

Министерство сельского хозяйства РФ

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная сельскохозяйственная академия»

# **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Методическое пособие

по выполнению курсовой работы по дисциплине  
«Теоретические основы электротехники»  
для студентов заочной формы обучения квалификации бакалавр  
направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника»

Брянск 2014

УДК 621.3(07)  
ББК 31.2  
Ш 64

Широбокова, О.Е. **Теоретические основы электротехники:** Методическое пособие для выполнения курсовой работы по ТОЭ для студентов заочного факультета квалификации бакалавр направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника». / О.Е. Широбокова, Н.М. Прыгов, Л.М. Маркарянц, А.М. Никитин. - Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2014, - 42 с.

Рецензенты: к.т.н. доцент Швачко С.И.  
к.т.н. доцент Кисель Ю.Е.,

*Рекомендовано методической комиссией факультета энергетики и природопользования протокол №3 от 8 апреля 2014 года.*

© Брянская ГСХА, 2014  
© Широбокова О.Е., 2014  
© Прыгов Н.М., 2014  
© Маркарянц Н.М., 2014  
© Никитин А.М., 2014

Брянск 2014

## **Предисловие**

Курсовая работа по теоретическим основам электротехники является для студентов-заочников завершающим этапом изучения дисциплины ТОЭ.

Целью курсовой работы является закрепление полученных в процессе обучения теоретических знаний, приобретенных практических навыков расчета и анализа трехфазных систем и переходных процессов в линейных электрических цепях постоянного тока.

Курсовая работа выполняется на отдельных листах формата А4 с соблюдением масштабов и обозначенный по ЕСКД и ГОСТ.

Законченная работа подписывается студентом и сдается им на кафедру для регистрации и проверки правильности ее выполнения. Затем проверенная работа должна быть защищена перед членами комиссии от кафедры.

Только после защиты курсовой работы студент допускается к сдаче зачета и экзамена по теоретическим основам электротехника

## 1 Требования к оформлению курсовой работы

Курсовая работа должна содержать расчётно-пояснительную записку и графический материал (векторные диаграммы).

Текстовая часть расчётно-пояснительной записки пишется на листах формата А4 (210x297 мм) в рамке, которая - согласно ГОСТу - должна иметь отступ в 20мм с левой стороны листа и по 5 мм с трёх других сторон. Все записи в расчётно-пояснительной записке ведутся аккуратным разборчивым почерком на одной стороне листа на расстоянии от верхней и нижней линии рамки не менее 10 мм, а начало и конец строк должно отстоять от боковых линий рамки не менее, чем на 3 мм. Абзацы в тексте начинают отступом в 10 – 15 мм. Текст пишется размером шрифта не менее 2.5 мм. Исправление ошибок допускается выполнять белой краской (штрихом).

Графический материал (векторные диаграммы) необходимо выполнять на отдельных листах такого же формата А4. Электрические схемы следует давать по тексту. Схемы и векторные диаграммы должны вычерчиваться с помощью чертёжных принадлежностей в соответствии с действующими требованиями Единой Системы Конструкторской Документации (ЕСКД).

В начале расчётно-пояснительной записки следует написать содержание курсовой работы и привести таблицу исходных данных в соответствии с шифром зачётной книжки.

Изложение решения задачи должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями.

Расчётные формулы первоначально записывают в общем виде символами, принятыми в ГОСТах. Каждой формуле присваивается номер, который записывается арабскими цифрами в круглых скобках на уровне формулы в крайнем правом положении. Нумерация формул разрешается как сквозной, так и по разделам (но никак не по подразделам или пунктам). Пояснения символов формулы с указанием их размерностей даются под формулой в той последовательности, в которой они приведены в формуле. Первая строка пояснения начинается с начала строки со слова «где» без двоеточия после него. Затем в формулы подставляют вместо символов соответствующие числовые значения и приводят конечный результат.

Образец выполнения титульного листа курсовой работы представлен в приложении.

Все листы расчётно-пояснительной записки должны быть пронумерованы и сброшюрованы.

В конце курсовой работы нужно привести список использованной литературы. Список литературы записывается в той последовательности, в которой даётся ссылка на литературу в тексте. Ссылки в тексте на литературу задаются в прямых скобках, например, [2] или [12,с35], если при этом указывается страница.

В конце курсовой работы нужно также поставить свою подпись и дату выполнения работы.

## 2 Содержание задания

Курсовая работа посвящена расчету и анализу трёхфазных систем и переходных процессов в линейных электрических цепях постоянного тока и содержит две задачи.

### Задача 1

К трёхфазной линии с линейным напряжением 380В подключены два симметричных приёмника. Первый приемник с активной мощностью  $P_1$  и коэффициентом мощности  $\cos\varphi_1$  подключен по схеме «звезда». Второй приемник с активной мощностью  $P_2$  и  $\cos\varphi_2$  соединен по схеме треугольник (рис. 2.1)

Для компенсации реактивной мощности подключена конденсаторная батарея по схеме «звезда» проводами сопротивлением  $R_{\phi}$ .

Необходимо определить:

Токи в проводах трехфазной линии при отключенной батарее конденсаторов.

Токи в проводах трехфазной линии при включенной батарее конденсаторов.

Емкость конденсатора в брже батареи конденсатора, при котором коэффициент мощности  $\cos\varphi=1$ .

Мощность потерь в проводниках между батареей конденсаторов и трехфазной линией.

Полную мощность, потребляемую потребителями (приёмниками).

Построить в масштабе их комплексной плоскости векторные диаграммы:

- при отключенной батарее конденсаторов
- при включенной батарее конденсаторов.

