токов в линейных проводах в соответствии с (2.4) и (2.5).

Результаты расчета занести в табл. 2.2 (табл. 2.3–2.5 составить аналогичным образом). Пример расчета, соответствующие таблицы и векторные диаграммы напряжений и токов приведены в Приложении 2.

Таблица 2.2

Taxa	Значение тока, А						
ТОК	Расчетное (в комплексной форме)	Измеренное					
I _{ab}							
I _{bc}							
I _{ca}							
I_A							
I_B							
I_C							

4. Экспериментальная часть

1. Собрать заданную трехфазную электрическую цепь на стенде. Используя перемычки, предусмотреть место включения амперметра в каждой из фаз приемника, а также в каждом из линейных проводов.

2. Используя универсальный вольтметр В7-58/2, установить заданную величину фазного напряжения в каждой из фаз трехфазного источника.

3. Ампервольтметром Ц 4311 измерить величины фазных и линейных токов в ветвях цепи для каждого из заданных режимов, занести их в табл. 2.2 (а также в табл. 2.3–2.5, составленные аналогичным образом) и сравнить с соответствующими данными расчета.

В случае их существенного различия установить возможные причины (ошибки в расчетах; ошибки при сборке цепи; неисправность соединительных проводов и т. п.). После их устранения эксперимент повторить.

5. Анализ полученных результатов. Выводы

Для того чтобы провести анализ полученных результатов, необходимо:

1) оценить различия между расчетными и экспериментальными значениями токов, приведенными в табл. 2.2 (а также в табл. 2.3–2.5, составленных аналогичным образом). Объяснить причины этих различий;

2) сделать вывод о перераспределении токов и напряжений на фазах симметричного приемника в несимметричных режимах.

6. Содержание отчета

Отчет по РЛР № 2 должен содержать:

1) титульный лист по стандартной форме;

2) цель работы;

3) исходные данные (схемы соединения фаз источника и приемника для каждого из заданных режимов, величина фазной ЭДС трехфазного источника энергии, значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 , R_3 или R_7 , R_8);

4) расчет заданных токов в комплексной форме записи;

5) таблицы с результатами расчетов и измерений;

6) векторные диаграммы напряжений и токов для каждого из заданных режимов трехфазной цепи по схеме «треугольник–треугольник»;

7) выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие приемники могут быть включены в трехфазную электрическую цепь?

2. По какому признаку трехфазные приемники делят на симметричные и несимметричные?

3. Какую несимметричную трехфазную нагрузку называют равномерной, и какую – однородной?

4. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями трехфазного источника энергии в случае соединения его фаз треугольником?

5. Когда и почему трехфазная цепь по схеме «треугольник– треугольник» в силовой энергетике используется крайне редко? 6. В чем достоинство соединения фаз трехфазного приемника треугольником?

7. Когда справедливо соотношение $I_{\pi} = \sqrt{3}I_{\phi}$ между линейными и фазными токами приемника, фазы которого соединены треугольником?

8. Когда соотношение $I_{\pi} = \sqrt{3}I_{\phi}$ между линейными и фазными токами приемника, фазы которого соединены треугольником, нарушается? Объяснить, почему.

9. На схеме соединения фаз трехфазного приемника треугольником указать условные положительные направления фазных и линейных токов. Ответ объяснить.

10. Привести основные соотношения для расчета фазных и линейных токов в схеме «треугольник-треугольник».

11. В чем особенность составления баланса мощностей в трехфазной цепи по схеме «треугольник-треугольник»? Расчетно-лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА-ТРЕУГОЛЬНИК» (нагрузка несимметричная равномерная)

Цель работы: 1) исследование свойств и особенностей расчета трехфазной цепи по схеме «звезда-треугольник» в случае несимметричного приемника; 2) совершенствование навыков анализа работы трехфазной цепи по схеме «звезда-треугольник» с помощью векторных диаграмм напряжений и токов.

1. Основные теоретические положения

На рис. 3.1 приведена трехпроводная трехфазная цепь, в которой фазы трехфазного источника соединены звездой, а фазы несимметричного приемника – треугольником.



Puc. 3.1

Характерной особенностью такого соединения является равенство фазных напряжений приемника соответствующим линейным напряжениям генератора, т. е.

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}, \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}, \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}.$$
(3.1)

Такая трехфазная система предпочтительнее предыдущей (рассмотренной в РЛР № 2), так как она обеспечивает: нормальное питание несимметричных приемников с помощью только трех проводов;

– независимость режима работы фаз приемника как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке (при условии, что сопротивления линейных проводов пренебрежимо малы).

Недостатком схемы «звезда–треугольник» можно считать то обстоятельство, что при обрыве любого из линейных проводов нарушается нормальный режим работы двух прилегающих к этому проводу фаз.

Линейные напряжения симметричного источника при известном (заданном) фазном напряжении будут равны по величине:

$$U_{\rm JIF} = \sqrt{3} \, U_{\rm dF} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} \tag{3.2}$$

и сдвинуты друг относительно друга на угол 120°.

Если сопротивления фаз несимметричного приемника:

$$\underline{Z}_{ab} = R_{ab} + jX_{ab} \ (R_{ab} = X_{ab}), \quad \underline{Z}_{bc} = R_{bc} \quad \text{if} \quad \underline{Z}_{ca} = -jX_{ca}, \quad (3.3)$$

трехфазная нагрузка будет равномерной при условии

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$$
 или $\sqrt{R_{ab}^2 + X_{ab}^2} = R_{bc} = X_{ca}.$ (3.4)

Очевидно, что фазные токи приемника, определенные с учетом (3.1) и (3.4) в виде:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}}, \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}}, \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}}, \quad (3.5)$$

будут одинаковы по величине.



Puc. 3.2

На рис. 3.2 приведена диаграмма напряжений и токов для случая несимметричной равномерной нагрузки, соответствующей условию (3.3) при $U_{AB} = U_{\pi r} e^{j^{30^\circ}}$. Она показывает, что система фазных токов, несмотря на их равенство, окажется несимметричной, так как углы сдвига между напряжением и током в каждой из фаз будут разными. В фазе *ab* ток I_{ab} отстает от напряжения U_{AB} на 45°; в фазе *bc* ток и напряжение совпадают по фазе; наконец, в фазе *ca* ток I_{ca} будет опережать напряжение U_{CA} на 90°. Величины и направления векторов линейных токов I_A , I_B и I_C определены так же, как и в РЛР № 2.

На рис. 3.3, *а* приведена векторная диаграмма токов, соответствующая обрыву фазы *bc* того же приемника, из которой следует, что фазные токи I_{ab} и I_{ca} , а также линейный ток I_A останутся такими же, как и на диаграмме токов (рис. 3.2). Линейные токи I_B и I_C станут одинаковыми по величине и равными фазным токам I_{ab} и I_{ca} соответственно.



На рис. 3.3, б приведена векторная диаграмма токов того же приемника в случае обрыва линейного провода Cc. Активное сопротивление фазы bc и емкость фазы ca окажутся соединенными последовательно. Сопротивление этой ветви увеличится в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с Z_{ab} . Следовательно, токи $I_{bc} = I_{ca} = I_{ab}/\sqrt{2}$, а их фаза составит угол, равный –105°.

Анализ диаграмм показывает, что система линейных токов в рассмотренных режимах оказывается несимметричной. Следовательно, фазы источника будут нагружены неравномерно, что является недостатком соединения несимметричных приемников треугольником. В РЛР № 3 студенты каждой бригады исследуют три режима трехфазной цепи по схеме «звезда-треугольник» (рис. 3.1): несимметричный (трехфазная нагрузка должна быть равномерной); с обрывом одной из фаз приемника; с обрывом одного из линейных проводов.

В табл. 3.1 в соответствии с номером стенда, на котором работает бригада, указаны: величина фазного напряжения симметричного трехфазного источника, элементы в фазах несимметричного приемника, а также фаза приемника и линия, в которых происходит обрыв.

Таким образом, в работе используются:

1. Блок трехфазного напряжения.

2. Блок переменной индуктивности (БПИ), в котором размещена индуктивная катушка с параметрами L_1 и R_{κ} .

3. Блок переменного сопротивления (БПС).

4. Блок переменной емкости (БПЕ) или набор конденсаторов.

5. Резисторы R_1 , R_2 или R_3 (размещены в блоке БПС).

6. Измерительные приборы, установленные на стенде.

Перед выполнением расчетной части необходимо определить параметры фаз приемника, при которых трехфазная нагрузка будет равномерной, т. е. сопротивления индуктивной катушки, блока переменных сопротивлений и фазы с последовательным соединением резистора и конденсатора будут одинаковы согласно равенству

$$Z_{\kappa} = R_{\text{бпс}} = Z_{RC} \,. \tag{3.6}$$

Для этого необходимо:

– измерить активное сопротивление *R*_к индуктивной катушки мультиметром МУ-68 или методом амперметра и вольтметра;

– измерить полное сопротивление Z_{κ} этой же катушки методом амперметра и вольтметра, используя в качестве источника напряжения любую из фаз трехфазного источника энергии;

– вычислить индуктивное сопротивление катушки X_{κ} на частоте 50 Гц по формуле $X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}$;

– вычислить емкость конденсатора C из условия (3.6):

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{\omega \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_c^2}}$$

где R_c – сопротивление резистора, указанного в табл. 3.1.

		Элементы в фазах			Облыв		
Номер стенда	<i>U</i> _ф г, В	ab	bc	ca	фазы	линейного провода	
1	11	R_1-C	R _{бпс}	$R_{\rm K}-L_1$	са	Вb	
2	13	<i>R</i> бпс	<i>R</i> ₂ – <i>C</i>	$R_{\rm K}-L_1$	ab	Aa	
3	12	R _{бпс}	$R_{\rm K}-L_1$	R_1-C	bc	Bb	
4	12	<i>R</i> ₂ – <i>C</i>	R _{бпс}	$R_{\rm K}-L_1$	ab	Сс	
5	14	<i>R</i> ₂ – <i>C</i>	$R_{\rm K}-L_1$	R _{бпс}	bc	Aa	
6	11	$R_{\rm K}-L_1$	<i>R</i> ₃ – <i>C</i>	R _{бпс}	са	Aa	
7	12	$R_{\rm K}-L_1$	R _{бпс}	R_1-C	bc	Сс	
1	12	$R_{\rm K}-L_1$	R_1-C	R _{бпс}	ab	Сс	
2	14	<i>R</i> ₃ – <i>C</i>	R _{бпс}	$R_{\rm K}-L_1$	bc	Bb	
3	11	R_1-C	$R_{\rm K}-L_1$	R _{бпс}	са	Aa	
4	11	$R_{\rm K}-L_1$	R_1-C	R _{бпс}	bc	Сс	
5	13	<i>R</i> бпс	R_2-C	$R_{\rm K}-L_1$	ab	Bb	
6	12	<i>R</i> бпс	$R_{\rm K}-L_1$	R_2-C	са	Aa	
7	13	$R_{\rm K}-L_1$	R _{бпс}	R_1-C	ab	Bb	
1	14	$R_{\rm K}-L_1$	R_1-C	R _{бпс}	са	Сс	
2	15	$R_{\rm K}-L_1$	R _{бпс}	<i>R</i> ₂ – <i>C</i>	ab	Bb	
3	12	R_1-C	$R_{\rm K}-L_1$	<i>R</i> бпс	bc	Aa	
4	13	R_2-C	R _{бпс}	$R_{\rm K}-L_1$	ab	Сс	
5	16	R _{бпс}	$R_{\rm K}-L_1$	<i>R</i> ₂ – <i>C</i>	bc	Bb	
6	14	R _{бпс}	<i>R</i> ₃ – <i>C</i>	$R_{\rm K}-L_1$	ab	Aa	
7	13	<i>R</i> бпс	$R_{\rm K}-L_1$	<i>R</i> ₂ – <i>C</i>	са	Bb	
1	13	R_1-C	$R_{\rm K}-L_1$	<i>R</i> бпс	ab	Aa	
2	14	<i>R</i> ₃ – <i>C</i>	R _{бпс}	$R_{\rm K}-L_1$	bc	Сс	
3	12	R _{бпс}	$R_{\rm K}-L_1$	R_1-C	са	Aa	
4	13	R _{бпс}	R_2-C	$R_{\rm K}-L_1$	ab	Bb	
5	15	$R_{\rm K}-L_1$	R _{бпс}	<i>R</i> ₂ – <i>C</i>	bc	Сс	
6	14	R_2-C	$R_{\rm K} - L_1$	R _{бпс}	ab	Aa	
7	13	$R_{\rm K}-L_1$	R_1-C	R _{бпс}	са	Сс	

3. Расчетная часть

Для каждого из режимов рассчитать значения фазных токов приемника и токов в линейных проводах в соответствии с (3.5) и (2.5).

Результаты расчета занести в табл. 3.2 (табл. 3.3 и 3.4 составить аналогичным образом). Пример расчета и соответствующие векторные диаграммы напряжений и токов приведены в Приложении 3.

Таблица 3.2

Ток	Значение тока, А							
	Расчетное (в комплексной форме)	Измеренное						
I _{ab}								
I _{bc}								
I _{ca}								
I_A								
I_B								
I_C								

4. Экспериментальная часть

1. Собрать заданную трехфазную электрическую цепь на стенде. Используя перемычки, предусмотреть место включения амперметра в каждой из фаз приемника, а также в каждом из линейных проводов.

2. Используя универсальный вольтметр В7-58/2, установить заданную величину фазного напряжения в каждой из фаз трехфазного источника.

3. Ампервольтметром Ц 4311 измерить величины фазных и линейных токов в ветвях цепи для каждого из заданных режимов, занести их в табл. 3.2 (а также в табл. 3.3 и 3.4, составленные аналогичным образом) и сравнить с соответствующими данными расчета.

В случае их существенного различия установить возможные причины (ошибки в расчетах; ошибки при сборке цепи; неисправность соединительных проводов и т. п.). После их устранения эксперимент повторить.

5. Анализ полученных результатов. Выводы

Для того чтобы провести анализ полученных результатов, необходимо:

1) оценить различия между расчетными и экспериментальными значениями токов, приведенными в табл. 3.2 (а также в табл. 3.3 и 3.4, составленных аналогичным образом). Объяснить причины этих различий;

2) сделать вывод о перераспределении токов и напряжений на фазах симметричного приемника в несимметричных режимах.

6. Содержание отчета

Отчет по РЛР № 3 должен содержать:

1) титульный лист по стандартной форме;

2) цель работы;

3) исходные данные (схемы соединения фаз источника и приемника для каждого из заданных режимов; величина фазной ЭДС трехфазного источника энергии; значения параметров индуктивной катушки $R_{\rm k}$ и L_1 , емкость конденсатора C и фактические значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 или R_3);

4) расчет заданных токов в комплексной форме записи;

5) таблицы с результатами расчетов и измерений;

6) векторные диаграммы напряжений и токов для каждого из заданных режимов трехфазной цепи по схеме «звезда-треугольник»;

7) выводы.

Контрольные вопросы

1. Какую несимметричную трехфазную нагрузку называют равномерной?

2. Какое напряжение трехфазного источника (фазное или линейное) приложено к каждой фазе приемника, соединенного треугольником?

3. Какова последовательность определения сопротивлений фаз равномерной трехфазной нагрузки, используемой в данной РЛР?

4. Почему в данной РЛР не выполняется соотношение $I_{\pi} = \sqrt{3}I_{\phi}$? Показать на совмещенной векторной диаграмме токов и напряжений

5. Привести основные соотношения для расчета фазных и линейных токов в схеме «звезда-треугольник».

6. Почему в случае несимметричного приемника, соединенного треугольником, равенство $I_A + I_B + I_C = 0$ не является проверкой правильности расчета линейных токов?

7. Какова особенность расчета трехфазной цепи по схеме «звезда–треугольник» при обрыве одного из линейных проводов?

8. Объяснить последовательность построения векторной диаграммы напряжений и токов в случае несимметричной равномерной трехфазной нагрузки. Расчетно-лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА–ЗВЕЗДА» (нагрузка однородная активная)

Цель работы: 1) исследование свойств и особенностей расчета трехфазной цепи при соединении фаз источника (трехфазного генератора, вторичной обмотки трехфазного трансформатора) и трехфазного приемника звездой; 2) приобретение навыков анализа работы трехфазной цепи по схеме «звезда–звезда» с помощью векторных диаграмм напряжений и токов.

1. Основные теоретические положения

В трехфазной системе «звезда–звезда», изображенной на рис. 4.1, концы фаз x, y и z трехфазного приемника соединяют в одну общую точку 0['] или n, которую называют *нулевой* точкой, или *нейтралью*, а начала фаз приемника a, b и c соединяют с началами фаз трехфазно-го источника A, B и C с помощью линейных проводов Aa, Bb и Cc.



Puc. 4.1

Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и приемника, называется *нейтральным*, а трехфазную систему при наличии нейтрального провода называют *четырехпроводной*. Условные положительные направления токов в линейных проводах, как и ранее, задают от генератора к приемнику, а в нейтральном проводе – наоборот, от приемника к генератору.

При достаточно малом сопротивлении нейтрального и линейных проводов разность потенциалов между нейтральными точками *n* и *N*
равна нулю. Таким образом, нейтральный провод с весьма малым сопротивлением обеспечивает равенство фазных напряжений генератора и соответствующих фазных напряжений приемника, т. е.

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A, \qquad \underline{U}_b = \underline{U}_B \quad \mathbf{M} \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C. \tag{4.1}$$

При известном (заданном) фазном напряжении генератора и известных сопротивлениях \underline{Z}_a , \underline{Z}_b и \underline{Z}_c фаз приемника ток в каждом из них определится по закону Ома, т. е.

$$\underline{I}_{a} = \underline{I}_{A} = \frac{\underline{U}_{A}}{\underline{Z}_{a}}, \qquad \underline{I}_{b} = \underline{I}_{B} = \frac{\underline{U}_{B}}{\underline{Z}_{b}} \quad \mathbf{M} \quad \underline{I}_{c} = \underline{I}_{C} = \frac{\underline{U}_{C}}{\underline{Z}_{c}}. \tag{4.2}$$

Ток в нейтральном проводе в соответствии с первым законом Кирхгофа будет равен:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \tag{4.3}$$

При симметричной активной нагрузке ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R$) фазные токи имеют одинаковые значения и совпадают по фазе с соответствующими фазными напряжениями (рис. 4.2, *a*), т. е. образуют симметричную трехфазную систему. Следовательно, ток \underline{I}_N в соответствии с (4.3) будет равен нулю и необходимость в нейтральном проводе отпадает.

В случае несимметричного активного приемника, у которого, например, $Z_a = 2R$, а $Z_b = Z_c = R$ ток I_A будет в 2 раза меньше токов I_B и I_C по величине и появится ток в нейтральном проводе I_N , равный току I_A (рис. 4.2, δ).



Puc. 4.2

При обрыве линейного провода Aa или фазы a симметричного приемника ток $\underline{I}_a = \underline{I}_A$ будет равен нулю, а токи в фазах b и c снова не изменятся (рис. 4.3, a), так как в цепи Y–Y с нейтральным проводом изменение режима работы любой из фаз не влияет на режимы работы остальных фаз.



При соединении приемника звездой без нейтрального провода представляют интерес два частных случая несимметричной нагрузки.

Если в исходном режиме активная нагрузка симметрична $(\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R)$, то напряжение между нейтральными точками приемника и источника $\underline{U}_{nN} = 0$ и системы фазных токов и фазных напряжений приемника симметричны.