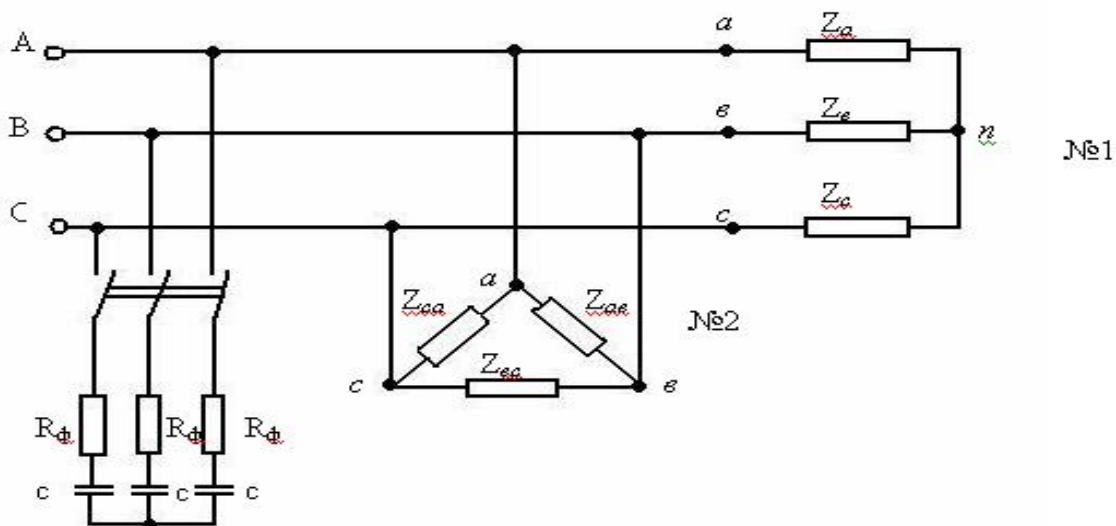


Рисунок 2.1. Схема трех фазной линии

Исходные данные для выполнения задания 1 приведены в табл. 2.1

Таблица 2.1 - Исходные данные

Вариант	$P_1, \text{кВт}$	$\cos\varphi_1$	$P_2, \text{кВт}$	$\cos\varphi_2$	$R_\phi, \text{Ом}$
1	3	0,7	10	0,5	0,1
2	4	0,75	8	0,6	0,2
3	5	0,74	6	0,6	0,3
4	6	0,76	5	0,5	0,4
5	8	0,5	6	0,5	0,5
6	10	0,56	4	0,4	0,4
7	12	0,64	3	0,4	0,3
8	14	0,68	6	0,5	0,35
9	16	0,72	5	0,6	0,34
10	18	0,78	4	0,5	0,33
11	20	0,79	12	0,6	0,3
12	22	0,8	10	0,44	0,2
13	24	0,81	14	0,45	0,25
14	26	0,82	6	0,53	0,24
15	25	0,83	20	0,42	0,23
16	23	0,84	13	0,52	0,22
17	21	0,85	15	0,39	0,21
18	19	0,86	8	0,62	0,2
19	17	0,87	10	0,65	0,19
20	15	0,88	10	0,6	0,18
21	13	0,89	12	0,35	0,17
22	11	0,48	9	0,76	0,16
23	9	0,45	8	0,82	0,15
24	7	0,54	15	0,78	0,14
25	27	0,9	18	0,48	0,12
26	30	0,9	21	0,6	0,13
27	28	0,8	26	0,7	0,12
28	32	0,7	18	0,6	0,11
29	31	0,6	19	0,8	0,1
30	29	0,5	18	0,8	0,09
31	33	0,4	17	0,86	0,08
32	36	0,6	16	0,82	0,07
33	38	0,8	14	0,67	0,06
34	40	0,7	6	0,58	0,05
35	42	0,72	10	0,7	0,4
36	44	0,6	25	0,74	0,03
37	46	0,75	28	0,62	0,02
38	48	0,74	29	0,6	0,01
39	50	0,64	40	0,8	0,005
40	52	0,65	40	0,8	0,004
41	54	0,63	42	0,7	0,003
42	56	0,61	45	0,9	0,002
43	58	0,6	35	0,8	0,001
44	8	0,5	5	0,7	0,10
45	16	0,7	7	0,6	0,15
46	11	0,49	15	0,5	0,20
47	20	0,6	10	0,45	0,1
48	17	0,5	12	0,6	0,11
49	9	0,55	6	0,7	0,12
50	30	0,75	18	0,65	0,15
0	12	0,65	5	0,45	0,07

### Задача 2

При коротком замыкании (КЗ) между проводами в линии приводится в действие отключающий механизм. Электромагнит отпускает защелку, освобождая пружину выключающего механизма тогда, когда ток отпускания, достигает значения  $I_{\text{отт}}$ . Электромагнит имеет индуктивность  $L$  и сопротивление  $R$ . Сопротивление линии равно  $R_{\text{л}}$  (рис. 2.2). Напряжение в начале линии разомкнутой на концах, равно  $U$ . Определить, через какое время после короткого замыкания придет в движение выключающий механизм. Построить кривую спада тока в обмотке электромагнита в функции времени.

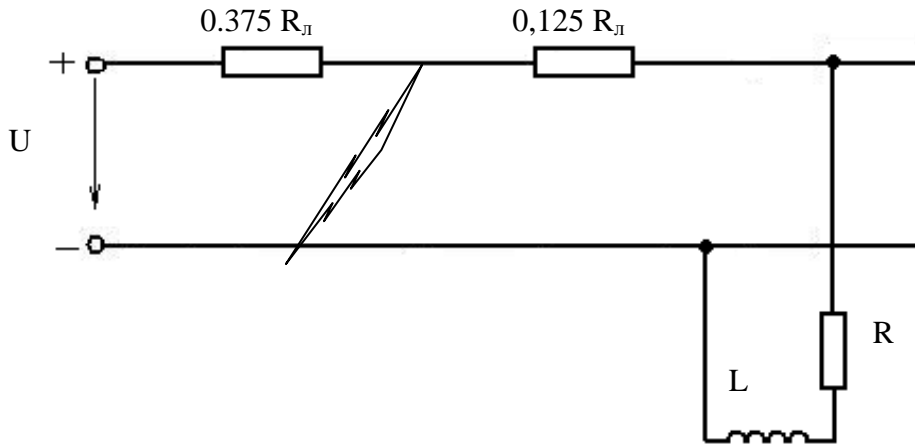


Рисунок 2.2. Исходная электрическая схема

Исходные данные для выполнения задания 2 приведены в табл. 2.2

Таблица 2.2 – Исходные данные задачи №2

Вариант	$U, В$	$I_{\text{отт}}, А$	$R, Ом$	$L, Гн$	$R_{\text{л}}, Ом$
1	2	3	4	5	6
1	12	6	0,87	1,0	0,6
2	24	10	0,7	1,0	1,2
3	12	8	0,35	0,5	0,6
4	24	12	0,2	0,5	1,2
5	12	5	0,75	1,0	1,0
6	24	6	0,6	1,0	1,6
7	12	4	0,75	1,0	1,0
8	24	10	0,2	0,6	1,6
9	12	9	0,45	0,6	0,6
10	24	6	0,4	0,8	1,6
11	25	7	0,5	0,9	1,5
12	15	5	0,3	0,8	1,2
13	10	6	0,66	0,76	1,3
14	20	8	0,8	0,75	1,0

## Продолжение таблицы 2

15	22	7	0,5	0,85	1,2
16	26	8	0,7	0,5	1,0
17	16	4	0,4	0,4	1,4
18	18	8	0,8	0,5	1,5
19	12	7	0,6	0,5	1,4
20	10	5	0,5	0,75	1,0
21	20	10	0,7	1,0	1,3
22	23	11	0,6	1,2	1,0
23	25	10	0,6	1,0	1,2
24	22	6	0,4	0,9	1,7
25	24	6	0,5	0,8	1,5
26	13	7	0,8	0,9	1,0
27	15	5	0,6	1,0	1,2
28	20	6	0,5	0,7	1,1
29	14	8	0,9	1,1	1,0
30	21	10	0,6	0,9	1,2
31	24	7	0,7	1,2	1,1
32	11	5	0,4	0,8	1,0
33	12	8	0,5	0,6	1,2
34	15	6	0,4	0,7	1,0
35	21	9	0,8	1,0	0,9
36	18	8	0,6	1,2	0,9
37	16	7	0,8	0,9	1,1
38	24	9	0,75	0,8	0,9
39	17	7	0,2	1,0	1,1
40	19	8	0,3	0,7	0,8
41	20	10	0,5	0,8	1,3
42	22	10	0,7	0,7	0,8
43	26	12	0,8	0,9	1,2
44	20	10	0,2	0,8	1,0
45	10	6	0,7	1,0	1,1
46	12	8	0,6	0,5	1,2
47	14	10	0,5	0,8	1,3
48	16	7	0,8	1,0	1,4
49	18	10	0,65	1,1	1,6
50	20	8	0,7	1,0	1,3
0	22	12	0,6	0,9	1,05



### 3 Общие сведения и понятия о трехфазных цепях

Совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют три синусоидальных ЭДС одинаковой амплитуды и частоты, но сдвинутые по фазе друг относительно друга на  $120^\circ$  (на  $2\pi/3$ ), называют трехфазной цепью.

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных электрических систем.

Важнейшей предпосылкой разработки многофазных электрических систем явилось открытие явления вращающегося магнитного поля (Г.Феррарис и Н.Тесла, 1888 г.). Первые электрические двигатели были двухфазными, но они имели невысокие рабочие характеристики. Наиболее рациональной и перспективной оказалась трехфазная система. Большой вклад в разработку трехфазных систем внес выдающийся русский ученый-электротехник М.О. Доливо - Добровольский, создавший трехфазные асинхронные двигатели, трансформаторы, предложивший трех- и четырехпроводные цепи, в связи с чем по праву считающийся основоположником трехфазных систем.