В случае обрыва одной из фаз (например, фазы a) сопротивления фаз b и c окажутся соединенными последовательно и будут подключены к линейному напряжению U_{BC} . При этом напряжение на каждом из этих сопротивлений будет равно:

$$U_{b} = U_{c} = \frac{U_{\pi}}{2} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{2} \approx 0.866U_{\phi},$$

т. е. уменьшится на 13,4 %. Настолько же уменьшатся фазные токи I_B и I_C . На топографической векторной диаграмме (рис. 4.3, б) нейтральная точка приемника *n* сместится на середину вектора \underline{U}_{BC} . Векторы фазных напряжений \underline{U}_b и \underline{U}_c будут равны по модулю и противоположны по направлению. С ними будут совпадать по фазе векторы токов I_B и I_C .

При коротком замыкании фазы *а* нейтральная точка приемника сместится в точку *A* (рис. 4.4), поэтому фазные напряжения возрастут в $\sqrt{3}$ раз и станут равными линейному напряжению, т. е. $U_a = 0$, а $U_b = U_c = U_{\pi} = \sqrt{3} U_{\phi}$.



Puc. 4.4

Соответственно токи в фазах $I_b = I_c = \sqrt{3}I_{\phi}$. Хотя $U_a = 0$, ток $I_a \neq 0$ и определяется из уравнения

$$\underline{I}_A = -\left(\underline{I}_B + \underline{I}_C\right) = 3I_{\phi}.$$

Если сопротивлением нейтрального провода пренебречь нельзя (рис. 4.5), то при $\underline{I}_N \neq 0$ между нейтралью несимметричного приемника *n* и нейтралью генератора *N* появится *напряжение смещения нейтрали* \underline{U}_{nN} , из-за которого напряжения на фазах нагрузки не будут равны соответствующим фазным напряжениям генератора.

Величина напряжения <u>U</u>_{nN} может быть определена методом двух узлов в виде:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_{A}\underline{Y}_{a} + \underline{U}_{B}\underline{Y}_{b} + \underline{U}_{C}\underline{Y}_{c}}{\underline{Y}_{a} + \underline{Y}_{b} + \underline{Y}_{c} + \underline{Y}_{nN}},$$
(4.4)

где $\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}, \quad \underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}, \quad \underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}, \quad \underline{Y}_{nN} = \frac{1}{\underline{Z}_{nN}}$ -комплексные прово-

димости фаз нагрузки и нейтрального провода.



Puc. 4.5

Из (4.4) следует, что при увеличении сопротивления нейтрального провода эффективность его использования уменьшается: чем больше величина U_{nN} , тем больше фазные напряжения приемника отличаются от фазных напряжений генератора.

Комплексные значения фазных напряжений приемника можно определить, пользуясь соотношениями:

$$\underline{U}_{a} = \underline{U}_{A} - \underline{U}_{nN}, \qquad \underline{U}_{b} = \underline{U}_{B} - \underline{U}_{nN}, \qquad \underline{U}_{c} = \underline{U}_{C} - \underline{U}_{nN}.$$
(4.5)

Токи в фазах приемника, в отличие от (4.2), будут равны:

$$\underline{I}_{a} = \frac{\underline{U}_{a}}{\underline{Z}_{a}} = \underline{U}_{a} \underline{Y}_{a}, \quad \underline{I}_{b} = \frac{\underline{U}_{b}}{\underline{Z}_{b}} = \underline{U}_{b} \underline{Y}_{b}, \quad \underline{I}_{c} = \frac{\underline{U}_{c}}{\underline{Z}_{c}} = \underline{U}_{c} \underline{Y}_{c}. \quad (4.6)$$

Ток в нейтральном проводе

$$\underline{I}_{N} = \frac{\underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_{nN}} = \underline{U}_{nN} \underline{Y}_{nN}.$$
(4.7)

Правильность расчета токов можно проверить по формуле

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$
(4.8)

При отсутствии нейтрального провода в трехпроводной трехфазной цепи с несимметричной активной нагрузкой напряжение смещения нейтрали U_{nN} будет равно:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_{A}\underline{Y}_{a} + \underline{U}_{B}\underline{Y}_{b} + \underline{U}_{C}\underline{Y}_{c}}{\underline{Y}_{a} + \underline{Y}_{b} + \underline{Y}_{c}}.$$
(4.9)

Напряжения на фазах приемника \underline{U}_a , \underline{U}_b и \underline{U}_c , как и прежде, определяются по соотношениям (4.5), а линейные токи (равные фазным) – по (4.6).

Правильность расчета токов в данном случае можно проверить по формуле

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0.$$
(4.10)

2. Исходные данные

В РЛР № 4 студенты каждой бригады исследуют семь режимов трехфазной цепи по схеме «звезда–звезда» (рис. 4.1):

- симметричный;

- несимметричный;

- обрыв фазы приемника (или обрыв линейного провода);

- короткое замыкание фазы приемника.

Три первых режима выполняются с нейтралью и без нее.

Последний режим выполняется без нейтрали.

В табл. 4.1 в соответствии с номером стенда, на котором работает бригада, указаны:

- фазное напряжение симметричного трехфазного источника;

- элементы в фазах несимметричного приемника;

- фаза приемника (или линия), в которой происходит обрыв;

– фаза приемника, в которой происходит короткое замыкание.

Таким образом, в работе используются:

1. Блок трехфазного напряжения.

2. Блок переменной индуктивности (БПИ), в котором размещена индуктивная катушка с параметрами L_1 и R_{κ} .

3. Блок переменного сопротивления (БПС).

4. Блок переменной емкости (БПЕ) или набор конденсаторов.

5. Резисторы R_1 , R_2 или R_3 (размещены в блоке БПС) или R_7 ,

 R_8 или R_9 (в коробке для элементов).

6. Измерительные приборы, установленные на стенде.

Номер		Элем	менты в фя	азах	0	брыв	Короткое
стенда	U _ф , В	а	b	С	фазы	линейного провода	замыкани фазы
1	10	R_2	R_3	R _{бпс}	_	Bb	а
2	17	R_3	R _{бпс}	R_2	_	Bb	а
3	14	R_7	R_8	R _{бпс}	_	Aa	b
4	10	R _{бпс}	R_1	R_3	_	Aa	С
5	9	R_7	R _{бпс}	R_8	_	Сс	с
6	15	R_2	R _{бпс}	R_3	_	Сс	b
7	9	R _{бпс}	R_3	R_2	-	Aa	а
1	9	R_3	$R_{ m бпc}$	R_2	b		а
2	16	R_2	R_3	$R_{ m бпc}$	b	-	b
3	14	$R_{ m бпc}$	R_8	R_7	С	-	С
4	10	R_3	$R_{ m бпc}$	R_8	С	-	С
5	10	R_8	R_7	R _{бпс}	a	_	b
6	14	$R_{ m бпc}$	R_7	R_8	a	—	С
7	8	R_2	R _{бпс}	R_3	С	—	а
1	11	R _{бпс}	R_2	R_3	_	Aa	b
2	20	R_3	$R_{ m бпc}$	R_2	—	Сс	а
3	17	R_9	R_8	R _{бпс}	—	Aa	С
4	18	$R_{ m бпc}$	R_3	R_1	—	Bb	а
5	23	R_7	R _{бпс}	R_9	—	Bb	b
6	21	<i>R</i> бпс	R_9	R_7	—	Сс	b
7	21	R_2	R_3	$R_{ m бпc}$	—	Bb	b
1	12	<i>R</i> бпс	R_3	R_2	а	—	а
2	19	R_2	R _{бпс}	R_3	С	—	С
3	14	$R_{ m бпc}$	R_8	R_7	а	_	а
4	15	R_3	$R_{ m бпc}$	R_1	b	_	b
5	16	R_7	R_8	$R_{ m бпc}$	b	_	а
6	17	R_7	R _{бпс}	R_9	С	_	b
7	18	R_3	R_2	$R_{ m бпc}$	С	_	С

3. Расчетная часть

1. Для каждого из режимов рассчитать значения фазных токов приемника и тока в нейтральном проводе в соответствии с (4.1)–(4.3) и (4.5)–(4.7).

Результаты расчета занести в соответствующие таблицы. Пример расчета, таблицы и векторные диаграммы приведены в Приложении 4.

2. По данным п. 1 построить совмещенные векторные диаграммы напряжений и токов для каждого режима.

4. Экспериментальная часть

1. Собрать заданную трехфазную электрическую цепь на стенде. Используя перемычки, предусмотреть место включения амперметра в каждой из фаз приемника, а также в нейтральном проводе.

2. Используя универсальный вольтметр В7-58/2, установить заданную величину фазного напряжения в каждой из фаз трехфазного источника.

3. Ампервольтметром Ц 4311 измерить величины фазных токов и тока в нейтральном проводе для каждого из заданных режимов, занести их в табл. 4.2–4.8 (составленные по аналогии с табл. 3.2) и сравнить с соответствующими данными расчета.

В случае их существенного различия установить возможные причины (ошибки в расчетах; ошибки при сборке цепи; неисправность соединительных проводов и т. п.). После их устранения эксперимент повторить.

5. Анализ полученных результатов. Выводы

При анализе полученных результатов:

1) оценить различия между расчетными и экспериментальными значениями токов, приведенными в табл. 4.2–4.8. Объяснить причины этих различий;

2) сделать вывод о перераспределении токов и напряжений на фазах симметричного приемника в несимметричных режимах.

6. Содержание отчета

Отчет по РЛР № 4 должен содержать:

1) титульный лист по стандартной форме;

2) цель работы;

3) исходные данные (схемы соединения фаз источника и приемника; величина фазной ЭДС трехфазного источника энергии; значения параметров индуктивной катушки R_{κ} и L_1 , емкость конденсатора C и фактические значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 , R_3 или R_7 , R_8 или R_9 ;

4) расчет заданных токов в комплексной форме записи;

5) таблицы с результатами расчета и измерений;

6) векторные диаграммы напряжений и токов для каждого из заданных режимов трехфазной цепи по схеме «звезда–звезда»;

7) выводы.

Контрольные вопросы

1. Какую несимметричную трехфазную нагрузку называют равномерной?

2. Какое напряжение трехфазного источника (фазное или линейное) приложено к каждой фазе приемника, соединенного звездой?

3. Какова последовательность определения сопротивлений фаз равномерной трехфазной нагрузки, используемой в данной РЛР?

4. Почему в данной РЛР не выполняется соотношение $I_{\pi} = \sqrt{3}I_{\phi}$? Показать на совмещенной векторной диаграмме токов и напряжений.

5. Привести основные соотношения для расчета фазных и линейных токов в схеме «звезда–звезда».

6. Когда в случае несимметричного приемника, соединенного звездой, равенство $I_A + I_B + I_C = 0$ не является проверкой правильности расчета линейных токов?

7. Какова особенность расчета трехфазной цепи по схеме «звездатреугольник» при обрыве одного из линейных проводов?

Расчетно-лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА–ЗВЕЗДА» (нагрузка несимметричная равномерная)

Цель работы: 1) исследование свойств и особенностей расчета трехфазной цепи по схеме «звезда–звезда» в случае несимметричного приемника; 2) совершенствование навыков анализа работы трехфазной цепи по схеме «звезда–звезда» с помощью векторных диаграмм напряжений и токов.

1. Основные теоретические положения

Несимметрия в трехфазной цепи может быть вызвана различными причинами: 1) неодинаковым сопротивлением фаз трехфазного приемника; 2) несимметричным коротким замыканием (например, между двумя фазами или между фазой и нейтралью); 3) размыканием фазы; 4) неравенством ЭДС источника энергии и т. п.



Puc. 5.1

В настоящей РЛР на примере цепи, приведенной на рис. 5.1, исследуем только те несимметричные режимы, которые возникают из-за несимметрии приемника. При этом будем полагать, что потенциал нейтрали N симметричного трехфазного источника остается неизменным. Кроме того, сопротивление нейтрального провода, как и линейных проводов, будем считать равным нулю.

Рассмотрим частный случай несимметричного приемника, комплексные сопротивления фаз которого

$$\underline{Z}_a = -jX_a, \quad \underline{Z}_b = R_b + jX_b \ (R_b = X_b) \quad \text{if} \quad \underline{Z}_c = R_c, \tag{5.1}$$

причем

$$Z_a = Z_b = Z_c$$
 или $X_a = \sqrt{R_b^2 + X_b^2} = R_c.$ (5.2)

Такая несимметричная трехфазная нагрузка, как известно, является равномерной.

Согласно (4.1) нейтральный провод с сопротивлением, равным нулю, обеспечивает равенство фазных напряжений приемника и соответствующих фазных напряжений генератора. Следовательно, действующие значения токов I_a , I_b и I_c в фазах приемника будут одинаковы. Однако их сумма в соответствии с (4.3) не будет равна нулю, так как ток I_a опережает по фазе напряжение U_A на 90°, ток I_b отстает от напряжения U_B на 45°, а ток I_c совпадает по фазе с напряжением U_C . Путем сложения трех векторов I_a , I_b и I_c (рис. 5.2, *a*) нетрудно определить $I_N \approx 2,18I_{\phi}e^{132,4°}$ А.



Puc. 5.2

При обрыве (отключении) одной из фаз приемника (например, фазы *c*) ток <u>*I*</u>_{*c*} будет равен 0, а положение векторов токов <u>*I*</u>_{*a*} и <u>*I*</u>_{*b*} на диаграмме (рис. 5.2, *б*) не изменится. Следовательно, ток в нейтрали будет равен <u>*I*</u>_{*N*} ≈ 1,22*I*_ф $e^{j142,5^{\circ}}$ А. (Здесь и далее за единицу тока *I*_ф следует считать его значение, взятое из диаграммы рис. 5.2, *a*.) При коротком замыкании одной из фаз (например, фазы *b*) нейтраль приемника сместится в точку *B* диаграммы напряжений генератора. Напряжения на фазах *a* и *c* приемника увеличатся в $\sqrt{3}$ раз. Во столько же раз увеличатся и фазные токи I_a и I_c . При этом ток \underline{I}_a будет опережать по фазе напряжение \underline{U}_a на 90°, а ток \underline{I}_c будет совпадать с напряжением \underline{U}_c (рис. 5.3).



Puc. 5.3

Ток в нейтральном проводе, в свою очередь, будет равен:

$$\underline{I}_{N} = -(\underline{I}_{a} + \underline{I}_{c}) = -(\sqrt{3}I_{\phi}e^{j120^{\circ}} + \sqrt{3}I_{\phi}e^{j90^{\circ}}) \approx 3,35I_{\phi}e^{-j75^{\circ}}A$$

Качественный анализ режимов работы цепи с помощью векторных диаграмм при отсутствии нейтрального провода усложняется, поскольку приходится определять напряжение смещения нейтрали \underline{U}_{nN} . Но и в этом случае напряжение \underline{U}_{nN} можно определить качественно, выбрав в качестве базового фазное напряжение симметричного источника U_{ϕ} .

Тогда в соответствии с (4.9), а также с учетом (5.1) и (5.2) напряжение смещения нейтрали можно определить в виде:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_{A}\underline{Y}_{a} + \underline{U}_{B}\underline{Y}_{b} + \underline{U}_{C}\underline{Y}_{c}}{\underline{Y}_{a} + \underline{Y}_{b} + \underline{Y}_{c}} = \frac{U_{\phi}\frac{1}{Z_{\phi}}\left(e^{j90^{\circ}} + e^{-j165^{\circ}} + e^{j120^{\circ}}\right)}{\frac{1}{Z_{\phi}}\left(e^{j90^{\circ}} + e^{-j45^{\circ}} + 1\right)} = \frac{-1,46593 + j1,60721}{1,7071 + j0,2929}U_{\phi} = 1,256U_{\phi}e^{j122,6^{\circ}}B.$$

Напряжения на фазах приемника будут равны:

$$\underline{U}_{a} = \underline{U}_{A} - \underline{U}_{nN} = U_{\phi}e^{j0^{\circ}} - 1,256U_{\phi}e^{j122,6^{\circ}} = 1,983U_{\phi}e^{-j32,25^{\circ}} \text{B};$$

$$\underline{U}_{b} = \underline{U}_{B} - \underline{U}_{nN} = U_{\phi}e^{-j120^{\circ}} - 1,256U_{\phi}e^{j122,6^{\circ}} = 1,932U_{\phi}e^{-j84,75^{\circ}} \text{B};$$

$$\underline{U}_{c} = \underline{U}_{C} - \underline{U}_{nN} = U_{\phi}e^{j120^{\circ}} - 1,256U_{\phi}e^{j122,6^{\circ}} = 0,261U_{\phi}e^{-j47,4^{\circ}} \text{B}.$$

Наконец, фазные токи в соответствии с законом Ома могут быть рассчитаны следующим образом:

$$\underline{I}_{a} = \frac{\underline{U}_{a}}{\underline{Z}_{a}} = \frac{1,983U_{\Phi}e^{-j32,25^{\circ}}}{Z_{\Phi}e^{-j90^{\circ}}} = 1,983I_{\Phi}e^{j57,75^{\circ}} \mathrm{A};$$
$$\underline{I}_{b} = \frac{\underline{U}_{b}}{\underline{Z}_{b}} = \frac{1,932U_{\Phi}e^{-j84,75^{\circ}}}{Z_{\Phi}e^{j45^{\circ}}} = 1,932I_{\Phi}e^{-j129,75^{\circ}} \mathrm{A};$$
$$\underline{I}_{c} = \frac{\underline{U}_{c}}{\underline{Z}_{c}} = \frac{0,261U_{\Phi}e^{-j47,4^{\circ}}}{Z_{\Phi}e^{j0^{\circ}}} = 0,261I_{\Phi}e^{-j47,4^{\circ}} \mathrm{A}.$$

Сумма токов

$$\underline{I}_{a} + \underline{I}_{b} + \underline{I}_{c} = (1,983e^{j57,75^{\circ}} + 1,932e^{-j129,75^{\circ}} + 0,261e^{-j47,4^{\circ}})I_{\phi} = (0,00057 - J0,000445)I_{\phi} = 0,00072e^{-j38^{\circ}} \approx 0,$$

что подтверждает правильность расчета. Векторная диаграмма рассмотренного режима приведена на рис. 5.4.



На рис. 5.5 приведена векторная диаграмма исходной цепи без нейтрального провода при обрыве фазы *с* несимметричного приемника.

В результате расчета по изложенной методике было получено:

$$\underline{U}_{nN} \approx 1,59U_{\phi}e^{j120^{\circ}}\text{B}; \ \underline{U}_{a} \approx 2,263U_{\phi}e^{-j37,5^{\circ}}\text{B}; \ \underline{U}_{c} \approx 2,263e^{-j82,5^{\circ}}\text{B};$$
$$\underline{I}_{A} \approx 2,263I_{\phi}e^{j52,5^{\circ}}\text{A}; \qquad \underline{I}_{B} \approx 2,263I_{\phi}e^{-j127,5^{\circ}}\text{A}.$$

Таким образом, рассмотренный пример показывает, что включение несимметричных трехфазных приемников по схеме «звезда– звезда» без нейтрального провода нежелательно, поскольку нейтраль приемника *n* смещается за пределы «треугольника» линейных напряжений симметричного источника энергии. При этом существенно увеличиваются напряжения на фазах и токи в фазах приемника, что является недопустимым для большинства из них.