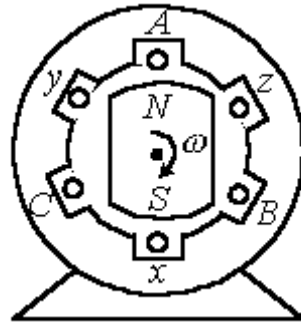


Рисунок 3.1. Общий вид трехфазного синхронного генератора

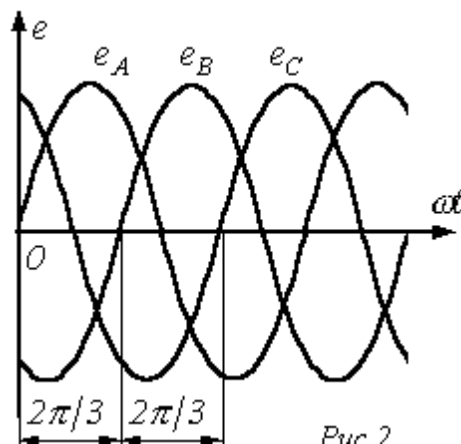


Рисунок 3.2. Временная диаграмма трехфазных ЭДС

Источником трехфазного напряжения является трехфазный генератор, на статоре которого (см. рис. 3.1) размещена трехфазная обмотка. Фазы этой обмотки располагаются таким образом, чтобы их магнитные оси были сдвинуты в пространстве друг относительно друга на  $2\pi/3$  эл. рад. На рис. 3.2 каждая фаза статора условно показана в виде одного витка. Начала обмоток принято обозначать заглавными буквами А, В, С, а концы соответственно прописными  $x, y, z$ . ЭДС в неподвижных обмотках статора индуцируются в результате пересечения их витков магнитным полем, создаваемым током обмотки возбуждения вращающегося ротора (на рис. 3.1 ротор условно изображен в виде постоянного магнита, что используется на практике при относительно небольших мощностях). При вращении ротора с равномерной скоростью в обмотках фаз статора индуцируются периодически изменяющиеся синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся вследствие пространственного сдвига друг от друга по фазе на  $2\pi/3$  рад. (см. рис. 3.3).

Трехфазные системы в настоящее время получили наибольшее распространение. На трехфазном токе работают все крупные электростанции и потребители, что связано с рядом преимуществ трехфазных цепей перед однофазными, важнейшими из которых являются:

- экономичность передачи электроэнергии на большие расстояния;
- самым надежным и экономичным, удовлетворяющим требованиям промышленного электропривода является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- возможность получения с помощью неподвижных обмоток вращающегося магнитного поля, на чем основана работа синхронного и асинхронного двигателей, а также ряда других электротехнических устройств;
- уравновешенность симметричных трехфазных систем.

Система ЭДС (напряжений, токов и т.д.) называется симметричной, если она состоит из  $m$  одинаковых по модулю векторов ЭДС (напряжений, токов и т.д.), сдвинутых по фазе друг относительно друга на одинаковый угол  $\alpha = 2\pi/m$ .

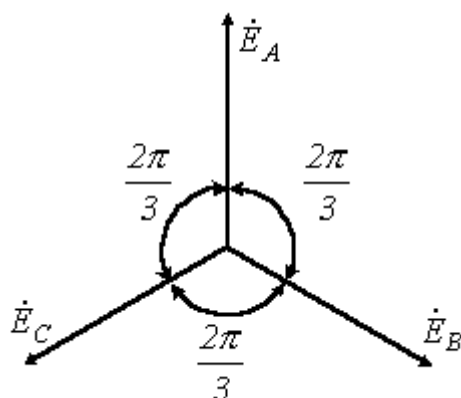


Рисунок 3.3. Векторная диаграмма симметричной трехфазной цепи

### 3.1 Схемы соединения трехфазных систем

Трехфазный генератор (трансформатор) имеет три выходные обмотки, одинаковые по числу витков, но развивающие ЭДС, сдвинутые по фазе на  $120^\circ$ . Можно было бы использовать систему, в которой фазы обмотки генератора не были бы гальванически соединены друг с другом. Это так называемая несвязная система. В этом случае каждую фазу генератора необходимо соединять с приемником двумя проводами, т.е. будет иметь место шестипроводная линия, что неэкономично. В этой связи подобные системы не получили широкого применения на практике.

Для уменьшения количества проводов в линии фазы генератора гальванически связывают между собой. Различают два вида соединений: в звезду и в треугольник. В свою очередь при соединении в звезду система может быть трех- и четырехпроводной.

### Соединение в звезду

На рис. 3.4 приведена трехфазная система при соединении фаз генератора и нагрузки в звезду. Здесь провода AA', BB' и CC' – линейные провода.

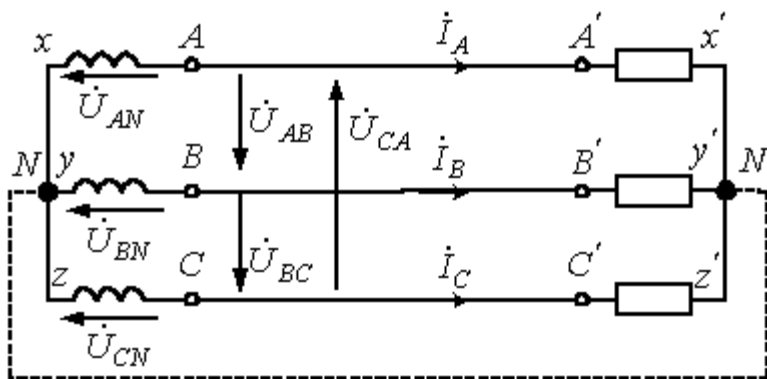


Рисунок 3.4. Трехфазная система при соединении фаз генератора и нагрузки в звезду

Линейным называется провод, соединяющий начала фаз обмотки генератора и приемника. Точка, в которой концы фаз соединяются в общий узел, называется нейтральной (на рис. 3.4 N и N' – соответственно нейтральные точки генератора и нагрузки).

Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и приемника, называется нейтральным (на рис. 3.4 показан пунктиром). Трехфазная система при соединении в звезду без нейтрального провода называется трехпроводной, с нейтральным проводом – четырехпроводной.

Все величины, относящиеся к фазам, носят название фазных переменных, к линии – линейных. Как видно из схемы на рис. 6, при соединении в звезду линейные токи  $\dot{I}_A, \dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  равны соответствующим фазным токам. При наличии нейтрального провода ток в нейтральном проводе  $\dot{I}_{N'N} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ .

Если система фазных токов симметрична, то  $\dot{I}_{N'N} = 0$ . Следовательно, если бы симметрия токов была гарантирована, то нейтральный провод был бы не нужен. Как будет показано далее, нейтральный провод обеспечивает поддержание симметрии напряжений на нагрузке при несимметрии самой нагрузки.

Поскольку напряжение на источнике противоположно направлению его ЭДС, фазные напряжения генератора (см. рис. 3.4) действуют от точек А, В и С к нейтральной точке N;  $\dot{U}_{A'N'}, \dot{U}_{B'N'}, \dot{U}_{C'N'}$  - фазные напряжения нагрузки.

Линейные напряжения действуют между линейными проводами. В соответствии со вторым законом Кирхгофа для линейных напряжений можно записать

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{BN};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN};$$

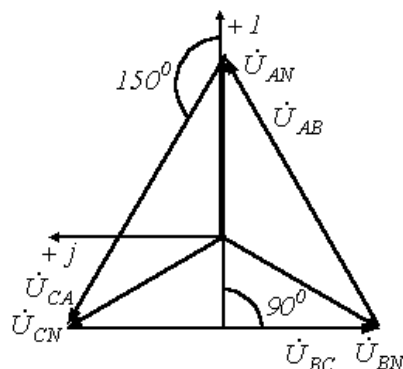


Рисунок 3.5. Векторная диаграмма для симметричной системы напряжений

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{AN}.$$

Отметим, что всегда  $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$  - как сумма напряжений по замкнутому контуру.

На рис. 3.5 представлена векторная диаграмма для симметричной системы напряжений.

$$U_l = \sqrt{3}U_\phi$$

Обычно при расчетах принимается  $\dot{U}_{AN} = U_\phi e^{j0} = U_\phi$ . Тогда для случая прямого чередования фаз  $\dot{U}_{BN} = U_\phi e^{-j120^\circ}$ ,  $\dot{U}_{CN} = U_\phi e^{-j240^\circ} = U_\phi e^{j120^\circ}$  (при обратном чередовании фаз фазовые сдвиги у  $\dot{U}_{BN}$  и  $\dot{U}_{CN}$  меняются местами). С учетом этого на основании соотношений (1)...(3) могут быть определены комплексы линейных напряжений. Однако при симметрии напряжений эти величины легко определяются непосредственно из векторной диаграммы на рис. 3.5.

Направляя вещественную ось системы координат по вектору  $\dot{U}_{AN}$  (его начальная фаза равна нулю), отсчитываем фазовые сдвиги линейных напряжений по отношению к этой оси, а их модули определяем в соответствии с (4). Так для линейных напряжений  $\dot{U}_{BC}$  и  $\dot{U}_{CA}$  получаем:

$$\dot{U}_{BC} = \sqrt{3}U_{\phi}e^{-j90^{\circ}}; \dot{U}_{CA} = \sqrt{3}U_{\phi}e^{j150^{\circ}}.$$

### Соединение в треугольник

В связи с тем, что значительная часть приемников, включаемых в трехфазные цепи, бывает несимметричной, очень важно на практике, например, в схемах с осветительными приборами, обеспечивать независимость режимов работы отдельных фаз. Кроме четырехпроводной, подобными свойствами обладают и трехпроводные цепи при соединении фаз приемника в треугольник. Но в треугольник также можно соединить и фазы генератора (см. рис. 3.6).

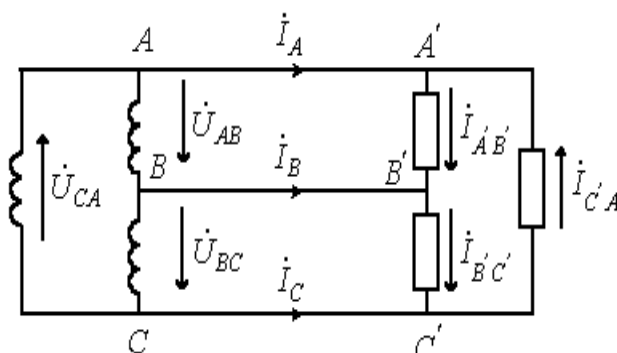


Рисунок 3.6. Схема соединения фаз приемника и генератора «треугольником»

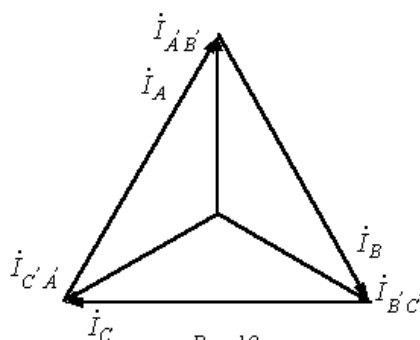


Рисунок 3.7. Векторная диаграмма симметричной системы линейных и фазных токов

Для симметричной системы ЭДС имеем

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Таким образом, при отсутствии нагрузки в фазах генератора в схеме на рис. 3.6 токи будут равны нулю. Однако, если поменять местами начало и конец любой из фаз, то  $\sum \dot{E} \neq 0$  и в треугольнике будет протекать ток короткого замыкания. Следовательно, для треугольника нужно строго соблюдать порядок соединения фаз: начало одной фазы соединяется с концом другой.

Схема соединения фаз генератора и приемника в треугольник представлена на рис. 3.6.

Очевидно, что при соединении в треугольник линейные напряжения равны соответствующим фазным. По первому закону Кирхгофа связь между линейными и фазными токами приемника определяется соотношениями

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'}.\end{aligned}$$

Аналогично можно выразить линейные токи через фазные токи генератора.

На рис. 3.7 представлена векторная диаграмма симметричной системы линейных и фазных токов. Ее анализ показывает, что при симметрии токов

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi.$$

В заключение отметим, что помимо рассмотренных соединений «звезда - звезда» и «треугольник - треугольник» на практике также применяются схемы «звезда - треугольник» и «треугольник - звезда».

### 3.2 Мощность в трехфазных цепях

Мгновенная мощность трехфазного источника энергии равна сумме мгновенных мощностей его фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C.$$

Активная мощность генератора, определяемая как среднее за период значение мгновенной мощности, равна

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

Соответственно активная мощность трехфазного приемника с учетом потерь в сопротивлении нейтрального провода

$$P = P_a + P_b + P_c + P_N,$$

Реактивная  $Q = Q_a + Q_b + Q_c + Q_N$

Полная  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ .

Суммарная активная мощность симметричной трехфазной системы

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$$

Учитывая, что в симметричном режиме для звезды имеют место соотношения

$$U_n = \sqrt{3}U_{\phi}; \quad \dot{I}_n = \dot{I}_{\phi}$$

и для треугольника -

$$\dot{U}_n = \dot{U}_{\phi}; \quad I_n = \sqrt{3}I_{\phi}$$

на основании (1) для обоих способов соединения фаз получаем

$$P = \sqrt{3}U_n I_n \cos \varphi,$$

где  $\cos \varphi$  - угол сдвига между фазными напряжением и током.

Аналогично

$$Q = \sqrt{3}U_n I_n \sin \varphi;$$

$$S = \sqrt{3}U_n I_n.$$

## 4 Переходные процессы в линейных электрических цепях

### 4.1 Основные сведения о расчёте переходных процессов электрических цепей

Переходные процессы возникают в электрических цепях при переходе от одного установившегося режима работы к другому установившемуся режиму (рис.1). Смена режимов происходит в результате коммутаций (включение, выключение, переключение, изменение параметров цепи и др.).

Переходной процесс протекает в течение определенного времени, которое зависит от запасов энергии в реактивных элементах цепи. Продолжительность переходного процесса может быть весьма незначительной, от долей секунды до долей микросекунды. При этом токи и напряжения в переходных процессах могут существенно превышать токи и напряжения в стационарных режимах, что может привести к разрушению различных элементов электрических и электронных схем.

В то же время при разумном ограничении напряжений и токов при переходных процессах их можно использовать для формирования различных электрических сигналов. Поэтому расчет переходных режимов в электрических цепях является очень важным для решения проблемы повышения надежности различных электрических и электронных устройств.

Момент внезапного изменения режима работы электрической цепи принимают за начальный (нулевой) момент времени, относительно которого характеризуют состояние цепи и описывают сам переходной процесс. Переходные токи, напряжения, ЭДС и другие значения обозначают малыми буквами, а их конкретные значения отмечают моментом времени, предшествующим изменению режима. Например, ток в момент времени, предшествующий изменению режима работы цепи, обозначают  $i(0_-)$ , в первый момент времени после изменения режима -  $i(0_+)$ , а в заданный момент времени  $t$  -  $i(t)$ . Установившееся значение тока, равное после завершения переходного процесса  $I_2$ , обозначают  $i(\infty) = I_2$ .

Для переходного процесса, рассматриваемого на рис. 4.1, имеем

$$i(0_-) = i(0_+) = I_1; \quad i(\infty) = I_2.$$

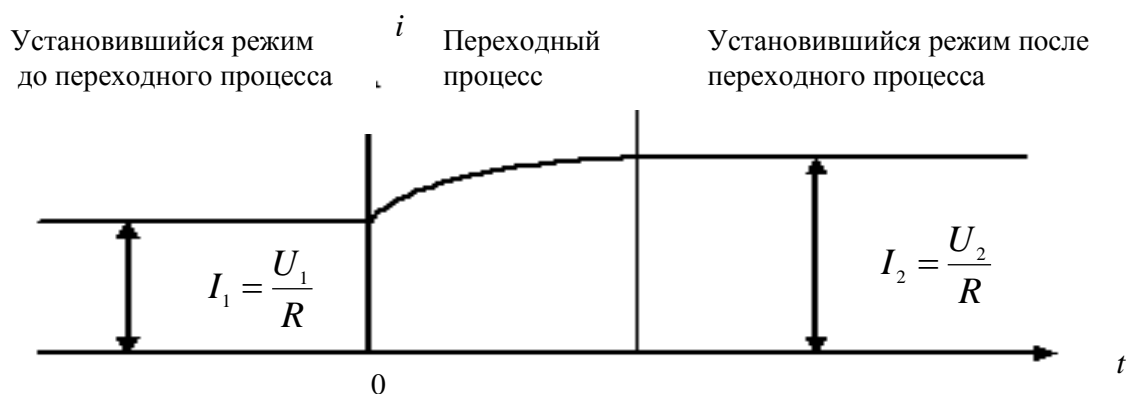


Рисунок 4.1. Временные изменения тока в цепи при переходном процессе

Переходный процесс базируется на двух законах коммутации.