2. Исходные данные

В РЛР № 5 студенты каждой бригады исследуют пять режимов трехфазной цепи по схеме «звезда–звезда» (рис. 5.1):

– приемник несимметричный (с нейтралью и без нейтрали);

– обрыв фазы или линейного провода (с нейтралью и без нее);

– короткое замыкание фазы приемника (без нейтрали).

В табл. 5.1 в соответствии с номером стенда, на котором работает бригада, указаны:

- фазное напряжение трехфазного источника;

- элементы в фазах несимметричного приемника;

– фаза приемника (или линия), в которой происходит обрыв;

– фаза приемника, в которой происходит короткое замыкание.

Таким образом, в работе используются:

1. Блок трехфазного напряжения.

2. Блок переменной индуктивности, в котором размещена индуктивная катушка с параметрами L_1 и R_{κ} .

3. Блок переменного сопротивления.

4. Блок переменной емкости или набор конденсаторов.

5. Резисторы R_1 , R_2 или R_3 (размещены в блоке БПС).

6. Измерительные приборы, установленные на стенде.

Таблица 5.1

Harrow		Эле	менты в ф	азах	C	брыв	Короткое
стенда	$U_{ m \phi r},{ m B}$	а	b	С	фазы	линейного провода	замыкание фазы
1	15	$R_{1\pi}-C$	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_1$	_	Bb	а
2	17	$R_{\kappa}-L_{1}$	$R_{1\pi}-C$	R _{бпс}	_	Bb	а
3	17	$R_{\kappa}-L_{1}$	R _{бпс}	R_2-C	_	Aa	b
4	18	$R_{ m бпc}$	$R_{\kappa}-L_{1}$	R_1-C	_	Aa	С
5	20	$R_{ m бпc}$	$R_{1\pi}-C$	$R_{\kappa}-L_1$	_	Сс	С
6	20	R_1-C	$R_{\kappa}-L_{1}$	$R_{ m бпc}$	_	Сс	b
7	18	$R_{1s}-C$	$R_{ m бпc}$	$R_{\kappa}-L_1$	_	Aa	а
1	18	R_2-C	$R_{\kappa}-L_{1}$	R _{бпс}	b	_	а
2	18	R_1-C	$R_{ m бпc}$	$R_{\kappa}-L_1$	b	_	b
3	16	R _{бпс}	R_3-C	$R_{\kappa}-L_1$	С	_	С
4	16	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_1$	<i>R</i> ₃ – <i>C</i>	С	_	С
5	20	$R_{\kappa}-L_{1}$	$R_{ m бпc}$	$R_{1\pi}-C$	а	_	b
6	18	$R_{\kappa}-L_{1}$	R_1-C	R _{бпс}	а	_	С
7	16	R_2-C	$R_{\kappa}-L_{1}$	R _{бпс}	С	_	a
				50			

Окончание табл. 5.1

Howen		Эле	менты в ф	азах	C	брыв	Короткое
стенда	<i>U</i> _φ , B	а	b	С	фазы	линейного провода	замыкание фазы
8	20	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_{1}$	R_2-C	_	Aa	b
9	20	R _{бпс}	R_1-C	$R_{\kappa}-L_{1}$	_	Сс	а
10	17	R_2-C	$R_{ m бпc}$	$R_{\kappa}-L_{1}$	_	Aa	с
11	18	R_2-C	$R_{\kappa}-L_{1}$	R _{бпс}	_	Bb	а
12	23	$R_{\kappa}-L_{1}$	R_3-C	R _{бпс}	-	Bb	b
13	21	$R_{\kappa}-L_{1}$	$R_{ m бпc}$	R_1-C	-	Сс	b
14	21	R_2-C	$R_{ m бпc}$	$R_{\kappa}-L_{1}$	1	Bb	b
15	18	$R_{\kappa}-L_{1}$	R _{бпс}	R_3-C	а		а
16	19	$R_{\kappa}-L_1$	R_1-C	R _{бпс}	С	-	С
17	14	R_3-C	$R_{ m бпc}$	$R_{\kappa}-L_1$	a	_	а
18	15	R_2-C	$R_{\kappa}-L_{1}$	R _{бпс}	b	—	b
19	16	R _{бпс}	R_3-C	$R_{\kappa}-L_{1}$	b	—	а
20	17	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_1$	R_1-C	С	_	b
21	18	$R_{\kappa}-L_{1}$	R_1-C	R _{бпс}	а	_	С

Перед выполнением расчетной части необходимо определить параметры фаз приемника, при которых трехфазная нагрузка будет равномерной, т. е. сопротивления индуктивной катушки, блока переменных сопротивлений и фазы с последовательным соединением резистора и конденсатора будут одинаковы согласно равенству

$$Z_{\kappa} = R_{\text{бпс}} = Z_{RC}.$$
(5.3)

Подобная процедура выполнялась в РЛР № 3.

3. Расчетная часть

1. Для каждого из режимов рассчитать значения фазных токов приемника и тока в нейтральном проводе в соответствии с (4.5)–(4.7).

Результаты расчета занести в соответствующие таблицы. Пример расчета, таблицы и векторные диаграммы приведены в Приложении 5.

2. По данным п. 1 построить совмещенные векторные диаграммы напряжений и токов для каждого режима.

4. Экспериментальная часть

1. Собрать заданную трехфазную электрическую цепь на стенде. Используя перемычки, предусмотреть место включения амперметра в каждой из фаз приемника, а также в нейтральном проводе.

2. Используя универсальный вольтметр B7-58/2, установить заданную величину фазного напряжения в каждой из фаз трехфазного источника.

3. Ампервольтметром Ц 4311 измерить величины фазных токов и тока в нейтральном проводе для каждого из заданных режимов, занести их в табл. 5.2–5.6 (составленные по аналогии с табл. 3.2) и сравнить с соответствующими данными расчета.

В случае их существенного различия установить возможные причины (ошибки в расчетах; ошибки при сборке цепи; неисправность соединительных проводов и т. п.). После их устранения эксперимент повторить.

5. Анализ полученных результатов. Выводы

При анализе полученных результатов:

1) оценить различия между расчетными и экспериментальными значениями токов, приведенными в табл. 5.2–5.6. Объяснить причины этих различий;

2) сделать вывод о перераспределении токов и напряжений на фазах симметричного приемника в несимметричных режимах.

6. Содержание отчета

Отчет по РЛР № 5 должен содержать:

1) титульный лист по стандартной форме;

2) цель работы;

3) исходные данные (схемы соединения фаз источника и приемника для каждого из заданных режимов; величина фазной ЭДС трехфазного источника энергии; значения параметров индуктивной катушки R_{κ} и L_1 , емкость конденсатора C и фактические значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 или R_3);

4) расчет заданных токов в комплексной форме записи;

5) таблицы с результатами расчета и измерений;

6) векторные диаграммы напряжений и токов для каждого из за-

данных режимов трехфазной цепи по схеме «звезда-звезда»;

7) выводы.

Контрольные вопросы

1. Какую несимметричную трехфазную нагрузку называют равномерной?

2. Какое напряжение трехфазного источника (фазное или линейное) приложено к каждой фазе приемника, соединенного звездой?

3. Какова последовательность определения сопротивлений фаз равномерной трехфазной нагрузки, используемой в данной РЛР?

4. Почему в данной РЛР не выполняется соотношение $I_{\pi} = \sqrt{3}I_{\phi}$? Показать на совмещенной векторной диаграмме токов и напряжений.

5. Привести основные соотношения для расчета фазных и линейных токов в схеме «звезда-звезда».

6. Почему в случае несимметричного приемника, соединенного треугольником, равенство $I_A + I_B + I_C = 0$ не является проверкой правильности расчета линейных токов?

7. Какова особенность расчета трехфазной цепи по схеме «звезда–треугольник» при обрыве одного из линейных проводов?

Расчетно-лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Цель работы: приобретение навыков расчета и экспериментального исследования несимметричных трехфазных цепей методом симметричных составляющих.

1. Основные теоретические положения

Для анализа и расчета несимметричных режимов в трехфазных цепях широко применяется *метод симметричных составляющих*, основанный на представлении любой трехфазной несимметричной системы величин (напряжений, токов, магнитных потоков) в виде суммы трех симметричных систем. Эти симметричные системы, в совокупности образующие исходную несимметричную систему, называют ее *симметричными составляющими*.

Симметричные составляющие отличаются друг от друга порядком следования фаз и называются системами *прямой*, *обратной* и *нулевой* последовательности.

Пусть, например, известна несимметричная система фазных напряжений трехфазного источника U_A, U_B и U_C .

Если использовать понятие фазного множителя трехфазной системы $a = e^{j120^{\circ}}$, то можно записать:

– для системы прямой последовательности:

$$\underline{U}_{A1}$$
; $\underline{U}_{B1} = a^2 \underline{U}_{A1}$ и $\underline{U}_{C1} = a \underline{U}_{A1}$;

– для системы обратной последовательности:

$$\underline{U}_{A2}, \ \underline{U}_{B2} = a\underline{U}_{A2}$$
 и $\underline{U}_{C2} = a^2\underline{U}_{A2};$

– для системы нулевой последовательности:

$$\underline{U}_{A0} = \underline{U}_{B0} = \underline{U}_{C0}.$$

Каждое из несимметричных напряжений U_A, U_B и U_C можно выразить через симметричные составляющие следующим образом:

$$\underline{U}_{A} = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A} = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0};$$

$$\underline{U}_{B} = \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} + \underline{U}_{B0} = a^{2} \underline{U}_{A1} + a \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0};$$

$$\underline{U}_{C} = \underline{U}_{C1} + U_{C2} + \underline{U}_{C0} = a \underline{U}_{A1} + a^{2} \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}.$$

Решая полученные три уравнения, однозначно можно определить векторы U_{A1} , U_{A2} и U_{A0} в виде:

$$\underline{U}_{A0} = \frac{1}{3} (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C); \tag{6.1}$$

$$\underline{U}_{A1} = \frac{1}{3} (\underline{U}_A + a \underline{U}_B + a^2 \underline{U}_C); \qquad (6.2)$$

$$\underline{U}_{A2} = \frac{1}{3} (\underline{U}_A + a^2 \underline{U}_B + a \underline{U}_C), \qquad (6.3)$$

что и доказывает возможность разложения заданной несимметричной системы векторов U_A, U_B и U_C на три симметричные системы.

При этом необходимо помнить, что: 1) симметричная система напряжений какой-либо последовательности вызывает в симметричной трехфазной цепи симметричную систему токов той же последовательности; 2) режим линейной трехфазной цепи может быть рассчитан в соответствии с методом наложения после расчета каждой составляющей в отдельности.

В данной РЛР для исследования предложены трехфазные электрические цепи со статической нагрузкой (рис. 6.1), сопротивления которой от последовательности приложенного напряжения не зависят. Поэтому применение метода симметричных составляющих имеет некоторые особенности.



Puc. 6.1

В частности, в цепи на рис. 6.1, *а* отсутствует нейтральный провод. Следовательно, токи нулевой последовательности в фазах несимметричного трехфазного приемника не протекают.

Для определения реальных токов необходимо:

– по выражениям (6.1)–(6.3) рассчитать векторы U_{A0} , U_{A1} и U_{A2} нулевой, прямой и обратной последовательностей;

- определить токи прямой последовательности:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{nN1}}{\underline{Z}_{a}}; \ \underline{I}_{B1} = \frac{\underline{U}_{B1} - \underline{U}_{nN1}}{\underline{Z}_{b}}; \ \underline{I}_{C1} = \frac{\underline{U}_{C1} - \underline{U}_{nN1}}{\underline{Z}_{c}},$$

где $\underline{U}_{nN1} = \frac{\underline{U}_{A1}\underline{Y}_a + \underline{U}_{B1}\underline{Y}_b + \underline{U}_{C1}\underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}; \quad \underline{Y}_a = \underline{Z}_a^{-1}, \quad \underline{Y}_b = \underline{Z}_b^{-1}, \quad \underline{Y}_c = \underline{Z}_c^{-1};$

– определить токи обратной последовательности:

$$\underline{I}_{A2} = \frac{\underline{U}_{A2} - \underline{U}_{nN2}}{\underline{Z}_{a}}; \quad \underline{I}_{B2} = \frac{\underline{U}_{B2} - \underline{U}_{nN2}}{\underline{Z}_{b}}; \quad \underline{I}_{C2} = \frac{\underline{U}_{C2} - \underline{U}_{nN2}}{\underline{Z}_{c}},$$

$$\Gamma \text{дe} \quad \underline{U}_{nN2} = \frac{\underline{U}_{A2} \underline{Y}_{a} + \underline{U}_{B2} \underline{Y}_{b} + \underline{U}_{C2} \underline{Y}_{c}}{\underline{Y}_{a} + \underline{Y}_{b} + \underline{Y}_{c}}; \quad \underline{Y}_{a} = \underline{Z}_{a}^{-1}, \quad \underline{Y}_{b} = \underline{Z}_{b}^{-1}, \quad \underline{Y}_{c} = \underline{Z}_{c}^{-1}$$

 – определить реальные токи в фазах приемника путем сложения токов прямой и обратной последовательностей:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2}; \qquad \underline{I}_B = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2}; \qquad \underline{I}_C = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2}.$$

В фазах цепи, изображенной на рис. 6.1, δ , протекают токи всех последовательностей. Поэтому после определения векторов симметричных составляющих U_{A0} , U_{A1} и U_{A2} , соответствующие токи могут быть рассчитаны по закону Ома:

- для прямой последовательности:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{U}_{A1}}{\underline{Z}_a}, \qquad \underline{I}_{B1} = \frac{\underline{U}_{B1}}{\underline{Z}_b}, \qquad \underline{I}_{C1} = \frac{\underline{U}_{C1}}{\underline{Z}_c};$$

– для обратной последовательности:

$$\underline{I}_{A2} = \frac{\underline{U}_{A2}}{\underline{Z}_a}, \qquad \underline{I}_{B2} = \frac{\underline{U}_{B2}}{\underline{Z}_b}, \qquad \underline{I}_{C2} = \frac{\underline{U}_{C2}}{\underline{Z}_c};$$

– для нулевой последовательности:

$$\underline{I}_{A0} = \frac{\underline{U}_{A0}}{\underline{Z}_a}, \qquad \underline{I}_{B0} = \frac{\underline{U}_{B0}}{\underline{Z}_b}, \qquad \underline{I}_{C0} = \frac{\underline{U}_{C0}}{\underline{Z}_c}.$$

Наконец, реальные токи в фазах приемника и в нейтральном проводе в соответствии с методом наложения будут равны:

$$\underline{I}_{A} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}, \quad \underline{I}_{B} = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B0}, \quad \underline{I}_{C} = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C0},$$
$$\underline{I}_{N} = \underline{I}_{A} + \underline{I}_{B} + \underline{I}_{C}.$$

2. Исходные данные

В РЛР № 6 студенты каждой бригады исследуют несимметричный режим работы одной из трехфазных цепей, приведенных на рис. 6.1, методом симметричных составляющих.

В табл. 6.1 в соответствии с номером стенда, на котором работает бригада, указаны: схема исследуемой цепи в соответствии с рис. 6.1, величины фазных напряжений трехфазного несимметричного источника, а также сведения о параметрах трехфазного несимметричного приемника (который использовался ранее в РЛР № 3 и 5).

Таким образом, в работе используются:

1. Блок трехфазного напряжения.

2. Катушка индуктивности с параметрами $R_{\kappa} - L_1$, размещенная в блоке переменной индуктивности.

3. Блок переменного сопротивления (БПС).

4. Блок переменной емкости (БПЕ).

5. Резисторы R_1 , R_2 или R_3 (размещены в блоке БПС) или R_{1_8} (из ящика для элементов).

6. Измерительные приборы, установленные на стенде.

7	ไลดีกามนล	6	1
L	иолици	υ.	1

Номер	Фазно	е напряже	ние, В	Эл	тементы в фа з	$\frac{c}{R_2-C}$		
стенда	U _A	U_B	$U_B \qquad U_C \qquad a$		b	С		
1	10	22	15	$R_{\kappa}-L_1$	$R_{ m бпc}$	R_2-C		
2	15	12	25	$R_{\kappa}-L_1$	R_1-C	$R_{ m \delta nc}$		
3	9	12	20	$R_{ m \delta nc}$	$R_{\kappa}-L_1$	$R_{1\pi}-C$		
4	8	21	18	$R_{ m \delta nc}$	R_1-C	$R_{\kappa}-L_1$		
5	22	7	15	R_1-C	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_{1}$		
6	18	13	10	R_1-C	$R_{\kappa}-L_1$	$R_{ m бпc}$		

Окончание табл. 6.1

Номер	Фазн	юе напряжен	ие, В	Эле	ементы в фа	зах
стенда	U_A	U_B	U_C	а	b	с
7	19	19	12	$R_{\kappa}-L_1$	R _{бпс}	$R_{1\pi}-C$
1	7	10	16	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_1$	R_3-C
2	18	18	10	R _{бпс}	R_1-C	$R_{\kappa}-L_1$
3	15	12	18	$R_{\kappa}-L_1$	R _{бпс}	R_2-C
4	13	22	14	$R_{\kappa}-L_1$	R_3-C	R _{бпс}
5	21	8	12	R_3-C	$R_{\kappa}-L_1$	R _{бпс}
6	20	16	10	R_1-C	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_1$
7	15	17	21	R_2-C	$R_{\kappa}-L_1$	R _{бпс}
1	10	10	20	$R_{1s}-C$	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_1$
2	12	15	21	$R_{\kappa}-L_1$	$R_{1\pi}-C$	R _{бпс}
3	14	8	19	$R_{\kappa}-L_1$	R _{бпс}	R_2-C
4	16	17	11	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_1$	R_1-C
5	18	20	10	R _{бпс}	$R_{1s}-C$	$R_{\kappa}-L_1$
6	20	7	14	R_1-C	$R_{\kappa}-L_{1}$	R _{бпс}
7	15	12	21	$R_{1s}-C$	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_1$
1	16	16	10	R_2-C	$R_{\kappa}-L_{1}$	R _{бпс}
2	18	20	9	R_1-C	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_1$
3	20	8	15	R _{бпс}	R_3-C	$R_{\kappa}-L_1$
4	10	14	17	R _{бпс}	$R_{\kappa}-L_1$	R_3-C
5	12	10	21	$R_{\kappa}-L_{1}$	R _{бпс}	$R_{1s}-C$
6	14	21	8	$R_{\kappa}-L_1$	R_1-C	Ronc
7	16	18	12	R_2-C	$R_{\kappa}-L_1$	R _{бпс}

3. Расчетная часть

1. Используя исходные данные табл. 6.1, разложить несимметричную систему ЭДС трехфазного источника на симметричные составляющие. При разложении считать угол сдвига фаз между фазными ЭДС равным 120°.

2. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи методом симметричных составляющих. Сопротивления фаз приемника должны соответствовать номеру варианта табл. 6.1. Кроме того, трехфазная нагрузка в целом должна быть равномерной (такой же, как в РЛР № 3 или № 5). Результаты расчета занести в табл. 6.2 или 6.3. Пример расчета и построения векторных диаграмм напряжений и токов приведен в Приложении 7.

4. Экспериментальная часть

1. Собрать заданную трехфазную электрическую цепь на стенде. Используя перемычки, предусмотреть место включения амперметра в каждом из линейных проводов.

2. Поскольку трехфазная нагрузка по условию должна быть равномерной, необходимо:

а) предварительно подключить нейтральный провод;

б) установить одинаковые напряжения на фазах приемника такие, чтобы величина тока в фазе с индуктивной катушкой была равной 70–90 мА;

в) регулируя сопротивление блока БПС и емкость в фазе с конденсатором, выставить соответствующие токи, равные току в фазе с индуктивной катушкой.