**Первый закон.** В любой ветви с индуктивностью ток и магнитный поток в момент коммутации сохраняют те значения, которые они имели непосредственно перед коммутацией, а дальше начинает изменяться именно с этих значений, т.е.

$$i(0_-) = i(0_+) \text{ и } \Phi(0_-) = \Phi(0_+).$$

**Второй закон.** В любой ветви с конденсатором напряжение и заряд сохраняют в момент коммутации те значения, которые они имели непосредственно перед коммутацией, и в дальнейшем изменяются, начиная именно с этих значений, т.е.

$$u(0_-) = u(0_+) \text{ и } Q(0_-) = Q(0_+).$$



В цепях с индуктивностью или емкостью переходной процесс можно рассматривать как результат наложения двух процессов – принужденного и свободного. Ток и напряжение в цепи в течение переходного процесса можно представить в виде суммы принужденных и свободных значений токов и напряжений, т.е.

$$i_{\text{пер}}(t) = i_{\text{прин}}(t) + i_{\text{св}}(t).$$

Для расчета и анализа переходных процессов в электрических цепях применяются следующие методы: классический; операторный; частотный (спектральный); с помощью интеграла Дюамеля; переменных состояний.

Классический метод заключается в решении дифференциальных уравнений цепи, составленных по первому и второму законам Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений. Решение состоит в определении: корней характеристического уравнения, свободных составляющих переходного процесса, постоянных интегрирования и, наконец, переходных токов и напряжений.

Особенность классического метода состоит в том, при решении задачи имеют дело с реальными величинами и с реальным временем. Результаты расчета обычно иллюстрируют графиками. Однако эти расчеты сложны и требуют применения вычислительной техники.

Операторный метод состоит в том, что реальная функция времени, называемая оригиналом, заменяется другой функцией - изображением. Эта замена осуществляется с помощью прямых преобразований Лапласа и Карсона-Хевисайда.

Изображение является функцией не времени  $t$ , а комплексной переменной или оператора  $p$ . Его невозможно представить графически. Это означает, что расчет операторным методом проводится не в реальном масштабе времени. Однако данный недостаток компенсируется тем преимуществом перед классическим методом, что операции дифференцирования и интегрирования по времени сводятся к простым алгебраическим операциям умножения и деления. В результате решения системы уравнений получается изображение искомой функции, от которого переходят к ее оригиналу. Благодаря этим преимуществам операторный метод широко применяется в инженерных расчетах.

Частотный (спектральный) метод расчета очень похож по сути на операторный метод. Преимущество его по сравнению с операторным методом состоит в том, что при приближенных расчетах можно использовать экспериментальные характеристики входных сопротивлений или проводимости цепи.

Частотный метод широко используется для анализа и синтеза линейных систем автоматического регулирования (САР) для оценки качества переходных процессов в системе (устойчивость, быстродействие, перерегулирования, запаздывание по фазе и др.).

Частотный метод основан на использовании преобразования Фурье. В уравнении Фурье при этом используется только мнимая часть комплексной частоты или оператора  $p = \delta + j\omega_0$ , т.е.  $p = j\omega_0$  ( $\delta = 0$ ).

Расчет переходных процессов с помощью интеграла Дюамеля целесообразно применять только при нулевых начальных условиях, если напряжение на

входе пассивного двухполюсника изменяется по сложному закону, включая разрывы. Суть метода заключается в том, что переходный ток определяется в результате действия токов от бесконечно малых импульсов входного напряжения.

Метод переменных состояния целесообразно применять в сложных цепях, которые описываются дифференциальными уравнениями  $n$ -го порядка. При этом уравнения  $n$ -го порядка заменяются  $n$  уравнениями первого порядка.

При этом под переменными состояния понимают токи в индуктивностях и напряжения на емкостях, так как через них можно определить любые другие напряжения и токи в цепи.

Совокупность дифференциальных уравнений для первых производных переменных состояния цепи обычно называют уравнениями состояния. Решение системы дифференциальных уравнений состояния электрических цепей можно выполнять аналитическими или численными методами.

## 4.2 Классический метод расчета переходных процессов

Рассматриваемый метод относится к линейным цепям с сосредоточенными параметрами. Расчет переходных процессов классическим методом сводится к выполнению следующих операций:

1. На схеме цепи после коммутации указывают положительные направления токов в ветвях.

2. Составляют дифференциальные уравнения для мгновенных значений токов и напряжений по законам Кирхгофа для переходного режима.

Так как падение напряжения на активном сопротивлении  $R$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$  определяют по формулам:  $u_R = i \cdot R$  ;  $u_L = L \frac{di}{dt}$  и

$u_C = \frac{1}{C} \int i \cdot dt$  , то по законам Кирхгофа будет составлена система интегрально-дифференциальных уравнений заданной цепи.

3. Полученную систему уравнений решают относительно искомой функции (тока или напряжения). В результате получают неоднородное линейное дифференциальное уравнение, порядок которого равен числу независимых мест накопления энергии. В случае двух независимых мест накопления в схеме линейное дифференциальное уравнение имеет вид

$$a \frac{d^2 t}{dt^2} + b \frac{di}{dt} + ci = f(u) ,$$

где  $a, b, c$  - коэффициенты, зависящие от параметров цепи;

$f(u)$  - неоднородный член уравнения, зависящий от величины и формы приложенного к цепи напряжения.

4. Решают неоднородное линейное дифференциальное уравнение, в результате чего находят искомый ток или напряжение переходного процесса.

Решение дифференциального уравнения складывается из общего решения однородной части этого уравнения (правая часть равна нулю) и частного решения неоднородного уравнения, определяемого видом  $f(u)$ .

Частное решение выражает принужденный режим, задаваемый источниками энергии, а общее решение - свободный режим. Таким образом, ток переходного процесса равен  $i = i_{np} + i_{ce}$ , а напряжение  $u = u_{np} + u_{ce}$ .

5. Находят принужденную составляющую путем расчета цепи после коммутации.

6. Записывается характеристическое уравнение цепи типа  $ap^2 + bp + c = 0$  и определяются его корни.

7. Находят свободную составляющую, которая зависит от характера цепи, т.е. определяется видом корней характеристического уравнения  $p_k$ .

Общее решение для свободной составляющей ищут в виде

$$i_{ce} = A_K \cdot e^{p_K \cdot t},$$

где  $A_K$  - постоянная интегрированная;

$p_K$  - корни характеристического уравнения.

При этом, если:

а) корни вещественные, отрицательные и разные ( $p_1 < 0; p_2 < 0$ ), переходной режим будет аperiodическим и свободная составляющая тока запишется в виде

$$i_{ce} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

б) корни характеристического уравнения комплексные и сопряженные ( $p_1 = -\delta + j\omega_0; p_2 = -\delta - j\omega_0$ ), то в цепи будет периодический (колебательный) режим и свободная составляющая тока выражается зависимостью

$$i_{ce} = A e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 t + \gamma),$$

где  $\delta$  - коэффициент затухания переходного режима;

$\omega_0$  - угловая частота свободных колебаний тока (напряжения);

$\gamma$  - начальная фаза переходного тока (напряжения).

в) корни характеристического уравнения равные, отрицательные ( $p_1 = p_2 = p < 0$ ), то свободная составляющая определяется

$$i_{ce} = (A_1 + A_2 t) e^{pt}.$$

8. Определяют постоянные интегрирования  $A_1; A_2$  и угол  $\gamma$  по начальным условиям, исходя из законов коммутации в момент времени  $t=0$ . Для этого сначала определяют начальные значения тока на участках цепи с индуктивностью и напряжения на участках с емкостью

$$i(0_-) = i(0) = i(0_+);$$

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

Подставляя эти значения в исходные дифференциальные уравнения при  $t = 0$ , определяют начальные значения токов в остальных ветвях.