3. Не отключая нейтральный провод, выставить напряжения на фазах приемника, соответствующие варианту задания (табл. 6.1).

4. При исследовании схемы «звезда–звезда» с нейтралью (рис. 6.1, б) после выполнения п. 1–3 ампервольтметром Ц 4311 измерить токи в линейных и нейтральном проводах. Данные измерений занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Ток	Значение тока, А							
IUK	Расчетное (в комплексной форме)	Измеренное						
I_A								
I_B								
I_C								
I_N								

5. При исследовании схемы «звезда–звезда» без нейтрали (рис. 6.1, *a*) нейтральный провод отключить и ампервольтметром Ц 4311 измерить токи в фазах приемника. Далее универсальным вольтметром B7-58/2 измерить напряжение смещения нейтрали, а также напряжения на фазах приемника. Данные измерений занести в табл. 6.3.

Результаты измерений сопоставить с соответствующими данными расчета. В случае их существенного различия установить возможные причины и устранить их. После этого эксперимент повторить.

Таблица 6.3

Ток	Значение тока, А	
TOK	Расчетное (в комплексной форме)	Измеренное
I_A		
I_B		
I _C		

Продолжение табл. 6.3

Напряжение	Значение напряжения, В			
папряжение	Расчетное (в комплексной форме)	Измеренное		
U_a				
U_b				
U_c				
U_{nN}				

5. Анализ полученных результатов. Выводы

Для того чтобы провести анализ полученных результатов, необходимо:

1) по данным табл. 6.2 оценить различия между расчетными и экспериментальными значениями заданных напряжений и токов. Объяснить причины этих различий;

2) в выводе сделать заключение о степени соответствия результатов расчета и эксперимента.

6. Содержание отчета

Отчет по РЛР № 6 должен содержать:

1) титульный лист по стандартной форме;

2) цель работы;

3) исходные данные (схемы соединения фаз источника и приемника, значения фазных ЭДС трехфазного источника энергии, значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 R_3 или R_{1_8});

4) расчет заданных токов и напряжений в комплексной форме записи;

5) таблицы с результатами расчета и измерений;

6) векторные диаграммы напряжений и токов для заданного режима трехфазной цепи по схеме «звезда–звезда».

7) выводы.

1. Объяснить, почему сопротивления фаз элементов трехфазных систем (трехстержневого трансформатора, асинхронного двигателя) неодинаковы для различных последовательностей.

2. Объяснить логику расчета трехфазных цепей методом симметричных составляющих.

3. Объяснить порядок разложения трехфазной несимметричной системы ЭДС (напряжений, токов) на симметричные составляющие.

4. Что представляют собой симметричные составляющие трехфазной несимметричной системы напряжений?

5. В каких случаях для расчета трехфазных цепей используется метод симметричных составляющих?

6. Что представляет собой фазный множитель трехфазной системы? Когда его используют и как?

7. Каковы основные свойства трехфазных цепей в отношении симметричных составляющих токов и напряжений?

Расчетно-лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОЙ КАТУШКОЙ

Цель работы: 1) применение классического метода расчета переходных процессов в электрических цепях первого порядка; 2) приобретение практических навыков определения основных характеристик переходных процессов.

1. Основные теоретические положения

Установившийся режим работы электрической цепи характеризуется тем, что токи в ветвях и напряжения на отдельных участках или остаются неизменными, или изменяются по одному и тому же закону в течение сколь угодно длительного времени.

Например, если в цепи действуют постоянные во времени ЭДС, то в установившемся режиме токи и напряжения на всех участках цепи также постоянны во времени. Когда ЭДС источников энергии изменяются по синусоидальному закону с одной и той же частотой, то в установившемся режиме токи и напряжения являются синусоидальными функциями времени той же частоты. Наконец, если действующие ЭДС являются несинусоидальными периодическими функциями, то токи и напряжения на участках цепи также будут несинусоидальными периодическими.

Любая электрическая цепь может иметь бесконечное число установившихся режимов, каждый из которых отличается от других, например, амплитудой, фазой, формой или частотой действующей в схеме ЭДС, значениями параметров элементов, топологией и т. п.

Переход от одного установившегося режима работы электрической цепи к другому, чем-либо отличающемуся от предыдущего, называется *переходным процессом*.

Переходные процессы могут возникать вследствие включения и отключения активных или пассивных ветвей, коротких замыканий или обрывов отдельных участков цепи, различного рода переключений, внезапного изменения параметров элементов и т. п. Все эти изменения обычно называют коммутационными, или коммутациями.

На электрических схемах процесс коммутации отображается замыканием (рис. 7.1, *a*) или размыканием (рис. 7.1, *б*) ключа.



Puc. 7.1

Теоретически можно считать, что коммутация цепи происходит мгновенно, т. е. на включение, выключение или переключение цепи время не расходуется. Тем не менее переход от исходного режима работы цепи к последующему установившемуся режиму происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени. Объясняется это тем, что каждому состоянию цепи соответствует определенный запас энергии электрического и магнитного полей.

Переход к новому режиму связан с нарастанием или убыванием энергии этих полей. Энергия $W_L = \frac{Li^2}{2}$, запасаемая в магнитном поле индуктивности L, и энергия $W_C = \frac{Cu^2}{2}$, запасаемая в электрическом поле емкости C, не могут изменяться мгновенно: энергия может изменяться непрерывно, без скачков, так как в противном случае мощность, равная производной энергии по времени, достигала бы бесконечных значений, что физически невозможно.

Для завершения переходного и наступления установившегося процессов теоретически требуется бесконечно большое время. Однако на практике длительность переходного процесса определяется малым интервалом времени, по истечении которого токи и напряжения настолько приближаются к установившимся значениям, что разница оказывается практически неощутимой.

В электрических цепях, не содержащих индуктивностей и емкостей и состоящих только из сопротивлений, переходный процесс совершается мгновенно, без затраты времени.

В задачах расчета переходных процессов полагается, что коммутация происходит в момент времени t = 0. Поскольку токи и напряжения элементов цепи в момент коммутации могут изменяться скачкообразно, то *условно* сам момент коммутации t = 0 разбивается на два момента: момент $t = 0_{-}$, непосредственно предшествующий замыканию или размыканию ключа, и момент $t = 0_{+}$, непосредственно следующий за замыканием или размыканием ключа.

63

Значения токов и напряжений элементов цепи в момент $t = 0_+$ называют *начальными условиями* (НУ) переходного процесса, которые подразделяют на *независимые* (токи индуктивных элементов $i_L(0_+)$ и напряжения емкостных элементов $u_C(0_+)$) и зависимые начальные условия (токи источников ЭДС, резистивных и емкостных элементов, а также напряжения на источниках тока, резистивных и индуктивных элементах).

Приведенные выше положения о том, что запас энергии магнитного или электрического полей не может изменяться скачком, выражают принцип непрерывности во времени потокосцепления индуктивности и электрического заряда емкости. Исходя из этого принципа, вытекают два закона, которые называют *законами коммутации*.

Согласно *I закону коммутации* ток в индуктивности в процессе коммутации при переходе от $t = 0_{-}$ к $t = 0_{+}$ не должен изменяться скачком, т. е.

$$i_L(0_+) = i_L(0_-). \tag{7.1}$$

По аналогии согласно *II закону коммутации* напряжение на емкости в процессе коммутации при переходе от $t = 0_{-}$ к $t = 0_{+}$ не должно изменяться скачком, т. е.

$$u_C(0_+) = u_C(0_-). \tag{7.2}$$

Очевидно, *I* и *II законы коммутации* позволяют определять *независимые НУ*. В свою очередь, *зависимые НУ* определяются с помощью *независимых НУ* по уравнениям, составленным по законам Кирхгофа для цепи после коммутации.

В общем случае анализ переходного процесса в линейной электрической цепи с сосредоточенными параметрами R, L и C сводится к решению обыкновенных линейных неоднородных дифференциальных уравнений, составленных по законам Кирхгофа. При этом важно правильно оценивать порядок уравнения (или системы уравнений), описывающего электрическое состояние цепи, который равен числу независимых начальных условий в цепи после коммутации после максимального ее упрощения. В зависимости от порядка этих уравнений различают цепи первого, второго и более высоких порядков.

В цепях первого порядка накопление энергии происходит только в одном элементе: либо в индуктивности L – в виде магнитной энергии, либо в емкости C – в виде электрической энергии. Одноконтурная цепь с элементами, в которых накапливается энергия обоих видов (магнитная и электрическая), представляет собой цепь второго порядка (например, цепь с последовательным соединением R, L и C элементов).

Рассмотрим процесс подключения цепи с последовательным соединением элементов R и L, которое можно считать схемой замещения индуктивной катушки, к источнику постоянного напряжения U.

Переходный процесс в такой цепи в соответствии со вторым законом Кирхгофа может быть описан выражением

$$u_L + u_R = L\frac{di}{dt} + Ri = U, \qquad (7.3)$$

которое (как известно из математики) является линейным дифференциальным уравнением.

Следовательно, определение переходного тока как функции времени, по сути дела, есть решение данного дифференциального уравнения.

Известно, что общий интеграл линейного дифференциального уравнения равен сумме частного решения неоднородного уравнения и общего решения однородного уравнения.

Частное решение неоднородного уравнения характеризует принужденный (установившийся) режим в цепи после коммутации, задаваемый источником энергии, и зависит от вида функции, стоящей в правой части уравнения.

Общее решение однородного уравнения определяет поведение цепи при отсутствии внешних источников энергии и заданных начальных условиях.

В электротехнике частное решение неоднородного дифференциального уравнения называют *принужденной* (установившейся) составляющей, а общее решение однородного уравнения – свободной составляющей.

Таким образом, переходный ток равен сумме:

$$i(t) = i_{\rm np} + i_{\rm cB}.$$
 (7.4)

Принужденная составляющая тока будет равна:

$$i_{\rm np} = \frac{U}{R}.\tag{7.5}$$

Однородное уравнение получается из исходного, если в нем правую часть принять равной нулю:

$$L\frac{di_{\rm CB}}{dt} + Ri_{\rm CB} = 0.$$
 (7.6)

Решением такого уравнения является показательная функция вида

$$i_{\rm CB} = Ae^{pt},\tag{7.7}$$

где *А* – постоянная интегрирования; *р* – корень характеристического уравнения

$$Lp + R = 0,$$
 (7.8)

равный $p = \frac{-R}{L}$.

Величину

$$\tau = \frac{1}{|p|} = \frac{L}{R},\tag{7.9}$$

называют постоянной времени рассматриваемой цепи.

Постоянная времени цепи τ характеризует промежуток времени после коммутации, за который свободная составляющая переходной величины (тока или напряжения), затухая, уменьшается в раз, где $e \approx 2,718$.

Теоретически переходный процесс, зависящий от времени затухания экспоненты Ae^{pt} , длится бесконечно долго. Практически же можно считать, что он заканчивается спустя $t_{nn} \approx (4-5)\tau$.

Учитывая (7.3), (7.5) и (7.6), переходный ток можно представить в виде:

$$i(t) = \frac{U}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}.$$
(7.10)

Постоянная интегрирования А определяется с учетом независимого начального условия:

$$i(0_{+}) = i(0_{-}) = 0.$$

Согласно уравнению (7.4) в момент $t = 0_+$:

$$0 = \frac{U}{R} + A,$$

откуда

$$A = -\frac{U}{R}.$$

Следовательно, решение уравнения (7.3) окончательно примет вид:

$$i(t) = \frac{U}{R} - \frac{U}{R}e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{U}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) = \frac{U}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right).$$
(7.11)

Переходное напряжение на сопротивлении *R* в соответствии с законом Ома будет равно:

$$u_{R}(t) = Ri(t) = U\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) = U\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right).$$
 (7.12)

Наконец, переходное напряжение на индуктивности *L* может быть определено двумя путями:

- по закону Ома:

$$u_{L}(t) = L\frac{di(t)}{dt} = L\left(-\frac{U}{R}\right)\left(-\frac{R}{L}\right)e^{-\frac{R}{L}t} = Ue^{-\frac{R}{L}t} = Ue^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (7.13)$$

– либо по второму закону Кирхгофа:

$$u_L(t) = U - u_R(t) = U - U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = U e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

При анализе переходных процессов в электрических цепях первого порядка *классическим методом* можно рекомендовать следующий порядок расчета искомых переходных величин:

1) из расчета цепи до коммутации определяют ток в индуктивности $i_L(0_-)$ или напряжение на емкости $u_C(0_-)$; далее по законам коммутации определяют независимые начальные условия $i_L(0_+)$ или $u_C(0_+)$;

2) составляют необходимые уравнения по законам Кирхгофа и закону Ома для цепи в момент времени $t = 0_+$, решая которые с учетом $i_L(0_+)$ или $u_C(0_+)$ определяют зависимые начальные условия искомых переходных величин;

3) в соответствии с классическим методом расчета искомые переходные величины представляют в виде суммы принужденной и свободной составляющих; 4) из расчета установившегося режима в цепи после коммутации определяют принужденные составляющие искомых переходных величин;

5) составляют характеристическое уравнение и определяют его корень, постоянную времени цепи τ и длительность переходного процесса;

6) составляют уравнения для определения постоянных интегрирования;

7) определяют постоянные интегрирования с учетом начальных условий, найденных ранее в п. 1 и 2;

8) искомые переходные величины записывают в виде суммы принужденных и свободных составляющих.

2. Исходные данные

В РЛР № 7 студенты каждой бригады исследуют переходные процессы в линейной электрической цепи первого порядка с индуктивной катушкой. Номер варианта задания состоит из двух цифр. Первая из них указывает на номер схемы исследуемой цепи и соответствующий столбец в табл. 7.1, где содержатся сведения о величине сопротивления резистора, а также указаны расчетные переходные характеристики. Катушку индуктивности с параметрами R_{κ} , *L* следует взять из ящика для элементов под номером 11 или 12.

Таблица 7.1

Номер схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
<i>R</i> , Ом	100	200	180	150	250	200	100	120	150	200
Исследуемые величины	$u_{\rm K}, i_3$	$u_{\rm K}, i_{\rm l}$	$u_{\rm K}, i_3$	$u_{\rm K}, i_{\rm l}$	$u_{\rm K}, i_2$	$u_{\rm K}, i_{\rm l}$	$u_{\rm K}, i_2$	$u_{\rm K}, i_{\rm l}$	$u_{\rm K}, i_3$	u_{κ}, i_2

Вторая цифра соответствует номеру столбца в табл. 8.2, где указаны напряжение источника питания и рекомендуемый метод расчета.

Таблица 7.2

Номер п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
<i>U</i> , B	14	12	10	9	11	13	15	14	10	12
Метод расчета	*оп	**кл	ОП	кл	ОП	КЛ	ОП	КЛ	ОП	КЛ

*оп – операторный;

**кл – классический





Puc. 7.2

69

Таким образом, в работе используются:

1. Регулируемый источник постоянного напряжения.

2. Электронный ключ.

2. Катушка индуктивности 11 и 12 (находятся в ящике для элементов).

3. Блок переменного сопротивления (БПС).

4. Резисторы R_2 и R_3 (находятся в ящике для элементов).

5. Измерительные приборы, установленные на стенде.

3. Расчетная часть

В соответствии с вариантом задания необходимо:

 вычертить схему замещения заданной электрической цепи, согласно рис.7.2;

– выбрать условные положительные направления заданных переходных характеристик;

- рассчитать их рекомендованным методом;

– результаты расчета занести в табл. 7.3;

– произвольно выбрав масштабы тока m_i , напряжения m_u и времени m_t , построить графики рассчитанных переходных характеристик.

Таблица 7.3

Значение	<i>u</i> _k (0_)	$u_k(0_+)$	<i>и_к</i> пр	<i>i</i> (0_)	<i>i</i> (0+)	<i>і</i> пр	τ	i _{nn}
величины		В			A		c ·	10 ⁻³
Расчетное								
Измеренное		5						

4. Экспериментальная часть

1. Собрать заданную электрическую цепь на стенде.

2. Используя цифровой осциллограф, установить заданную величину входного напряжения в электрической цепи.

3. На экране осциллографа получить осциллограммы расчетных величин напряжения и тока в электрической цепи и измерить их параметры. Занести их в табл. 7.3 и сравнить с соответствующими данными расчета.

В случае их существенного различия установить возможные причины (ошибки в расчетах; ошибки при сборке цепи; неисправность соединительных проводов и т. п.). После их устранения эксперимент повторить.

5. Анализ полученных результатов. Выводы

Для того чтобы провести анализ полученных результатов, необходимо: 1) оценить различия между расчетными и экспериментальными значениями измеренных тока и напряжения. Объяснить причины этих различий;

2) сделать вывод о причинах расхождений расчетных и экспериментальных значений напряжения и тока.

6. Содержание отчета

Отчет по РЛР № 7 должен содержать:

1) титульный лист по стандартной форме;

2) цель работы;

3) исходные данные;

4) расчет заданных тока и напряжения;

5) таблицы с результатами расчетов и измерений;

6) кривые переходных величин;

7) выводы.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать второй закон коммутации.

2. В чем суть операторного метода расчета переходных процессов?

3. Какова последовательность расчета переходных величин (токов и напряжений) операторным методом? Показать на конкретном примере.

4. Привести формулу, которая представляет собой прямое преобразование Лапласа некоторой функции f(t).

5. Какие переходные функции называют оригиналами, а какие – их операторными изображениями?

6. Чему равно операторное изображение напряжения на индуктивности L, если известно, что i(t) = I(p)?

7. Чему равно операторное изображение напряжения на емкости C, если известно, что i(t) = I(p)?

8. Что представляет собой закон Ома в операторной форме записи. Как он используется при составлении операторных уравнений цепи?

9. Перечислить известные способы перехода от операторных изображений к оригиналам.

10. Какова особенность операторной схемы замещения цепи после коммутации при ненулевых начальных условиях?

Расчетно-лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОНДЕНСАТОРОМ

Цель работы: 1) применение операторного метода расчета переходных процессов в линейных электрических цепях первого порядка; 2) совершенствование практических навыков определения основных характеристик переходных процессов.

1. Основные теоретические положения

Так как дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы в линейных цепях с сосредоточенными параметрами, представляют собой линейные уравнения с постоянными коэффициентами, то их можно интегрировать также операторным методом, основанным на преобразовании Лапласа.

Сущность операторного метода заключается в том, что некоторой заданной однозначной ограниченной функции f(t), называемой *оригиналом*, удовлетворяющей условиям Дирихле на любом конечном промежутке времени и равной нулю при t < 0, сопоставляется другая функция F(p) комплексного переменного $p = s + j\omega$, называемая изображением.

Это сопоставление производится по формуле

$$F(p) = \int_{0}^{\infty} f(t)e^{-pt}dt,$$
 (8.1)

которая представляет собой прямое *преобразование Лапласа* функции f(t) и может быть обозначено так:

$$F(p) = L\{f(t)\},$$
 (8.2)

где F(p) называют изображением функции f(t) по Лапласу.

Если нужно по имеющемуся изображению F(p) найти оригинал f(t), это может быть выполнено в общем случае при помощи обратного преобразования Лапласа:
$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(p) e^{pt} dp, \qquad (8.3)$$

которое представляет собой решение интегрального уравнения (8.1) относительно неизвестной функции f(t) и может быть получено методами теории функций комплексного переменного.

Интеграл (8.3) обозначается еще так:

$$f(t) = L^{-1} \{ F(p) \}.$$
(8.4)

При преобразовании интегро-дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, описывающих переходные процессы, по Лапласу в соответствии с (8.1), приходится находить изображения производных и интегралов от оригинала. При этом оказывается, что эти изображения выражаются алгебраическими функциями от изображения и от начальных значений самой функции. Поэтому система интегро-дифференциальных уравнений относительно оригиналов заменяется системой алгебраических уравнений относительно их изображений.

При решении полученной системы алгебраических уравнений определяются изображения искомых функций, а затем при помощи обратного преобразования, вытекающих из него формул или таблиц – оригиналы, т. е. искомые функции времени.

Ряд таких функций и соответствующих им изображений приводится в учебниках по ТОЭ и справочной литературе.

При анализе переходного процесса в электрической цепи операторным методом рекомендуется следующий порядок расчета:

1. Из расчета цепи до коммутации необходимо найти токи в индуктивностях $i_L(0_-)$ и напряжения на емкостях $u_C(0_-)$. Поскольку ток в индуктивности и напряжение на емкости не изменяются скачком, их значения при t = 0 обычно записывают короче: $i_L(0) = i_L(0_-)$ и $u_C(0) = u_C(0_-)$.

2. По виду исследуемой электрической цепи после коммутации, ее параметрам, значениям токов $i_L(0)$ и напряжений $u_C(0)$ с помощью соответствующих схем замещения элементов цепи во временной и в операторной областях (табл. 8.1) составляют эквивалентную операторную схему замещения. По этой схеме известными методами расчета линейных электрических цепей определяют операторные изображения искомых переходных величин.

Изображение искомой величины можно получить и другим способом. Для цепи после коммутации записывают систему интегродифференциальных уравнений Кирхгофа для мгновенных значений. Затем все величины, входящие в эти уравнения, заменяют их операторными изображениями. Полученную систему операторных уравнений разрешают относительно изображений искомых величин.

3. По изображению искомой переходной величины находят оригинал, т. е. искомую функцию времени.

Для перехода от изображения искомой функции F(p) к ее оригиналу f(t) можно использовать следующие три способа:

1. Непосредственное нахождение f(t) по таблице соответствия оригиналов и изображений (подобные таблицы приводятся в справочниках и в учебниках по ТОЭ).

2. Представление рациональной дроби изображения

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_k p^k + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_k p^k + \dots + b_1 p + b_0}$$
(8.5)

в виде

$$F(p) = \frac{A_1}{p - p_1} + \frac{A_2}{p - p_2} + \dots + \frac{A_n}{p - p_n},$$

где a_k и b_k – действительные числа; p_1 , p_2 ,..., p_n – действительные и различные корни характеристического уравнения $F_2(p) = 0$; A_1 , A_2 , K, A_n – так называемые неопределенные коэффициенты.

3. Применение теоремы разложения, согласно которой в случае различия всех n корней полинома $F_2(p)$ оригинал изображения F(p) (8.5) имеет вид:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{n} \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t}, \text{ где } F_2'(p) = \frac{dF_2(p)}{dp}.$$
(8.6)

Если при этом один из корней $F_2(p)$, для определенности первый, равен нулю: $p_1 = 0$, т. е. $F_2(p) = pF_3(p)$, то

$$f(t) = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \sum_{k=2}^{n-1} \frac{F_1(p_k)}{p_k F_3'(p_k)} e^{p_k t}.$$
(8.7)

Если $F_2(p)$ имеет $\frac{n}{2}$ пар комплексных сопряженных корней (здесь n – целое число), то

$$f(t) = \sum_{k=1}^{n/2} 2 \operatorname{Re}\left[\frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t}\right].$$
(8.8)

При наличии нулевого корня, т. е.

$$F_{2}(p) = pF_{3}(p),$$

$$f(t) = \frac{F_{1}(0)}{F_{3}(0)} + \sum_{k=2}^{n/2} 2 \operatorname{Re}\left[\frac{F_{1}(p_{k})}{p_{k}F_{2}'(p_{k})}e^{p_{k}t}\right].$$
(8.9)

2. Исходные данные

В РЛР № 8 студенты каждой бригады исследуют переходные процессы в линейной электрической цепи первого порядка с конденсатором. Номер варианта задания состоит из двух цифр. Первая из них указывает на номер схемы исследуемой цепи и соответствующий столбец в табл. 8.1, где содержатся сведения о параметрах емкости конденсатора и резистора, а также указаны расчетные переходные характеристики.

Таблица 8.1

Номер схемы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
<i>С</i> , мкФ	2	5	3	1	2	4	2,5	3,5	1,5	3
R, Ом	100	200	180	150	250	200	100	120	150	200
Исследуемые величины	u_c, i_3	u_c, i_2	u_c, i_3	u_c, i_3	u_c, i_3	u_c, i_2	u_c, i_3	u_c, i_3	u_c, i_1	u_c, i_2

Вторая цифра соответствует номеру столбца в табл. 8.2, где указаны напряжение источника питания и рекомендуемый метод расчета.

Таблица	8.2
---------	-----

Номер п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
<i>U</i> , B	14	12	10	9	11	13	15	14	10	12
Метод расчета	*оп	**кл	ОП	кл	ОП	кл	ОП	КЛ	ОП	кл

*оп – операторный;

**кл – классический









Таким образом, в работе используются:

1. Регулируемый источник постоянного напряжения.

2. Электронный ключ.

2. Блок переменной емкости (БПЕ) или набор конденсаторов.

3. Блок переменного сопротивления (БПС).

4. Резисторы R_2 и R_3 (находятся в ящике для элементов).

5. Измерительные приборы, установленные на стенде.

3. Расчетная часть

В соответствии с вариантом задания необходимо:

 – вычертить схему замещения заданной электрической цепи, согласно рис.8.1;

– выбрать условные положительные направления заданных переходных характеристик;

- рассчитать их рекомендованным методом;

– результаты расчета занести в табл. 8.3;

– произвольно выбрав масштабы тока m_i , напряжения m_u и времени m_t , построить графики рассчитанных переходных характеристик.

Таблица 8.3

Значение	$u_c(0_{-})$	$u_c(0_+)$	<i>и _{спр}</i>	<i>i</i> (0_)	<i>i</i> (0+)	<i>і</i> пр	τ	t _{ππ}
величины		В		2	мА		c · 1	10^{-3}
Расчетное								
Измеренное		\mathcal{O}						

4. Экспериментальная часть

1. Собрать заданную электрическую цепь на стенде.

2. Используя цифровой осциллограф, установить заданную величину входного напряжения в электрической цепи.

3. На экране осциллографа получить осциллограммы расчетных величин напряжения и тока в электрической цепи и измерить их параметры. Занести их в табл. 8.3 и сравнить с соответствующими данными расчета.

В случае их существенного различия установить возможные причины (ошибки в расчетах; ошибки при сборке цепи; неисправ-

ность соединительных проводов и т. п.). После их устранения эксперимент повторить.

5. Анализ полученных результатов. Выводы

Для того чтобы провести анализ полученных результатов, необходимо:

1) оценить различия между расчетными и экспериментальными значениями измеренных тока и напряжения. Объяснить причины этих различий;

2) сделать вывод о причинах расхождений расчетных и экспериментальных значений напряжения и тока.

6. Содержание отчета

Отчет по РЛР № 8 должен содержать:

1) титульный лист по стандартной форме;

2) цель работы;

3) исходные данные;

4) расчет заданных тока и напряжения;

5) таблицы с результатами расчетов и измерений;

6) кривые переходных величин;

7) выводы.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать второй закон коммутации.

2. В чем суть операторного метода расчета переходных процессов?

3. Какова последовательность расчета переходных величин (токов и напряжений) операторным методом? Показать на конкретном примере.

4. Привести формулу, которая представляет собой прямое преобразование Лапласа некоторой функции f(t).

5. Какие переходные функции называют оригиналами, а какие – их операторными изображениями?

6. Чему равно операторное изображение напряжения на индуктивности L, если известно, что i(t) = I(p)? 7. Чему равно операторное изображение напряжения на емкости C, если известно, что i(t) = I(p)?

8. Что представляет собой закон Ома в операторной форме записи. Как он используется при составлении операторных уравнений цепи?

9. Перечислить известные способы перехода от операторных изображений к оригиналам.

10. Какова особенность операторной схемы замещения цепи после коммутации при ненулевых начальных условиях?

Литература

1. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники : учеб. для вузов : в 3 ч. Ч. І / Г. И. Атабеков. – М. : Энергия, 1978. – 592 с.

2. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 527 с.

3. Прянишников, В. А. Теоретические основы электротехники : курс лекций / В. А. Прянишников. – СПб. : КОРОНА, 2004. – 366 с.

4. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / под ред. П. А. Бутырина. – М. : МЭИ, 2012. – Т. 1. – 595 с.

5. Коровкин, Н. В. Теоретические основы электротехники : сб. задач / Н. В. Коровкин, Е. Е. Селина, В. Л. Чечурин. – СПб. : Питер, 2004. – 521 с.

6. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / под ред. П. А. Ионкина. – М. : Энергоиздат, 1982. – 768 с.

7. Шебес, М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – М. : Высш. шк., 1990. – 543 с.

8. Соленков, В. В. Линейные электрические цепи постоянного и однофазного синусоидального тока : практикум / В. В. Соленков, А. В. Козлов, А. В. Бусленко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 139 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Анализ возможных ошибок при соединении фаз трехфазного генератора звездой и треугольником

На рис. П.1.1 и приведены две схемы, в каждой из которых фазные обмотки трехфазного источника энергии соединены ошибочно. Необходимо определить, в чем заключаются ошибки подобных соединений и к чему они могут привести.



Рис. П.1.1

Анализ схемы, изображенной на рис. П.1.1, *a*, показывает, что фазные обмотки генератора соединены в «открытый» треугольник. Это не позволит в дальнейшем реализовать связанную трехфазную цепь при любом соединении фаз трехфазного приемника.

Кроме того, конец фазы C (точка Z) должен быть соединен с началом фазы A (точка A), а на схеме он ошибочно соединен с концом фазы A (точка X).

Предположив, что действующее значение фазной ЭДС генератора $E_{\phi} = 127$ В, рассчитаем линейные напряжения U_{AB}, U_{BC} и U_{CA} . Если <u> $E_{A} = 127$ </u> В, то, в соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{E}_{A} - \underline{E}_{B} - \underline{E}_{C} = 127 - 127e^{-j120^{\circ}} - 127e^{j120^{\circ}} = 254 \text{ B};$$
$$\underline{U}_{BC} = \underline{E}_{B} = 127e^{-120^{\circ}} \text{ B};$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{E}_C - \underline{E}_A = 127e^{j120^\circ} - 127 = 220e^{j150^\circ} \text{ B}.$$

На рис. П.1.1, б приведена топографическая векторная диаграмма ЭДС и линейных напряжений генератора, соответствующая приведенному расчету.

Расчет и векторная диаграмма показывают, что напряжение между точками *A* и *B* практически равно двойному фазному напряжению генератора. Поэтому их соединение невозможно, так как приведет к короткому замыканию фаз генератора.

Переворачивание полярности одной из обмоток при их соединении звездой (рис. 1.6, *a*) образует «веер» фазных напряжений [12], как показано на рис. 1.6, *б*.



Рис. П.1.2

Короткого замыкания при этом не будет, но линейное напряжение, близкое к номинальному, сохранится лишь между фазами A и B. Напряжения U_{CA} и U_{BC} уменьшатся и будут примерно равны фазному напряжению. Таким образом, нарушение симметрии линейных напряжений при соединении обмоток генератора «веером» вместо звезды в сетях освещения приведет к уменьшению накала ламп, а в сетях, питающих электродвигатели – к уменьшению мощности на валу; несимметрии токов в фазах и резкому снижению вращающего момента электродвигателей, а также к изменению направления их вращения.

Подробный расчет трехфазной цепи с ошибочным соединением одной из фазных обмоток (подобным рис. П.1.2, *a*) приведен в задаче 2 Приложения 7.

Приложение 2

Расчет трехфазной цепи по схеме «треугольник–треугольник» (нагрузка активная)

В трехфазной электрической цепи, изображенной на рис. П.2.1, $U_{\rm dr} = U_{\rm nr} = 220$ В.



Необходимо рассчитать фазные и линейные токи для следующих режимов:

1) симметричный $-\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = R = 40 \text{ Om};$

2) несимметричный — $\underline{Z}_{ab} = R_{ab} = 40 \text{ Om};$ $\underline{Z}_{bc} = R_{bc} = 50 \text{ Om};$ $\underline{Z}_{ca} = R_{ca} = 25 \text{ Om};$

3) отключена фаза *ab*;

4) оборван линейный провод Аа.

По данным расчета построить топографическую векторную диаграмму напряжений источника и векторные диаграммы токов для каждого из перечисленных выше режимов.

Решение

Предварительно примем $U_A = 220$ В.

Режим 1 (симметричный)

Фазный ток <u>I</u>_{ab} определим по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_A}{R_{ab}} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ A}.$$

Поскольку приемник симметричный, остальные фазные токи:

$$\underline{I}_{bc} = 5,5e^{-j120^{\circ}}$$
 A; $\underline{I}_{ca} = 5,5e^{j120^{\circ}}$ A.

В случае симметричного приемника линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше фазных токов и отстают от соответствующих фазных токов на 30° . Поэтому:

$$\underline{I}_{A} = 5,5\sqrt{3}e^{-j30^{\circ}} = 9,53e^{-j30^{\circ}} \text{ A};$$
$$\underline{I}_{B} = 9,53e^{-j150^{\circ}} \text{ A}; \qquad \underline{I}_{C} = 9,53e^{j90^{\circ}} \text{ A}.$$

Режим 2 (несимметричный)

Ток I_{ab} будет равен 5,5 А, как и в предыдущем режиме:

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_B}{R_{bc}} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{50} = 4,4e^{-j120^\circ} \text{ A};$$
$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_C}{R_{ca}} = \frac{220e^{j120^\circ}}{25} = 8,8e^{j120^\circ} \text{ A}.$$

Линейные токи определяем по первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_{A} = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 5,5 - 8,8e^{j120^{\circ}} = 12,5e^{-j37,6^{\circ}} \text{A};$$
$$\underline{I}_{B} = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 4,4e^{-j120^{\circ}} - 5,5 = 8,6e^{-j153,7^{\circ}} \text{A};$$
$$\underline{I}_{C} = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 8,8e^{j120^{\circ}} - 4,4e^{-j120^{\circ}} = 11,6e^{j100,9^{\circ}} \text{A};$$

Режим 3 (отключена фаза *ab*)

Схема замещения заданной цепи при отключении фазы *ab* приведена на рис. П.2.2.



Рис. П.2.2

Рис. П.2.3

Очевидно, токи в фазах *bc* и *ca* останутся такими же, как и в предыдущем режиме, т. е.

$$\underline{I}_{bc} = 4,4e^{-120^{\circ}} \text{ A}; \qquad \underline{I}_{ca} = 8.8e^{j120^{\circ}} \text{ A}.$$
$$\underline{I}_{ab} = 0; \quad \underline{I}_{A} = -\underline{I}_{ca} = 8,8e^{-60^{\circ}} \text{ A}; \quad \underline{I}_{B} = \underline{I}_{bc} = 4,4e^{-120^{\circ}} \text{ A}$$

Режим 4 (обрыв линейного провода Аа)

При обрыве линейного провода Aa (рис. П.2.3) трехпроводная трехфазная цепь становится однофазной с напряжением на входе, равным фазному напряжению источника U_B .

Ток в фазе *bc* по-прежнему будет равен:

$$\underline{I}_{bc} = 4,4e^{-120^{\circ}} \text{ A}$$

В фазах *ab* и *ca* будет протекать ток

$$\underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ca} = -\frac{\underline{U}_{BC}}{R_{ab} + R_{ca}} = -\frac{220e^{-120^{\circ}}}{40 + 25} = 3,4e^{j60^{\circ}} \text{A},$$

а в линейных проводах *Bb* и *Cc*:

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 4,4e^{-j120^\circ} - 3,4e^{j60^\circ} = 7,8e^{-j120^\circ} \text{ A}$$

И

$$\underline{I}_C = -\underline{I}_B = 7,8e^{j60^\circ} \text{ A}.$$

Режим 1

Tor	Значение тока, А				
IUK	расчетное	измеренное			
<u>I</u> _{ab}	5,5				
<u>I</u> bc	$5,5e^{-j120^{\circ}}$				
<u>I</u> ca	$5,5e^{-j120^{\circ}}$				
IA	$9,5e^{-j30^{\circ}}$				
\underline{I}_B	$9,5e^{-j150^{\circ}}$				
\underline{I}_C	9,5 $e^{j90^{\circ}}$				



Tor	Значени	е тока, А
IUK	расчетное	измеренное
<u>I</u> _{ab}	5,5	
<u>I</u> bc	$4,4e^{-j120^{\circ}}$	
<u>I</u> ca	$8,8e^{-j120^{\circ}}$	
IA	$12e^{-j37,6^{\circ}}$	
IB	$8,6e^{-j154^{\circ}}$	
\underline{I}_C	$11,6e^{j100,9^{\circ}}$	



Режим 3

Tor	Значение тока, А				
IUK	расчетное	измеренное			
<u>I</u> _{ab}	0				
<u>I</u> bc	$4,4e^{-j120^{\circ}}$				
<u>I</u> ca	$8,8e^{j120^{\circ}}$				
IA	$8,8e^{-j60^{\circ}}$				
\underline{I}_B	$4,4e^{-j120^{\circ}}$				
<u>I</u> C	$11,6e^{j100,9^{\circ}}$				

Tag	Значение	е тока, А
IUK	расчетное	измеренное
<u>I</u> ab	$3,4e^{j60^{\circ}}$	
\underline{I}_{bc}	$4,4e^{-j120^{\circ}}$	4
<u>I</u> ca	$3,4e^{j60^{\circ}}$	
\underline{I}_A	0	
<u>I</u> _B	$7,8 e^{-j120^{\circ}}$	
\underline{I}_C	$7,8e^{j60^{\circ}}$	



Расчет трехфазной цепи по схеме «звезда–треугольник» (нагрузка несимметричная равномерная)

В цепи, изображенной на рис. П.3.1, фазное напряжение генератора $U_{\rm dr} = 220$ В. Комплексные сопротивления фаз приемника:

$$\underline{Z}_{ab} = R_{ab} + jX_{ab} = 40 + j30 = 50e^{j36,9^{\circ}} \text{ OM}; \quad \underline{Z}_{bc} = R_{bc} = 50 \text{ OM};$$
$$\underline{Z}_{ca} = R_{ca} - jX_{ca} = 25 - j43,3 = 50e^{-j60^{\circ}} \text{ OM}.$$



Необходимо рассчитать фазные и линейные токи в заданной цепи в следующих режимах:

1) нагрузка несимметричная равномерная;

2) отключена фаза bc;

3) оборван линейный провод Аа.

По данным расчета построить топографическую векторную диаграмму напряжений источника и векторные диаграммы токов для каждого из перечисленных выше режимов.

Решение

Предварительно примем $U_A = 220$ В.

Тогда напряжения на фазах приемника будут равны:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB} = 220\sqrt{3}e^{j30^{\circ}} = 380e^{j30^{\circ}}$$
 B;

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC} = 380e^{-j90^{\circ}}$$
 B; $\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA} = 380e^{j150^{\circ}}$ B.