Производная от тока в индуктивности находится непосредственно из уравнения, написанного для контура, в который входит ветвь с индуктивностью.

Производные от токов в других ветвях схемы определяются из уравнения, в котором нет ветви с индуктивностью после его дифференцирования и перехода к  $t = 0$ . При этом напряжение на конденсаторе нужно писать в форме интеграла

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt,$$

что дает  $\frac{du_C}{dt} = \frac{i_C(0)}{C}$ .

В некоторых случаях нужно использовать и первый закон Кирхгофа для производных токов  $\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt}$ .

Если характеристическое уравнение представляет собой уравнение первого порядка, то  $i_{cs} = Ae^{pt}$  и тогда  $A = i_{cs}(0_+)$ .

Если характеристическое уравнение второго порядка, то

$$A_1 = \frac{i'_{cs}(0_+) - p_2 \cdot i_{cs}(0_+)}{p_1 - p_2};$$

$i_{cs} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$  и тогда  $A_2 = i_{cs}(0_+) - A_1$ .

Если корни характеристического уравнения комплексные и сопряженные, то  $i_{cs} = Ae^{-\delta} \cdot \sin(\omega_0 t - \gamma)$ , тогда значения  $A$  и  $\gamma$  находят из совместного решения двух уравнений

$$\begin{cases} i_{cs}(0_+) = A \sin \gamma; \\ i'_{cs}(0_+) = -A \delta \sin \gamma + A \omega_0 \cos \gamma. \end{cases}$$

9. Характеристическое уравнение находится из входного сопротивления схемы в операторной форме.

### 4.3 Операторный метод расчета переходных процессов

В операторном методе функцию вещественного переменного времени  $t$ , называемую оригиналом, заменяют соответствующей функцией комплексного переменного, зависящей от оператора  $p$  и называемой изображением.

В этом методе действия дифференцирования и интегрирования данной функции – оригинала заменены более простыми алгебраическими действиями над изображением этой функции.

При этом дифференциальные уравнения для оригиналов электрических величин тока и напряжения преобразуются в более простые алгебраические уравнения для изображений тех же величин.

В простейших случаях при составлении алгебраических уравнений, в которые входят изображения искомых функций, операция дифференцирования оригинала может быть заменена умножением изображения искомой функции на оператор  $p$ .

В результате решения полученной системы алгебраических уравнений находят изображения искомых электрических величин (токов и напряжений). Путем обратного преобразований полученных изображений находят соответствующие им оригиналы, т.е. искомые функции времени.

В этом методе отпадает необходимость определять постоянные интегрирования по начальным условиям, так как начальные условия учитываются при составлении алгебраических уравнений для изображений искомых электрических величин.

Для преобразования заданной функции  $f(t)$  - оригинала в соответствующую функцию  $F(p)$  - изображение можно применить прямое преобразование Лапласа

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt \quad \text{или} \quad F(p) \doteq f(p) ,$$

где  $p$  - комплексная переменная или оператор  $p = \delta + j\omega_0$ ,

где  $\delta$  - вещественная часть оператора, характеризует затухание переходного процесса;

$\omega_0$  - мнимая часть того же оператора, характеризует угловую частоту свободных колебаний.

Прямое преобразование Лапласа условно обозначают

$$F(p) \doteq L[f(t)].$$

Переход от изображения  $F(p)$  к оригиналу  $f(t)$  может быть осуществлен при помощи обратного преобразования Лапласа

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} F(p)e^{pt} dt \quad \text{или сокращенно} \quad f(t) = L^{-1}[F(p)] .$$

Постоянное напряжение  $U$  будет записываться в операторной форме как  $\frac{U}{p}$ , т.е.

$$U(p) = \frac{U}{p} .$$

Изображение гармонического напряжения  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi)$  будет

$$u(p) = U_m \cdot \frac{p \sin \psi + \omega \cos \psi}{p^2 + \omega^2} .$$

Пользуясь комплексными числами, гармоническое напряжение  $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$  можно представить как мнимую часть полного комплекса

$$U_m e^{j(\omega t + \psi)}, \text{ т. е. } u = \text{Im}[U_m e^{j(\omega t + \psi)}].$$

В этом случае изображение гармонического напряжения значительно упрощается и имеет вид  $u(p) = \frac{U_m e^{j\psi}}{p - j\omega}$ .

Операторные сопротивления цепей записываются так же, как и сопротивления для тех же цепей в комплексной форме, в которых  $j\omega$  заменено на  $p$ . Так для цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов  $R, L$  и  $C$ , операторное сопротивление  $Z(p) = R + pL + \frac{1}{Cp}$ .

Напряжения на сопротивлении, индуктивности и емкости в операторной форме имеют вид:

$$\begin{aligned} u_R(p) &= R \cdot I(p); \\ u_L(p) &= pLI(p) - Li(0); \\ u_C(p) &= \frac{I(p)}{Cp} + \frac{u_C(0)}{p}, \end{aligned}$$

где  $i(0)$  и  $u_C(0)$  - начальные значения тока в индуктивности и напряжения на емкости.

Уравнения для изображений тока и напряжения любой цепи могут быть получены по законам Ома и Кирхгофа, написанных для операторных схем замещения.

$$\text{Закон Ома в операторной форме - } I(p) = \frac{E(p) + Li(0) - \frac{u_C(0)}{p}}{Z(p)};$$

Закон Кирхгофа в операторной форме

$$\begin{aligned} \sum_1^n I_K(p) &= 0; \\ \sum_1^n I_K(p) \cdot Z(p) &= \sum_1^n \left[ E_K(p) + L_K i_K(0) - \frac{u_{CK}(0)}{p} \right]. \end{aligned}$$

Полученную систему уравнений в операторной форме решают относительно изображения искомого тока или напряжения. В общем случае выражения для тока в любой ветви в операторной форме имеет вид

$$I(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)},$$

где  $F_1(p)$  и  $F_2(p)$  - алгебраические многочлены степени которых соответственно  $m$  и  $n$ , причем  $m < n$ .

Переход от изображения к оригиналу осуществляется при помощи теоремы разложения

$$i(t) = \sum_1^n \frac{F_1(p_K)}{F_2'(p_K)} \cdot e^{p_K t},$$

где  $p_K$  - корни уравнения  $F_2(p) = 0$ ;

$n$  - число корней;

$F_1(p_K)$  - значение функции  $F_1(p)$  при  $p = p_K$ ;

$F_2'(p_K)$  - значение производной функции  $F_2(p)$  при  $p = p_K$ .

При подключении источника постоянного или гармонического напряжения к пассивной цепи с входным операторным сопротивлением  $Z(p)$  на основании теоремы разложения получены простые расчетные формулы, называемые формулами включения

$$i(t) = \frac{U}{Z(0)} + \sum \frac{U}{p_K Z'(p_K)} \cdot e^{p_K t},$$

где  $p_K$  - корни уравнения  $Z(p) = 0$ .

При включении цепи на синусоидальные напряжения  $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$  величина тока

$$i(t) = Jm \left[ \frac{U_m e^{(j\omega t + \psi)}}{Z(j\omega)} + \sum \frac{U_m e^{j\psi}}{(p_K + j\omega) \cdot Z'(p_K)} \cdot e^{p_K t} \right],$$

где  $U_m$  - амплитуда приложенного напряжения;

$\psi$  - начальная фаза приложенного напряжения;

$Z(j\omega)$  - полное сопротивление в комплексной форме;

$Z'(p_K)$  - производная операторного сопротивления при  $p = p_K$ .

Знак  $Jm$  означает, что от полученного комплексного уравнения берется коэффициент при мнимой части.

При расчете переходных процессов операторным методом в электротехнике часто применяют также прямое преобразование Карсона-Хевисайда, которое записывается

$$F(p) = p \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt.$$

В преобразовании Карсона-Хевисайда в отличие от преобразования Лапласа перед интегралом имеется множитель  $p$ . Это дает возможность иметь одну и ту же размерность для оригинала и изображения, а изображение постоянной равно самой постоянной, т.е.  $U(p) = U$ .

## 5 Пример выполнения курсовой работы

### Задача 1

К трехфазной линии с линейным напряжением  $U_{л}=380\text{В}$  подключены два приемника с симметричной нагрузкой. Один из них соединен по схеме «звезда» с активной нагрузкой  $P_1=18\text{ кВт}$  при коэффициенте мощности  $\cos\varphi_1=0,78$ , а другой – «треугольником» с активной мощностью  $P_2=4\text{ кВт}$  при коэффициенте мощности  $\cos\varphi_2=0,5$ .

Для повышения коэффициента мощности электроприемников до единицы к этой линии подключена батарея конденсаторов, соединенных в «звезду». Сопротивление соединительных проводов между батареей конденсаторов и трехфазной линией равно  $R_{\phi}=0,5\text{ Ом}$  (Рис. 5.1).

Требуется определить:

- Токи в проводах трехфазной линии при отключенной и включенной батарее конденсаторов.
- Реактивную мощность в фазе батареи конденсаторов, необходимую для повышения коэффициента мощности электроустановки до единицы.
- Емкость в фазе батареи конденсаторов и ток в каждой фазе.
- Мощность потерь в соединительных проводах между батареей конденсаторов и трехфазной линией.
- Построить векторные диаграммы токов и напряжений без батареи конденсаторов.
- Построить векторную диаграмму токов и напряжений с включенной батареей конденсаторов.

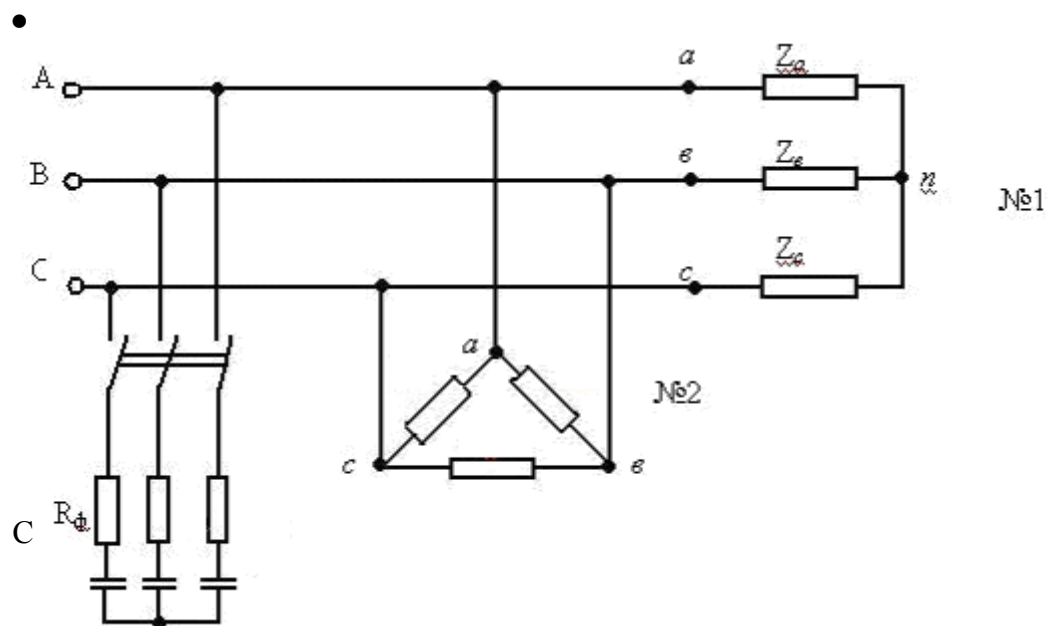


Рисунок 5.1. Исходная схема электрической цепи



**Расчет токов в линии без батареи конденсаторов (рис. 5.2).**

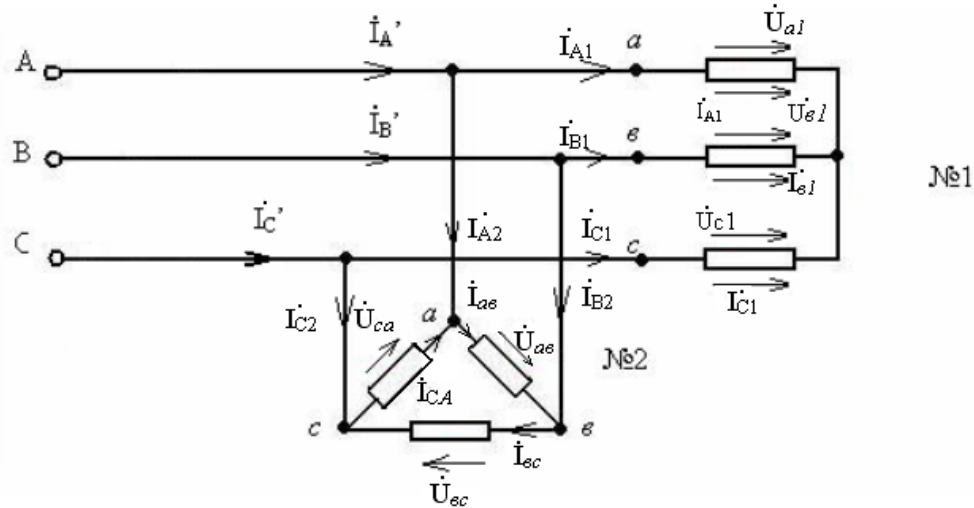


Рисунок 5.2. Расчетная схема

**Фазные токи приемников**

$$I_{\phi 1} = \frac{P_1}{3 \cdot U_{\phi 1} \cdot \cos \varphi_1} = \frac{18 \cdot 10^3}{3 \cdot \frac{380}{\sqrt{2}} \cdot 0.78} = 35 \text{ A}$$

где  $U_{\phi 1}$  - фазные напряжения приемника №1

$$U_{\phi 1} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$$

$$I_{\phi 2} = \frac{P_2}{3 \cdot U_{\phi 2} \cdot \cos \varphi_2} = \frac{4 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0.5} = 8.8 \text{ А}$$

где  $U_{\phi 2}$  - фазные напряжения приемника №2

$U_{\phi 2} = U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ , т.к. обмотки приемника №2 соединены по схеме «треугольник».

## Комплексные значения фазных напряжений и токов при симметричной нагрузке

Приемник №1 ( $\varphi_1 \cong 38,4^\circ$ )

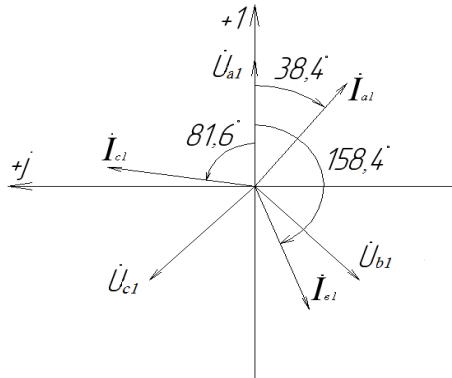


Рисунок 5.3. Векторная диаграмма токов и напряжений приемника №1

- фазные напряжения

$$\dot{U}_{a1} = U_{\varphi 1} * e^{j0^\circ} = 220\text{В};$$

$$\dot{U}_{b1} = U_{\varphi 1} * e^{-j120^\circ} = (-110 - j190,5)\text{В};$$

$$\dot{U}_{c1} = U_{\varphi 1} * e^{j120^\circ} = (-110 + j190,5)\text{В}.$$

- фазные токи

$$\dot{I}_{a1} = I_{\varphi 1} * e^{-j38,4^\circ} = 93 * e^{-j38,4^\circ} = (-27,3 - j21,7)\text{А};$$

$$\dot{I}_{b1} = I_{\varphi 1} * e^{-j158,4^\circ} = 93 * e^{-j158,4^\circ} = (-32,5 - j12,8)\text{А};$$

$$\dot{I}_{c1} = I_{\varphi 1} * e^{j81,6^\circ} = 93 * e^{j81,6^\circ} = (5,1 + j34,6)\text{А}.$$