Режим 1 (нагрузка несимметричная равномерная)

В случае равномерной нагрузки фазные токи треугольника, рассчитанные по закону Ома, будут равны по величине:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{380e^{30^{\circ}}}{40 + j30} = 7,6e^{-j7^{\circ}} \text{ A};$$
$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{380e^{-j90^{\circ}}}{50} = 7,6e^{-j90^{\circ}} \text{ A};$$

Линейные токи могут быть определены из уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа, для узлов *a*, *b* и *c* (рис. П.3.1):

$$\underline{I}_{A} = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 7,6e^{-j7^{\circ}} - 7,6e^{-j150^{\circ}} = 14,4e^{j11,6^{\circ}} \text{ A};$$
$$\underline{I}_{B} = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 7,6e^{-j90^{\circ}} - 7,6e^{-j7^{\circ}} = 10e^{-j138,2^{\circ}} \text{ A};$$
$$\underline{I}_{C} = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 7,6e^{-j150^{\circ}} - 7,6e^{-j90^{\circ}} = 7,6e^{j150^{\circ}} \text{ A}.$$

Следовательно, в случае соединения фаз несимметричного приемника треугольником фазы источника будут нагружены неравномерно.

Режим 2 (отключена фаза bc)

После отключения фазы *bc* приемника токи в фазах *ab* и *ca* не изменятся, так как изменение режима одной из фаз не отражается на режиме других фаз. Останется прежней и величина линейного тока I_A .

Линейные токи \underline{I}_B и \underline{I}_C окажутся равными соответствующим фазным токам \underline{I}_{ab} и \underline{I}_{ca} , т. е.

$$\underline{I}_{B} = -\underline{I}_{ab} = -7,6e^{-j7^{\circ}} = 7,6e^{j173^{\circ}} \text{ A};$$
$$\underline{I}_{C} = \underline{I}_{ca} = 7,6e^{-j150} \text{ A}.$$

Режим 3 (оборван линейный провод Аа)

При обрыве линейного провода Aa ток <u> I_{bc} </u> останется таким же, как и в первом режиме, т. е. <u> $I_{bc} = 7,6e^{-90^{\circ}}$ </u> А.

Фазы приемника <u>Z</u>_{ab} и <u>Z</u>_{ca} окажутся соединенными последовательно. В соответствии с законом Ома

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca} = -\frac{\underline{U}_{BC}}{R_{ab} + jX_{ab} + R_{ca} - jX_{ca}} = -\frac{380e^{-j90^{\circ}}}{40 + j30 + 25 - j43,3} = -1,15 + j5,6 = 5,7e^{j101,6^{\circ}} \text{ A.}$$

Линейные токи I_B и I_C , в свою очередь, будут равны:

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 7,6e^{-j90^{\circ}} - 5,7e^{j101,6^{\circ}} = -1,15 - j13,2 = 13,3e^{-j85^{\circ}} \text{ A.}$$
$$\underline{I}_C = -\underline{I}_B = 13,3e^{j95^{\circ}} \text{ A.}$$

Режим 1

Tor	Значение тока, А					
IUK	расчетное	измеренное				
<u>I</u> _{ab}	5,5					
\underline{I}_{bc}	$5,5 e^{-j120^{\circ}}$					
<u>I</u> _{ca}	$5,5 e^{j120^{\circ}}$					
$\underline{I}_{\mathcal{A}}$	$9,5 e^{-j30^{\circ}}$					
\underline{I}_B	$9,5e^{-j150^{\circ}}$					
<u>I</u> C	9,5 $e^{j90^{\circ}}$					

Режим 2

Там	Значени	е тока, А
IOK	расчетное	измеренное
<u>I</u> _{ab}	5,5	
<u>I</u> bc	$4,4e^{-j120^{\circ}}$	
<u>I</u> ca	$8,8e^{j120^{\circ}}$	
\underline{I}_A	$12e^{-j37,6^{\circ}}$	
<u>I</u> _B	$8,6 e^{-j154^{\circ}}$	
\underline{I}_C	$11.6e^{j100,9^{\circ}}$	

Там	Значение тока, А					
IUK	расчетное	измеренное				
\underline{I}_{ab}	0					
\underline{I}_{bc}	$4,4e^{-j120^{\circ}}$					
<u>I</u> ca	$8,8 e^{j120^{\circ}}$					
\underline{I}_{A}	$8,8e^{-j60^{\circ}}$					
\underline{I}_B	$4,4e^{-j120^{\circ}}$					
<u>I</u> C	$11,6e^{j100,9^{\circ}}$					







Tor	Значение тока, А					
IUK	расчетное	измеренное				
<u>I</u> ab	$3,4e^{j60^{\circ}}$					
\underline{I}_{bc}	$4,4e^{-j120^{\circ}}$					
<u>I</u> ca	$3,4e^{j60^{\circ}}$					
\underline{I}_{A}	0					
<u>I</u> _B	$7,8e^{-j120^{\circ}}$					
<u>I</u> C	$7,8e^{j60^{\circ}}$					



Приложение 4

Пример расчета трехфазной цепи по схеме «звезда–звезда» (нагрузка активная)

В цепи, изображенной на рис. П.4.1, фазное напряжение генератора $U_{\rm dr} = 220$ В. Сопротивление нейтрального провода $Z_{nN} = 0$.



Рис. П.4.1

Необходимо рассчитать фазные и линейные токи в заданной цепи в следующих режимах:

1) Y–Y с nN, нагрузка симметричная: $R_A = R_B = R_C = 40$ Ом;

2) Y–Y без nN, нагрузка симметричная: $R_A = R_B = R_C = 40$ Ом;

3) Y–Y с nN, нагрузка несимметричная: $R_A = R_B = 40$ Ом; $R_c = 85$ Ом;

4) Y–Y без nN, нагрузка несимметричная: $R_A = R_B = 40$ Ом; $R_c = 85$ Ом;

5) Y-Y с nN, оборвана фаза $b: R_a = 40$ Ом; $R_c = 85$ Ом;

6) Ү–Ү без nN, оборвана фаза $b: R_A = 40$ Ом; $R_C = 85$ Ом;

7) Ү-Ү без nN, короткое замыкание фазы $a: R_B = 40$ Ом; $R_C = 85$ Ом.

По данным расчета следует построить топографическую векторную диаграмму напряжений источника и приемника, а также векторную диаграмму токов для каждого из перечисленных выше режимов.

Решение

Режим 1

В четырехпроводной трехфазной цепи нейтральный провод с сопротивлением $\underline{Z}_{nN} = 0$ обеспечивает равенство фазных напряжений генератора и соответствующих фазных напряжений приемника, т. е.

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A, \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C.$$

Линейные токи I_A , I_B и I_C , в свою очередь, будут равны соответствующим фазным токам I_a , I_b и I_c , так как приемник единственный.

Если положить, что $U_A = 220$ В, то

$$\underline{I}_{A} = \frac{\underline{U}_{A}}{R_{a}} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ A};$$
$$\underline{I}_{B} = \underline{I}_{A} \cdot e^{-j120^{\circ}} = 5,5e^{-j120^{\circ}}\text{ A};$$
$$\underline{I}_{C} = \underline{I}_{A} \cdot e^{j120^{\circ}} = 5,5e^{j120^{\circ}}\text{ A}.$$

Так как токи I_A, I_B и I_C одинаковы по величине и сдвинуты по фазе друг относительно друга на 120°, их сумма будет равна нулю: $I_N = I_A + I_B + I_C = 0$,

т. е. ток в нейтральном проводе отсутствует.

Очевидно, будет равна нулю и разность потенциалов между точками N и n (независимо от величины сопротивления нейтрального провода). Таким образом, при симметричной нагрузке нейтральный провод может быть отключен без изменения режима работы цепи и трехфазная цепь при этом окажется трехпроводной.

Режим 2

Поскольку в трехпроводной цепи напряжение между нейтралями источника и приемника $U_{nN} = 0$, порядок расчета токов останется таким же, как и при режиме 1.

Отличие между расчетными и экспериментальными значениями токов может иметь место, например, из-за небольшой несимметрии фазных напряжений трехфазного источника.

Режим 3

При изменении величины сопротивления одной из фаз (в данном примере, фазы *c*), трехфазный приемник окажется несимметричным. Ток в этой фазе станет равным:

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{R_c} = \frac{220e^{j120^\circ}}{85} = 2,6e^{j120^\circ} \text{ A}.$$

Токи в фазах а и b не изменятся, т. е. останутся такими же, как и в режиме 1:

$$\underline{I}_A = 5,5 \text{ A}; \quad \underline{I}_B = 5,5 e^{-j120^\circ} \text{ A}$$

При этом появится ток в нейтральном проводе, равный:

$$\underline{I}_N = 5,5 + 5,5e^{-j120^\circ} + 2,6e^{j120^\circ} = 2,9e^{-j60^\circ}$$
 A

Режим 4

При несимметричном приемнике и отсутствии нейтрального провода появится напряжение смещения нейтрали, равное:

$$\begin{split} \underline{U}_{nN} &= \frac{\underline{U}_{A}\underline{Y}_{a} + \underline{U}_{B}\underline{Y}_{b} + \underline{U}_{C}\underline{Y}_{c}}{\underline{Y}_{a} + \underline{Y}_{b} + \underline{Y}_{c}} = \\ &= \frac{220 \cdot 0,025 + 220e^{-j120^{\circ}} \cdot 0,025 + 220e^{j120^{\circ}} \cdot 0,0118}{0,025 + 0,025 + 0,0118} = \frac{2,9e^{-j60^{\circ}}}{0,0618} = \\ &= 23,5 - j40,7 = 47e^{-j60^{\circ}} \text{ B}, \end{split}$$
где $\underline{Y}_{a} = \frac{1}{R_{a}} = \frac{1}{40} = 0,025 \text{ Cm} = \underline{Y}_{b}; \quad \underline{Y}_{c} = \frac{1}{R_{c}} = \frac{1}{85} = 0,0118 \text{ Cm}. \end{split}$

Напряжения на фазах приемника:

$$\underline{U}_{a} = \underline{U}_{A} - \underline{U}_{nN} = 220 - 47e^{-j60^{\circ}} = 196,5 + j40,7 = 200,7e^{j11,7^{\circ}} \text{ B};$$

$$\underline{U}_{b} = \underline{U}_{B} - \underline{U}_{nN} = 220e^{-j120^{\circ}} - 47e^{-j60^{\circ}} = 200,7e^{-j131,7^{\circ}} \text{ B};$$

$$\underline{U}_{c} = \underline{U}_{C} - \underline{U}_{nN} = 220e^{j120^{\circ}} - 47e^{-j60^{\circ}} = 267e^{j120^{\circ}} \text{ B}.$$

Линейные (фазные) токи:

$$\underline{I}_{A} = \frac{\underline{U}_{a}}{R_{a}} = \frac{200,7e^{j11,7^{\circ}}}{40} = 4,9 + j1,0 = 5e^{j11,5^{\circ}} \text{ A};$$
$$\underline{I}_{B} = \frac{\underline{U}_{b}}{R_{b}} = \frac{200,7e^{-j131,7^{\circ}}}{40} = -3,3 - j3,7 = 5e^{-j131,7^{\circ}} \text{ A};$$

40

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{R_c} = \frac{267e^{j120^\circ}}{85} = -1,57 + j2,72 = 3,14e^{j120^\circ} \text{ A};$$
$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 5e^{j11,5^\circ} + 5e^{-j131,7^\circ} + 3,14e^{j120^\circ} = 0.$$

Последнее равенство является проверкой правильности расчета токов в данном режиме.

Режим 5

При обрыве фазы b приемник по-прежнему будет несимметричным. Ток I_B в этой фазе будет равен нулю.

Токи I_A и I_C останутся такими же, как в режиме 3, т. е.

$$\underline{I}_A = 5,5 \text{ A}; \qquad \underline{I}_C = 2,6e^{j120^\circ} \text{ A}$$

Следовательно, ток в нейтральном проводе будет равен:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_C = 5,5 + 2,6e^{j120^\circ} = 4,2 + j2,25 = 4,8e^{j28,2^\circ} \text{ A}.$$

Режим 6

При отсутствии нейтрального провода трехфазный приемник остается несимметричным, так как $\underline{Z}_a = R_a = 40$ Ом; $\underline{Z}_c = R_c = 85$ Ом и $\underline{Z}_b = \infty$. Напряжение смещения нейтрали \underline{U}_{nN} изменится (по сравнению с режимом 4) и будет равно:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_{A}\underline{Y}_{a} + \underline{U}_{C}\underline{Y}_{c}}{\underline{Y}_{a} + \underline{Y}_{c}} = \frac{220 \cdot 0,025 + 220e^{j120} \cdot 0,0118}{0,025 + 0,0118} =$$
$$= 115 + j61,6 = 130e^{j28,2^{\circ}} \text{ B.}$$

Напряжения на фазах приемника:

$$\underline{U}_{a} = \underline{U}_{A} - \underline{U}_{nN} = 220 - 130e^{j28,2^{\circ}} = 122e^{-j30^{\circ}} \text{ B};$$

$$\underline{U}_{b} = \underline{U}_{B} - \underline{U}_{nN} = 220e^{-j120^{\circ}} - 130e^{j28,2^{\circ}} = 337,9e^{-j131,7^{\circ}} \text{ B};$$

$$\underline{U}_{c} = \underline{U}_{C} - \underline{U}_{nN} = 220e^{j120^{\circ}} - 130e^{j28,2^{\circ}} = 259,3e^{150^{\circ}} \text{ B}.$$

Линейные (фазные) токи:

$$\underline{I}_{A} = \frac{\underline{U}_{a}}{R_{a}} = \frac{122e^{-j30^{\circ}}}{40} = 2,64 - j1,54 = 3,05e^{-j30^{\circ}} \text{ A};$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{R_c} = \frac{259,3e^{j150^\circ}}{85} = -2,65 + j1,52 = 3,05e^{j150^\circ} \text{ A}.$$

Очевидно, токи в фазах a и c должны быть одинаковы по величине и сдвинуты по фазе друг относительно друга на 180°, так как при обрыве фазы b и отсутствии нейтрального провода трехфазная цепь становится однофазной с линейным напряжением U_{AC} на ее входе.

Учитывая это, токи I_A и I_C можно рассчитать иначе:

$$\underline{I}_{A} = \frac{\underline{U}_{AC}}{R_{a} + R_{c}} = \frac{380e^{-j30^{\circ}}}{40 + 85} = 3,04e^{-j30^{\circ}} \text{ A}; \qquad \underline{I}_{C} = -\underline{I}_{A} = 3,04e^{j150^{\circ}} \text{ A}.$$

Режим 7

При коротком замыкании фазы *a* и отсутствии нейтрального провода $U_a = 0$, а напряжение смещения нейтрали $U_{nN} = U_A = 220$ В.

Следовательно, напряжения на фазах *b* и *c* приемника будут равны:

$$\underline{U}_{b} = \underline{U}_{B} - \underline{U}_{nN} = \underline{U}_{B} - \underline{U}_{A} = \underline{U}_{BA} = 380e^{-j150^{\circ}} \text{ B}$$
$$\underline{U}_{c} = \underline{U}_{C} - \underline{U}_{nN} = \underline{U}_{C} - \underline{U}_{A} = \underline{U}_{CA} = 380e^{j150^{\circ}} \text{ B}.$$

В свою очередь, линейные токи:

$$\underline{I}_{B} = \frac{\underline{U}_{b}}{R_{b}} = \frac{380e^{-j150^{\circ}}}{40} = 9,5e^{-j150^{\circ}} \text{ A};$$
$$\underline{I}_{C} = \frac{\underline{U}_{c}}{R_{c}} = \frac{380e^{j150^{\circ}}}{85} = 4,47e^{j150^{\circ}} \text{ A};$$
$$A = -(I_{B} + I_{C}) = -(9,5e^{-j150^{\circ}} + 4,47e^{j150^{\circ}}) = 12,4e^{j12^{\circ}} \text{ A};$$

Tor	Значение тока, А		
IUK	расчетное	измеренное	
\underline{I}_{A}	5,5		
<u>I</u> _B	$5,5e^{-120^{\circ}}$		
\underline{I}_C	$5,5e^{j120^{\circ}}$		
\underline{I}_N	0		

Режимы 1, 2



Режим 3

Torr	Значени	е тока, А
IOK	расчетное	измеренное
\underline{I}_A	5,5	
<u>I</u> B	$5,5 e^{-j120^\circ}$	
\underline{I}_C	$2,6e^{j120^{\circ}}$	
\underline{I}_N	$2,9e^{-60^{\circ}}$	



Режим 4

Tor	Значени	е тока, А	Цанранонна	Значение нап	ряжения, В
IUK	расчетное	измеренное	папряжение	расчетное	измеренное
<u>I</u> _A	$5e^{j11,7^{\circ}}$		\underline{U}_a	200,7 $e^{j11,7^{\circ}}$	
<u>I</u> _B	$5e^{-j131,7^{\circ}}$		\underline{U}_b	$200,7e^{-j131,7^{\circ}}$	
\underline{I}_C	$3,14e^{j120^{\circ}}$		\underline{U}_{c}	$267 e^{j120^{\circ}}$	
		S	\underline{U}_{nN}	$47 e^{-60^{\circ}}$	

+jCUc Ua +1Įε $\underline{U}_{B_{\sim}}$ n В

97

Режим 5

Так	Значение тока, А			
IUK	расчетное	измеренное		
\underline{I}_{A}	5,5			
\underline{I}_B	0			
\underline{I}_C	$2,6e^{j120^{\circ}}$			
\underline{I}_N	$4,8e^{j28,2^{\circ}}$			



Tor	Значение тока, А		Попрамонно	Значение напряжения, В	
I UK	расчетное	измеренное	папряжение	расчетное	измеренное
\underline{I}_A	$3e^{-j30^{\circ}}$		\underline{U}_a	121,7 $e^{-j30^{\circ}}$	
\underline{I}_B	0		\underline{U}_b	338,7 $e^{-j131,7^{\circ}}$	
<u>I</u> _C	$3e^{j150^{\circ}}$		\underline{U}_{c}	259,3 $e^{j150,2^{\circ}}$	
			\underline{U}_{nN}	$130e^{j28,2^{\circ}}$	



Режим 7

Tor	Зна	чение тока, А
10K	расчетное	измеренное
\underline{I}_{A}	$12,4e^{j12^{\circ}}$	
\underline{I}_B	$9,5 e^{-j150^{\circ}}$	
<u>I</u> _C	$4,47 e^{j150^{\circ}}$	



Расчет трехфазной цепи по схеме «звезда–звезда» (нагрузка комплексная несимметричная)

В цепи, изображенной на рис. П.5.1, фазное напряжение симметричного генератора $U_{\rm dr} = 220$ В.

Комплексные сопротивления фаз приемника:

$$\underline{Z}_a = 43e^{-j40^\circ} = (33 - j27,7)$$
 Ом; $\underline{Z}_b = 43e^{j68,2^\circ} = (16 + j40)$ Ом;
 $\underline{Z}_c = R_c = 43$ Ом.



Рис. П.5.1

Необходимо рассчитать линейные и фазные токи для следующих режимов:

1) приемник несимметричный (с нейтралью);

2) приемник несимметричный (без нейтрали);

3) обрыв (отключение) фазы с (с нейтралью);

4) обрыв (отключение) фазы с (без нейтрали);

5) короткое замыкание фазы а (без нейтрали).