Векторные диаграммы фазных напряжений и токов приемника №1 приведены на рис. 5.3

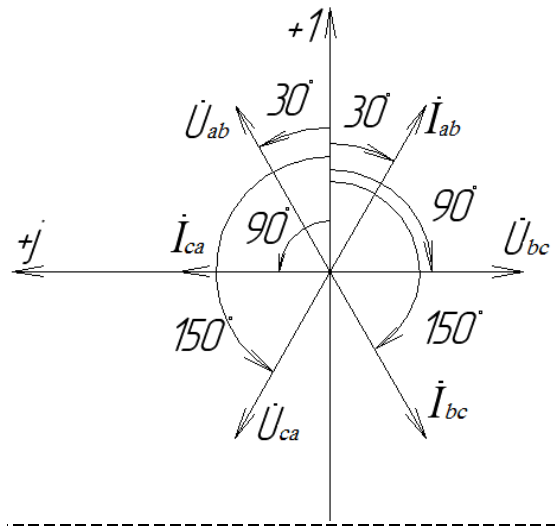
Приемник №2 ( $\varphi_2=60^\circ$ )

Рисунок 5.4. Векторная диаграмма токов и напряжений приемника №2

- фазные напряжения

$$\dot{U}_{ab} = U_{\varphi 2} * e^{j30^\circ} = 380 * e^{j30^\circ} = (329 + j190) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{bc} = U_{\varphi 2} * e^{-j90^\circ} = -j380 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{ca} = U_{\varphi 2} * e^{j150^\circ} = 380 * e^{j150^\circ} = (329 + j190) \text{ В}.$$

- фазные токи

$$\dot{I}_{ab} = I_{\varphi 2} * e^{-j30^\circ} = 8,8 e^{-j30^\circ} = (7,6 - j4,4) \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc} = I_{\varphi 2} * e^{-j150^\circ} = 8,8 e^{-j150^\circ} = (-7,6 - j4,4) \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ca} = I_{\varphi 2} * e^{j90^\circ} = 8,8 e^{j90^\circ} = j8,8 \text{ А}.$$

Векторные диаграммы напряжений и токов приёмника №2 приведены на рис. 5.4

## Токи в подводящих линиях электропередач

## К приемнику №1

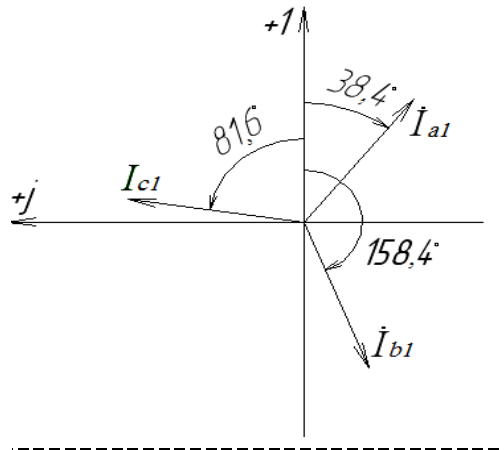


Рисунок 5.5. Векторная диаграмма токов приемника №1

$$\dot{I}_{a1} = I_{a1} = 35 * e^{-j39^\circ} = (27.3 - j21.7) \text{ A};$$

$$\dot{I}_{b1} = I_{b1} = 35 * e^{-j158.4^\circ} = (-32.5 - j12.8) \text{ A};$$

$$\dot{I}_{c1} = I_{c1} = 35 * e^{-j81.6^\circ} = (5.1 + j12.8) \text{ A}.$$

Векторная диаграмма токов в проводящих линиях к приемнику №1 представлена на рис. 5.5

## К приемнику №2

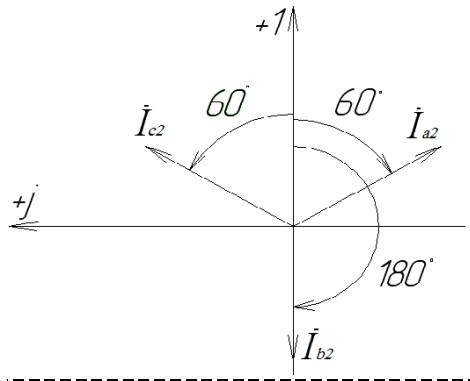


Рисунок 5.6. Векторная диаграмма токов приемника №2

Линейные токи приемника №2, соединенных по схеме «треугольник», определяем через фазные токи по уравнениям Кирхгофа для узлов а, в и с.

$$\dot{I}_{a2} = \dot{I}_{ав} - \dot{I}_{са} = (7.6 - j4.4) - j8.8 = (7.6 - j13.2) = 15.2 e^{j120^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}_{b2} = \dot{I}_{вс} - \dot{I}_{аб} = (-7.6 - j4.4) - (7.6 - j4.4) = (-15.2) \text{ A}$$

$$\dot{I}_{c2} = \dot{I}_{са} - \dot{I}_{вс} = j8.8 - (-7.6 - j4.4) = (7.6 + j13.2) = 15.2 e^{j60^\circ} \text{ A}$$

Векторная диаграмма этих токов в проводящих проводах к приемнику №2 представлена на рис. 5.6.

## Расчет главных токов без батареи конденсаторов

Согласно первому закону Кирхгофа линейный ток главной ветви при отсутствии батареи конденсаторов равен сумме линейных токов приемников №1 и №2, т.е.

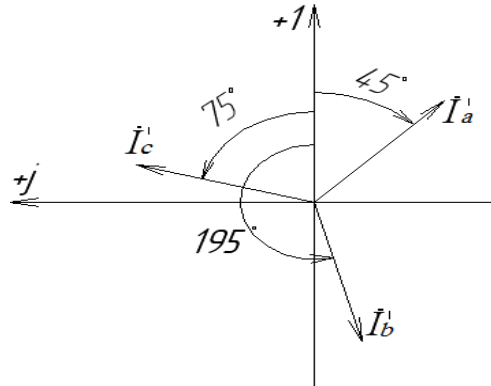


Рисунок 5.7. Векторная диаграмма токов

$$\dot{I}'_A = \dot{I}'_{A1} + \dot{I}'_{A2} = (27,3 - j21,7) + (7,6 - j13,2) = (34,9 - j34,9) = 49,5 e^{-j45^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}'_B = \dot{I}'_{B1} + \dot{I}'_{B2} = (-32,5 - j12,8) + (-15,2) = (-47,7 - j12,8) = 49,5 e^{-j195^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}'_C = \dot{I}'_{C1} + \dot{I}'_{C2} = (5,1 + j34,6) + (7,6 + j13,2) = (12,7 + j47,8) = 49,5 e^{j75^\circ} \text{ A}$$

Векторная диаграмма токов представлена на рис. 5.7

## Параметры компенсирующей батареи конденсаторов

Реактивная мощность приемников

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \varphi_1 = P_1 * \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1}}{\cos \varphi_1} = 18 * 103 * \frac{\sqrt{1 - 0,78^2}}{0,78} = 14411 \text{ вар.}$$

$$Q_2 = P_2 \operatorname{tg} \varphi_2 = P_2 * \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}}{\cos \varphi_2} = 4 * 103 * \frac{\sqrt{1 - 0,5^2}}{0,5} = 6928 \text{ вар.}$$

Суммарная реактивная мощность приемников

$$Q = Q_1 + Q_2 = 14411 + 6928 = 21339 \text{ вар}$$

Реактивная мощность одной фазы приемника

$$Q_\phi = Q/3 = 21339/3 = 7113 \text{ вар}$$

Емкость одной фазы батареи конденсаторов

$$C = \frac{Q_\phi}{U_\phi^2 * \omega} = \frac{7113}{22^2 * 314} = 0,000468 \Phi = 468 \text{ мк}\Phi$$

Комплекс сопротивления одной фазы конденсаторов

$$Z_\phi = R_\phi - jX_c = 0,15 - j \frac{1}{\omega c} = 0,15 - j \frac{1}{314 \cdot 468 \cdot 10^{-6}} = 0,15 - j6,8 = 6,8e^{-89^\circ} \text{ Ом},$$

где  $\omega$ -угловая частота, с-1

$$\omega = 2\pi f = 6,28 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}$$

Токи в каждой фазе конденсаторной батареи (рис. 5.8)