Режим 1

Пусть $U_A = 220$ В. Тогда $U_B = 220e^{-j120^\circ}$ В, $U_C = 220e^{j120^\circ}$ В.

При наличии идеального нейтрального провода токи в линейных проводах с учетом (4.2) будут равны:

$$\underline{I}_{A} = \frac{\underline{U}_{A}}{\underline{Z}_{a}} = \frac{220}{33 - j27,7} = 3,91 + j3,28 = 5,1e^{j40^{\circ}} \text{ A};$$
$$\underline{I}_{B} = \frac{\underline{U}_{B}}{\underline{Z}_{a}} = \frac{220e^{-j120^{\circ}}}{16 + j40} = -5,05 + j0,73 = 5,1e^{j171,8^{\circ}} \text{ A};$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_c} = \frac{220e^{j120^\circ}}{43} = -2,56 + j4,43 = 5,1e^{j120^\circ} \text{ A}$$

Ток в нейтральном проводе

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 5,1e^{j40^\circ} + 5,1e^{j171,8^\circ} + 5,1e^{j120^\circ} = -3,69 + j8,42 = 9,2e^{j113,7^\circ} \text{ A}.$$

Режим 2

При отсутствии нейтрального провода между нейтралью приемника *n* и нейтралью источника *N* возникает напряжение:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{U_{\phi r} \left[\frac{1}{\underline{Z}_{a}} + 1e^{-j120^{\circ}} \left(\frac{1}{\underline{Z}_{b}} \right) + 1e^{j120^{\circ}} \left(\frac{1}{\underline{Z}_{c}} \right) \right]}{\frac{1}{\underline{Z}_{a}} + \frac{1}{\underline{Z}_{b}} + \frac{1}{\underline{Z}_{c}}} = \frac{220 \left[\frac{1}{33 - j27,7} + 1e^{-j120^{\circ}} \left(\frac{1}{16 + j40} \right) + 1e^{j120^{\circ}} \left(\frac{1}{43} \right) \right]}{\frac{1}{33 - j27,5} + \frac{1}{16 + j40} + \frac{1}{43}} = -95,3 + j156,3 = 183e^{121,4^{\circ}} \text{ B.}$$

Напряжения на фазах приемника:

$$\underline{U}_{a} = \underline{U}_{A} - \underline{U}_{nN} = 220 - 183e^{121,4^{\circ}} = 315,3 - j156,2 = 351,9e^{-j26,4^{\circ}};$$

$$\underline{U}_{b} = \underline{U}_{B} - \underline{U}_{nN} = 220e^{-120^{\circ}} - 183e^{j121,4^{\circ}} = -14,7 - j346,7 = 347e^{-j92,4^{\circ}} \text{ B};$$

$$\underline{U}_{c} = \underline{U}_{C} - \underline{U}_{nN} = 220e^{j120^{\circ}} - 183e^{j121,4^{\circ}} = -14,7 + j34,3 = 37,3e^{j113^{\circ}} \text{ B}.$$

Линейные токи:

$$\underline{I}_{A} = \frac{\underline{U}_{a}}{\underline{Z}_{a}} = \frac{351,9e^{-j26,4}}{33 - j27,7} = 7,95 + j1,92 = 8,17e^{j13,6^{\circ}} \text{ A};$$
$$\underline{I}_{B} = \frac{\underline{U}_{b}}{\underline{Z}_{b}} = \frac{347e^{-92,4^{\circ}}}{16 + j40} = -7,6 - j2,68 = 8,05e^{-j160,6^{\circ}} \text{ A};$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{37.3e^{j113^\circ}}{43} = -0.34 + j0.8 = 0.87e^{j113^\circ} \text{ A}$$

Проверка:

$$I_A + I_B + I_C = 8,17e^{j13,6^\circ} + 8,05e^{-j160,6^\circ} + 0,87e^{j113^\circ} \approx 0.$$

Режим 3

При обрыве фазы c и наличии нейтрального провода линейные токи I_A и I_B останутся такими же, как и в режиме 1. Ток $I_C = 0$.

Ток в нейтральном проводе

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B = 5,1e^{j40^\circ} + 5,1e^{j171,8^\circ} = -1,14 + j4 = 4,17e^{j105,9^\circ} \text{ A}.$$

Режим 4

При обрыве фазы *с* и отсутствии нейтрального провода между точками *n* и *N* появится напряжение, равное:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{U_{\phi r} \left[\frac{1}{\underline{Z}_{a}} + 1e^{-j120^{\circ}} \left(\frac{1}{\underline{Z}_{b}} \right) \right]}{\frac{1}{\underline{Z}_{a}} + \frac{1}{\underline{Z}_{b}}} = \frac{220 \left[\left(\frac{1}{33 - j27,7} \right) + 1e^{-j120^{\circ}} \left(\frac{1}{16 + j40} \right) \right]}{\frac{1}{33 - j27,7} + \frac{1}{16 + j40}} = 152,3e^{j120,2^{\circ}} \text{ B.}$$

Напряжения на фазах приемника:

$$\underline{U}_{a} = \underline{U}_{A} - \underline{U}_{nN} = 220 - 152, 3e^{j120,2^{\circ}} = 296, 6 - j131, 6 = 324, 5e^{-j23,9^{\circ}} \text{ B};$$
$$\underline{U}_{b} = \underline{U}_{B} - \underline{U}_{nN} = 220e^{-j120^{\circ}} - 152, 3e^{120,2^{\circ}} = 323, 9e^{-j95,9^{\circ}} \text{ B}.$$

Линейные токи:

$$\underline{I}_{A} = \frac{\underline{U}_{a}}{\underline{Z}_{a}} = \frac{324,5e^{-j23,9^{\circ}}}{33-j27,7} = 7,24 + j2,09 = 7,5e^{j16^{\circ}} \text{ A}_{5}^{j16^{\circ}}$$
$$\underline{I}_{B} = \frac{\underline{U}_{b}}{\underline{Z}_{b}} = \frac{323,9e^{-j95,9^{\circ}}}{43e^{j68,2^{\circ}}} = 7,5e^{-j164^{\circ}} \text{ A}.$$

Линейные токи можно рассчитать иначе, так как цепь в рассматриваемом режиме представляет последовательное соединение фаз \underline{Z}_a и \underline{Z}_b , к которому приложено линейное напряжение \underline{U}_{AB} :

$$\underline{I}_{A} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{a} + \underline{Z}_{b}} = \frac{380e^{j30^{\circ}}}{33 - j27,5 + 16 + j40} = 7,2 + j2 = 7,5e^{j16^{\circ}} \text{A}$$
$$\underline{I}_{B} = -\underline{I}_{A} = 7,5e^{-j164^{\circ}} \text{A}.$$

Режим 5

Важно помнить, что режим короткого замыкания любой из фаз приемника при наличии нейтрального провода является *аварийным*.

В цепи без нейтрали (рис. П.5.1) при коротком замыкании, например, фазы *а* нейтральная точка приемника *n* сместится (на векторной диаграмме) в точку *A* источника, т. е. напряжение смещения нейтрали будет равно:

$$\underline{U}_{nN} = \underline{U}_A = 220 \text{ B}.$$

Следовательно, токи I_B и I_C могут быть определены в виде:

$$\underline{I}_{B} = \frac{\underline{U}_{B} - \underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_{b}} = \frac{\underline{U}_{B} - \underline{U}_{A}}{\underline{Z}_{b}} = \frac{\underline{U}_{BA}}{\underline{Z}_{b}} = -\frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{b}} =$$
$$= -\frac{380e^{j30^{\circ}}}{16 + j40} = -6,9 + j5,5 = 8,8e^{j141,8^{\circ}} \text{A};$$
$$\underline{I}_{C} = \frac{\underline{U}_{C} - \underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_{c}} = \frac{\underline{U}_{C} - \underline{U}_{A}}{\underline{Z}_{c}} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{c}} = \frac{380e^{j150^{\circ}}}{43} =$$
$$= -7,7 + j4,4 = 8,8e^{j150^{\circ}} \text{A}.$$

Тогда ток I_A будет равен:

$$\underline{I}_{A} = -(\underline{I}_{B} + \underline{I}_{C}) = -(8,8e^{j141,8^{\circ}} + 8,8e^{j150^{\circ}}) = 17,7e^{-j34^{\circ}} \text{ A}.$$

Короткое замыкание фазы приемника в схеме «звезда–звезда» без нейтрального провода принципиально возможно. Однако следует иметь в виду, что токи в линейных проводах и в фазах трехфазного источника могут оказаться недопустимо большими, поскольку напряжение на оставшихся фазах увеличится в $\sqrt{3}$ раз. Кроме того, их величина также зависит от характера сопротивлений этих фаз.

Режим 1

Tor	Значение тока, А		
IUK	расчетное	измеренное	
\underline{I}_A	$5,1e^{j39,8^{\circ}}$		
\underline{I}_B	$5,1 e^{j171,8^{\circ}}$		
\underline{I}_C	$5,1e^{j120^{\circ}}$		
\underline{I}_N	$0,2e^{j113,7^{\circ}}$		



Tor	Значение тока, А		Цанражанна	Значение напряжения, В	
IUK	расчетное	измеренное	папряжение	расчетное	измеренное
\underline{I}_A	$8,2e^{j13,5^{\circ}}$		\underline{U}_{a}	351,92 <i>e</i> ^{-<i>j</i>260,4°}	
\underline{I}_B	$8,12e^{-j160,6^{\circ}}$		\underline{U}_b	$347,12e^{-j92,4^{\circ}}$	
\underline{I}_C	$0,92e^{j113,2^{\circ}}$		\underline{U}_{c}	$37,32e^{j113,2^{\circ}}$	
			\underline{U}_{nN}	$183,12e^{j121,4^{\circ}}$	



Режим 3

Tor	Значение тока, А		
IUK	расчетное	измеренное	
\underline{I}_{A}	$5,1e^{j39,8^{\circ}}$		
<u>I</u> _B	$5,1e^{j171,8^{\circ}}$		
<u>I</u> C	0		
\underline{I}_N	$4,1e^{j105,8^{\circ}}$		



Tor	Значение тока, А		Цапрамонно	Значение напряжения, В	
TOK	расчетное	измеренное	папряжение	расчетное	измеренное
\underline{I}_{A}	$7,5 e^{j15,7^{\circ}}$		<u>U</u> a	$324,5e^{-j23,9^{\circ}}$	
<u>I</u> _B	$7,5e^{-j164,3^{\circ}}$		\underline{U}_b	$323,9e^{-j95,9^{\circ}}$	
\underline{I}_C	0		\underline{U}_{c}	$67,7e^{j119,6^{\circ}}$	
			\underline{U}_{nN}	$152,3e^{j120,2^{\circ}}$	



Режим 5

Ток	Значение тока, А		
IUK	расчетное	измеренное	
<u>I</u> _A	$17,7e^{-j34^{\circ}}$		
\underline{I}_B	$8,8e^{j141,8^{\circ}}$		
\underline{I}_C	$8.8e^{j150^{\circ}}$		



Задача 1

Трехфазная несимметричная статическая нагрузка подключена к несимметричному трехфазному источнику с фазными напряжениями:

$$\underline{U}_A = 80$$
 В, $\underline{U}_B = 120e^{-j120^\circ}$ В и $\underline{U}_C = 60e^{j120^\circ}$ В.

Сопротивления фаз приемника:

$$\underline{Z}_a = R_a = 20$$
 Ом, $\underline{Z}_b = R_b - jX_b = 8,45 - j18,1 = 20e^{-j65^\circ}$ Ом и $\underline{Z}_c = R_c + jX_c = 14,1 + j14,1 = 20e^{j45^\circ}$ Ом.

Определить токи и напряжения на фазах приемника и напряжение смещения нейтрали.

Построить топографическую векторную диаграмму напряжений и лучевую диаграмму токов.

Решение

Разложим несимметричную систему фазных напряжений трехфазного источника на симметричные составляющие:

$$\underline{U}_{A1} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{A} + a\underline{U}_{B} + a^{2}\underline{U}_{C}) =$$

$$= \frac{1}{3} (80 + 1e^{j120^{\circ}} \cdot 120e^{-j120^{\circ}} + 1e^{-j120^{\circ}} \cdot 60e^{j120^{\circ}}) = 86,7 \text{ B};$$

$$\underline{U}_{A2} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{A} + a^{2}\underline{U}_{B} + a\underline{U}_{C}) =$$

$$= \frac{1}{3} (80 + 1e^{-j120^{\circ}} \cdot 120e^{-j120^{\circ}} + 1e^{j120^{\circ}} \cdot 60e^{j120^{\circ}}) =$$

$$= -3,33 + j17,3 = 17,64e^{j100,9^{\circ}} \text{ B};$$

$$\underline{U}_{A0} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{A} + \underline{U}_{B} + \underline{U}_{C}) =$$

$$\frac{1}{3} (80 + 120e^{-j120^{\circ}} + 60e^{j120^{\circ}}) = -3,33 - j17,3 = 17,64e^{-j100^{\circ}} \text{ B}.$$

Таким образом, каждая из симметричных систем может быть представлена в виде:

- система прямой последовательности:

$$\underline{U}_{A1} = 86,7 \text{ B}; \qquad \underline{U}_{B1} = 86,7e^{-j120^{\circ}}\text{B}; \qquad \underline{U}_{C1} = 86,7e^{j120^{\circ}}\text{B};$$

- система обратной последовательности:

$$\underline{U}_{A2} = 17,64e^{j100,9^{\circ}}$$
B; $\underline{U}_{B2} = 17,64e^{j220,9^{\circ}}$ B; $\underline{U}_{C2} = 17,64e^{-j19,1^{\circ}}$ B;

- система нулевой последовательности

$$\underline{U}_{A0} = \underline{U}_{B0} = \underline{U}_{C0} = 17,64e^{-j100^{\circ}} \mathrm{B}.$$

Расчет напряжений и токов прямой последовательности Напряжение смещения нейтрали

$$\underline{U}_{nN1} = \frac{\underline{U}_{A1}\underline{Y}_a + \underline{U}_{B1}\underline{Y}_b + \underline{U}_{C1}\underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} =$$

$$=\frac{\frac{86,7}{20}+\frac{86,7e^{-j120^{\circ}}}{8,45-j18,1}+\frac{86,7e^{j120^{\circ}}}{14,1+j14,1}}{\frac{1}{20}+\frac{1}{8,45-j18,1}+\frac{1}{14,1+j14,1}}=74,4-j1=74,4e^{-j0,8^{\circ}}B.$$

Напряжения прямой последовательности на фазах приемника:

$$\underline{U}_{a1} = \underline{U}_{A1} - \underline{U}_{nN1} = 86,7 - 74,4e^{-j0,8^{\circ}} = 12,3e^{j4,6^{\circ}} B;$$

$$\underline{U}_{b1} = \underline{U}_{B1} - \underline{U}_{nN1} = 86,7e^{-j120^{\circ}} - 74,4e^{-j0,8^{\circ}} = 139,1e^{-j147,8^{\circ}} B;$$

$$\underline{U}_{c1} = \underline{U}_{C1} - \underline{U}_{nN1} = 86,7e^{j120^{\circ}} - 74,4e^{-j0,8^{\circ}} = 140,2e^{j147,1^{\circ}} B.$$

Токи прямой последовательности в фазах приемника:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{U}_{a1}}{\underline{Z}_{a}} = \frac{12,3e^{j4,6^{\circ}}}{20} = 0,615 + j0,05 = 0,617e^{j4,6^{\circ}} \text{A};$$

$$\underline{I}_{B1} = \frac{\underline{U}_{b1}}{\underline{Z}_{b}} = \frac{139,1e^{-j147,8^{\circ}}}{8,45 - j18,1} = 0,87 - j6,9 = 6,96e^{-j82,8^{\circ}} \text{A};$$

$$\underline{I}_{C1} = \frac{\underline{U}_{c1}}{\underline{Z}_{c}} = \frac{140,2e^{j147,1^{\circ}}}{14,1 + j14,1} = -1,47 + j6,85 = 7e^{j102,1^{\circ}} \text{A}.$$
Проверка:

$$\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{C1} \approx 0.$$

Расчет напряжений и токов обратной последовательности Напряжение смещения нейтрали

$$\underline{U}_{nN2} = \frac{\underline{U}_{A2}\underline{Y}_{a} + \underline{U}_{B2}\underline{Y}_{b} + \underline{U}_{C2}\underline{Y}_{c}}{\underline{Y}_{a} + \underline{Y}_{b} + \underline{Y}_{c}} =$$

$$= \frac{\frac{17,64e^{j100,9^{\circ}}}{20} + \frac{17,64e^{j220,9^{\circ}}}{8,45 - j18,1} + \frac{17,64e^{-j19,1^{\circ}}}{14,1 + j14,1}}{\frac{1}{20} + \frac{1}{8,45 - j18,1} + \frac{1}{14,1 + j14,1}} = 8,43e^{-j64,6^{\circ}} \text{ B}.$$

Напряжения обратной последовательности на фазах приемника:

$$\underline{U}_{a2} = \underline{U}_{A2} - \underline{U}_{nN2} = 17,64e^{j100,9^{\circ}} - 8,43e^{-j64,6^{\circ}} = 25,9e^{j105,6^{\circ}}B;$$

$$\underline{U}_{b2} = \underline{U}_{B2} - \underline{U}_{nN2} = 17,64e^{j220,9^{\circ}} - 8,43e^{-j64,6^{\circ}} = 17,4e^{-j167^{\circ}}B;$$

$$\underline{U}_{c2} = \underline{U}_{C2} - \underline{U}_{nN2} = 17,64e^{-j19,1^{\circ}} - 8,43e^{-j64,6^{\circ}} = 13,2e^{j8^{\circ}}B.$$

Токи обратной последовательности в фазах приемника:

$$\underline{I}_{A2} = \frac{\underline{U}_{a2}}{\underline{Z}_{a}} = \frac{25,9e^{j105,6^{\circ}}}{20} = -0,35 + j1,25 = 1,29e^{j105,6^{\circ}} \text{A};$$

$$\underline{I}_{B2} = \frac{\underline{U}_{b2}}{\underline{Z}_{b}} = \frac{17,4e^{-j167^{\circ}}}{8,45 - j18,1} = -0,18 - j0,85 = 0,87e^{-j101,9^{\circ}} \text{A};$$

$$\underline{I}_{C2} = \frac{\underline{U}_{c2}}{\underline{Z}_{c}} = \frac{13,2e^{j8^{\circ}}}{14,1 + j14,1} = 0,53 - j0,4 = 0,66e^{-j37^{\circ}} \text{A}.$$

Проверка:

$$\underline{I}_{A2} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{C2} \approx 0.$$

Токи нулевой последовательности в рассматриваемой схеме равны нулю, так как нейтральный провод отсутствует.

Следовательно, реальные токи в фазах приемника в соответствии с принципом наложения будут равны:

$$\underline{I}_{A} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} = 0,617e^{j4,6^{\circ}} + 1,29e^{j105,7^{\circ}} = 1,33e^{j78,5^{\circ}} \text{A};$$

$$\underline{I}_{B} = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} = 6,96e^{-j82,8^{\circ}} + 0,87e^{-j101,9^{\circ}} = 7,8e^{-j85^{\circ}} \text{A};$$

$$I_{C} = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} = 7e^{j102,1^{\circ}} + 0,66e^{-j37^{\circ}} = 6,5e^{j98,3^{\circ}} \text{A}.$$

Сумма токов в фазах приемника, соединенных звездой:

$$\underline{I}_{A} + \underline{I}_{B} + \underline{I}_{C} = 1,33e^{j78,5^{\circ}} + 7,8e^{-j85^{\circ}} + 6,5e^{j98,3^{\circ}} \cong 0,$$

что подтверждает правильность расчета.

Реальные напряжения на фазах приемника определяются аналогично токам с учетом того, что напряжения нулевой последовательности в них отсутствуют:

$$\underline{U}_{a} = \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} = 12,3e^{j4,6^{\circ}} + 25,9e^{j105,6^{\circ}} = 5,3 + j25,9 = 26,5e^{j78,5^{\circ}}\text{B};$$

$$\underline{U}_{b} = \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} = 139,1e^{-j147,8^{\circ}} + 17,4e^{-j167^{\circ}} = -134,7 - j78 = 155,6e^{-j149,9^{\circ}}\text{B};$$

$$U_{a1} = U_{a1} + U_{a2} = 140,2e^{j147,1^{\circ}} + 12,2e^{j8^{\circ}} = 104,64 + j78 = 120,5e^{j143,3^{\circ}}\text{P}$$

 $\underline{U}_{c} = \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2} = 140, 2e^{j147,1^{\circ}} + 13, 2e^{j8^{\circ}} = -104, 64 + j78 = 130, 5e^{j143,3^{\circ}} \text{B}.$

Напряжение смещения нейтрали будет равно:

$$\underline{U}_{nN} = \underline{U}_{nN1} + \underline{U}_{nN2} + \underline{U}_{nN0} = 74,4e^{-j0.8^{\circ}} + 8,43e^{-j64.6^{\circ}} + 17,64e^{-j100^{\circ}} = 74,95 - j26,03 = 79,3e^{-j19.2^{\circ}} \text{B}.$$

Ток	Значение тока, А		Hawngwaawaa	Значение напряжения, В	
	расчетное	измеренное	папряжение	расчетное	измеренное
$\underline{I}_{\mathcal{A}}$	$1,33 e^{j78,5^{\circ}}$		\underline{U}_a	26,5 $e^{j78,5^{\circ}}$	
<u>I</u> _B	$7,8 e^{-j85^{\circ}}$		\underline{U}_{b}	$155,6e^{-j149,9^{\circ}}$	\sum
\underline{I}_C	$6,5 e^{j98,3^{\circ}}$		\underline{U}_{c}	130,5 $e^{j143,3^{\circ}}$	5
IA	$1,33 e^{j78,5^{\circ}}$		\underline{U}_{nN}	$79,3e^{-j19,2^{\circ}}$	
			\underline{U}_a	$26,5 e^{j78,5^{\circ}}$	



Задача 2

Трехфазный асинхронный двигатель получает питание от генератора с фазной ЭДС 220 В. Обмотка фазы A генератора ошибочно подключена к нейтрали N не тем выводом, что привело к нарушению симметрии ЭДС генератора. Сопротивления двигателя для прямой последовательности $\underline{Z}_1 = (2,82 + j2,82)$ Ом, для обратной последовательности – $\underline{Z}_2 = (1 + j1,73)$ Ом.

Определить токи в фазах двигателя.

Сравнить активные мощности, потребляемые двигателем при ошибочном и правильном включении фазных обмоток генератора

Решение

Представим ЭДС генератора в комплексной форме записи.

Если <u>*E*</u>_{*B*} = $220e^{-120^{\circ}}$ В, <u>*E*</u>_{*C*} = $220e^{j120^{\circ}}$ В, то ЭДС будет равна: <u>*E*</u>_{*A*} = -220 В.

Раскладывая несимметричную систему ЭДС на симметричные составляющие, получим:

$$\underline{E}_{A1} = \frac{1}{3} \left(\underline{E}_A + a \underline{E}_B + a^2 \underline{E}_C \right) =$$

$$= \frac{1}{3} \left(-220 + 1e^{j120^\circ} \cdot 220e^{-120^\circ} + 1e^{-j120^\circ} \cdot 220e^{j120^\circ} \right) = 73,3 \text{ B};$$

$$\underline{E}_{A2} = \frac{1}{3} \left(\underline{E}_A + a^2 \underline{E}_B + a \underline{E}_C \right) =$$

$$= \frac{1}{3} \left(-220 + 1e^{-j120^\circ} \cdot 220e^{-j120^\circ} + 1e^{j120^\circ} \cdot 220e^{j120^\circ} \right) = -146,7 \text{ B};$$

$$\underline{E}_{A0} = \frac{1}{3} \left(\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C \right) = \frac{1}{3} \left(-220 + 220e^{-j120^\circ} + 220e^{j120^\circ} \right) = -146,7 \text{ B}.$$

По схеме замещения для прямой последовательности найдем ток <u>*I*</u>_{A1}:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{E}_{A1}}{\underline{Z}_1} = \frac{73,3}{2,82+j2,82} = 18,4e^{-j45^{\circ}} \text{A}.$$

Токи прямой последовательности в других фазах будут равны:

$$\underline{I}_{B1} = 18,4e^{-j165^{\circ}}$$
 A; $\underline{I}_{C1} = 18,4e^{j75^{\circ}}$ A.

По схеме замещения для обратной последовательности найдем ток I_{A2} :

$$\underline{I}_{A2} = \frac{\underline{E}_{A2}}{\underline{Z}_2} = \frac{-146,7}{1+j1,73} = 73,4e^{j120^{\circ}} \text{A}.$$

Токи обратной последовательности в других фазах будут равны:

$$\underline{I}_{B2} = 73,4e^{-j120^{\circ}}$$
A; $\underline{I}_{C2} = 73,4$ A.

Токи нулевой последовательности в рассматриваемой схеме равны нулю, так как нейтральный провод отсутствует.

Следовательно, реальные токи в фазах двигателя в соответствии с принципом наложения будут равны:

$$\underline{I}_{A} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} = 18, 4e^{-j45^{\circ}} + 73, 4e^{j120^{\circ}} = 55, 8e^{j115,1^{\circ}} A;$$

$$\underline{I}_{B} = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} = 18, 4e^{-165^{\circ}} + 73, 4e^{-j120^{\circ}} = 87, 4e^{-j128,6^{\circ}} A;$$

$$\underline{I}_{C} = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} = 18, 4e^{j75^{\circ}} + 73, 4 = 80, 2e^{j12,8^{\circ}} A.$$
(II.7.1)

Сумма токов в фазах двигателя, соединенных звездой:

$$\underline{I}_{A} + \underline{I}_{B} + \underline{I}_{C} = 55,8e^{j115,1^{\circ}} + 87,4e^{-j128,6^{\circ}} + 80,2e^{j12,8^{\circ}} \cong 0$$

что подтверждает правильность расчета.

Соединение обмоток трехфазного источника, приведенное в данной задаче, является ошибочным, потому что напряжение, близкое к номинальному, сохранится лишь между точками B и C. Линейные напряжения U_{AB} и U_{CA} окажутся значительно понижены и будут равны фазному напряжению.

В сетях освещения это приведет к существенному уменьшению накала ламп. В сетях, питающих асинхронные электродвигатели, изза нарушения симметрии линейных напряжений резко уменьшатся мощность на валу и вращающий момент, что может привести к остановке и сгоранию электродвигателя, а также к изменению направления его вращения.

Расчет переходных процессов в линейных электрических цепях первого порядка с индуктивной катушкой

Пример 1

В цепи, приведенной на рис. П.7.1, *a*, рассчитать классическим методом переходные характеристики $i_1(t)$ и $u_L(t)$ после коммутации и построить их графики.



Рис. П.7.1

Исходные данные: E = 60 B; $R_1 = R_2 = R_3 = 20$ Ом; L = 40 мГн.

Решение

Непосредственно перед коммутацией ($t = 0_{-}$):

$$i_L(0_-) = 0 = i_L(0_+)$$

на основании I закона коммутации.

Следовательно,

$$i_1(0_+) = i_2(0_+) = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{60}{20 + 20} = 1,5 \text{ A};$$

 $u_L(0_+) = i_2(0_+)R_2 = 1,5 \cdot 20 = 30 \text{ B}.$

В установившемся режиме после коммутации:

$$i_{1\text{np}} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{60}{20 + \frac{20 \cdot 20}{20 + 20}} = 2 \text{ A}; \quad u_{L\text{np}} = 0.$$

Согласно классическому методу расчета:

$$i_1(t) = i_{1\pi p} + i_{1cB} = 2 + Ae^{pt};$$
 $u_L(t) = u_{L\pi p} + u_{LcB} = Be^{pt}.$

На рис. П.8.1, б приведена схема для определения корня характеристического уравнения, согласно которой

$$Z_{\rm BX}(p) = Lp + R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = Lp + R_{_{\rm 3KB}}, \, \text{где} \, R_{_{\rm 3KB}} = 30 \, \text{ Ом.}$$

$$p = -\frac{R_{_{\rm 3KB}}}{L} = -\frac{30}{40 \cdot 10^{-3}} = -750 \, \text{ c}^{-1}; \, \tau = 1,33 \cdot 10^{-3} \, \text{с и} \, t_{_{\rm III}} = 6,67 \cdot 10^{-3} \, \text{с.}$$

$$i_1(0_+) = 2 + A = 1,5 \, \Rightarrow \, A = -0,5 \, \text{ A}:$$

$$u_L(0_+) = B = 30 \, \text{ B.}$$

Окончательно:

$$i_1(t) = 2 - 0.5e^{-750t}$$
 A; $u_L(t) = 30e^{-750t}$ B.

Графики $i_1(t)$ и $u_L(t)$ приведены на рис. П. 8.2, *а* и б.



Рис. П.7.2

Пример 2

В цепи, приведенной на рис. П.7.3, *a*, рассчитать переходные характеристики $i_1(t)$ и $u_{\kappa}(t)$ после коммутации и построить их графики.

Исходные данные: U = 96 B; $R_1 = R_3 = 15$ Ом; $R_2 = 5$ Ом;

Рис. П.7.3

Решение

В установившемся режиме до коммутации:

$$i_{1}(0_{-}) = \frac{U}{R_{1} + R_{2} + \frac{R_{3}R_{\kappa}}{R_{3} + R_{\kappa}}} = \frac{96}{15 + 5 + \frac{15 \cdot 60}{15 + 60}} = 3 \text{ A};$$

$$i_{L}(0_{-}) = i_{1}(0_{-})\frac{R_{3}}{R_{3} + R_{\kappa}} = 3\frac{15}{15 + 60} = 0,6 \text{ A} = i_{\kappa}(0).$$

Эквивалентная операторная схема цепи после коммутации представлена на рис. П.8.3, б.

По закону Ома

$$I_1(p) = \frac{\frac{U}{p} + Li_L(0)}{R_1 + R_2 + R_{\kappa} + Lp} = \frac{\frac{96}{p} + 40 \cdot 10^{-3} \cdot 0.6}{15 + 5 + 60 + 40 \cdot 10^{-3} p} = \frac{0.6 p + 2400}{p(p + 2000)}.$$

Применим теорему разложения:

$$I_1(p) = \frac{F_1(p)}{pF_3(p)}$$
, где $F_3(p) = p + 2000 = 0$.

Корни знаменателя:

$$p_0 = 0;$$
 $p_1 = -2000 \, \mathrm{l/c}$

Вид оригинала:

$$i_{1}(t) = \frac{F_{1}(0)}{F_{3}(0)} + \frac{F_{1}(p)}{p_{1}F_{3}(p)}e^{p_{1}t} = \frac{2400}{2000} + \frac{0.6(-2000) + 2400}{-2000}e^{-2000t} = 1.2 - 0.6e^{-2000t} \text{ A}.$$

Операторное изображение напряжения на индуктивной катушке в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать в виде

$$U_{\kappa}(p) = \frac{U}{p} - (R_1 + R_2)I_1(p) = \frac{96}{p} - (15 + 5)\frac{0.6p + 2400}{p(p + 2000)} =$$
$$= \frac{84p + 144000}{p(p + 2000)}.$$

Представив операторное изображение $U_{\kappa}(p)$ в виде простых дробей, найдем:

$$U_{\kappa}(p) = 84 \frac{1}{p+2000} + 72 \frac{2000}{p(p+2000)} \Longrightarrow 84e^{-2000t} + 72(1-e^{-2000t}) =$$
$$= 72 + 12e^{-2000t} \text{ B}.$$

Рассчитанные зависимости $u_{\kappa}(t)$ и $i_1(t)$ приведены на рис. П.7.4.



Рис. П.7.4

Приложение 8

Расчет переходных процессов в линейных электрических цепях первого порядка с конденсатором

Задача 1

В цепи, приведенной на рис. П.8.1, *a*, U = 120 В; $C = 25 \cdot 10^{-6} \Phi$; $R_1 = R_3 = 80$ Ом; $R_2 = 20$ Ом.

Рассчитать переходные характеристики $u_C(t)$ и $i_0(t)$ классическим методом и построить их графики.



Рис. П.8.1

Решение

В качестве основной неизвестной выберем переходное напряжение $u_C(t)$.

В установившемся режиме до коммутации

$$u_C(0_-) = \frac{U}{R_1 + R_3} R_3 = \frac{120}{80 + 80} 80 = 60 \text{ B}.$$

На основании второго закона коммутации независимое начальное условие

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 60$$
 B.

В соответствии с классическим методом расчета переходное напряжение $u_C(t)$:

$$u_C(t) = u_{Cnp} + u_{CcB} = u_{Cnp} + Ae^{pt}$$
.

Принужденная составляющая напряжения равна:

$$u_{Cnp} = \frac{U}{R_3 + R_{12}} R_3 = \frac{120}{80 + 16} 80 = 100 \text{ B},$$

где

$$R_{12} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 16$$
 Om

На рис. П.8.1, б приведена схема для определения характеристического уравнения

$$\frac{1}{Cp} + \frac{R_{12} \cdot R_3}{R_{12} + R_3} = \frac{1}{Cp} + R^* = 0$$

и его корня

$$p = -\frac{1}{R^*C} = -\frac{1}{13,3(3)25 \cdot 10^{-6}} = -3 \cdot 10^3 \, 1/c.$$

Следовательно, постоянная времени цепи τ и длительность переходного процесса t_{nn} , соответственно, будут равны:

$$\tau = \frac{1}{|p|} = \frac{1}{3 \cdot 10^3} = 0,3(3)10^{-3} c = 0,33 \text{ Mc}; \quad t_{\text{IIII}} \approx 5\tau \approx 1,67 \text{ Mc}.$$

С учетом найденного ранее начального условия запишем:

$$u_C(0_+) = u_{Cnp} + A = 100 + A = 60$$
 B,

откуда

A = -40 B.

Окончательно

$$u_C(t) = 100 - 40e^{-3000t}$$
 B.

Согласно второму закону Кирхгофа переходный ток $i_0(t)$ будет равен:

$$i(t) = \frac{U - u_C(t)}{R_{12}} = \frac{120 - (100 - 40e^{-3000t})}{16} = 1,25 + 2,5e^{-3000t} A.$$

Характеристики $u_C(t)$ и $i_0(t)$ приведены на рис. П.8.2, *а* и б.





Задача 2

В цепи, приведенной на рис. П.8.3, *a*, *U* = 100 В; *C* = $100 \cdot 10^{-6} \Phi$; $R_1 = 30$ Ом; $R_2 = 20$ Ом; $R_3 = 50$ Ом.

Рассчитать переходные характеристики $u_C(t)$ и $i_C(t)$ операторным методом и построить их графики.



Рис. П.8.3

Решение

Из анализа установившегося режима до коммутации имеем:

$$u_C(0_-) = \frac{U}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{100}{30 + 20} 20 = 40$$
 B,

следовательно, $u_C(0) = u_C(0_-) = 40$ В.

Эквивалентная операторная схема цепи после коммутации представлена на рис. П.8.3, б. Применив метод контурных токов, составим систему уравнений для – определения операторного изображения искомого тока $I_C(p) \rightarrow i_C(t)$:

$$(R_1 + R_2)I_{\kappa 1}(p) + R_2I_{\kappa 2}(p) = \frac{U}{p};$$

$$R_1I_{\kappa 1}(p) + (R_1 + R_3 + \frac{1}{Cp})I_{\kappa 2}(p) = -\frac{u_C(0)}{p}.$$

После подстановки всех числовых значений получаем:

$$50I_{\kappa 1}(p) + 30I_{\kappa 2}(p) = \frac{100}{p};$$

$$30I_{\kappa 1}(p) + (80 + \frac{1}{Cp})I_{\kappa 2}(p) = -\frac{40}{p}.$$

Решение контурных уравнений:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 50 + 30 \\ 30 + \left(80 + \frac{1}{Cp}\right) \end{bmatrix} = \frac{3100Cp + 50}{Cp}, \quad \Delta_2 = \begin{bmatrix} 50 + \frac{100}{p} \\ 30 - \frac{40}{p} \end{bmatrix} = -\frac{5000}{p}.$$

Операторное изображение переходного тока

$$I_2(p) = \frac{\Delta_2}{\Delta} = -\frac{5000}{p} \cdot \frac{Cp}{3100Cp + 50} = -1,61\frac{1}{p + 161,3}$$

и его оригинал тока

$$i_C(t) = i_2(t) = -1,61e^{-161,3t}$$
 A.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа операторное изображение напряжения на конденсаторе будет равно:

$$U_C(p) = I_2(p)\frac{1}{Cp} + \frac{u_C(0)}{p} = -\frac{5000C}{Cp(0,31p+50)} + \frac{40}{p} = \frac{12,4p-3000}{p(0,31p+50)} \Rightarrow -60 + 100e^{-161,3t} \text{ B}.$$



Переходные кривые $u_C(t)$ и $i_C(t)$ представлены на рис. П.8.4.

Рис. П.8.4

Содержание

Предисловие	3
Правила техники безопасности и работы в лабораториях	
кафедры «Физика и электротехника»	4
Расчетно-лабораторная работа № 1	
Схемы соединения фаз трехфазных источников энергии	7
Расчетно-лабораторная работа № 2	
Исследование трехфазной цепи по схеме «треугольник-треугольни	$\langle \rangle \rangle$
(нагрузка однородная активная)	. 19
Расчетно-лабораторная работа № 3	
Исследование трехфазной цепи по схеме «звезда-треугольник»	
(нагрузка несимметричная равномерная)	28
Расчетно-лабораторная работа № 4	
Исследование трехфазной цепи по схеме «звезда-звезда»	
(нагрузка однородная активная)	
Расчетно-лабораторная работа № 5	
Исследование трехфазной цепи по схеме «звезда–звезда»	
(нагрузка несимметричная равномерная)	45
Расчетно-лабораторная работа № 6	
Исследование несимметричных трехфазных цепей методом	
симметричных составляющих	. 54
Расчетно-лабораторная работа № 7	
Исследование переходных процессов в электрических цепях	
постоянного тока с индуктивной катушкой	62
Расчетно-лабораторная работа № 8	
Исследование переходных процессов в электрических цепях	
постоянного тока с конденсатором	72
Литература	. 80
Приложения	81

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Соленков Виталий Владимирович Козлов Андрей Владимирович Медведев Константин Михайлович

ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

ПРАКТИКУМ

Электронный аналог печатного издания

Редактор Компьютерная верстка

Н. Г. Мансурова И. П. Минина

Подписано в печать 23.11.22. Формат 60х84/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Ризография. Усл. печ. л. 7,21. Уч.-изд. л. 7,65. Изд. № 13. http://www.gstu.by

Издатель и полиграфическое исполнение Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого. Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г. пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель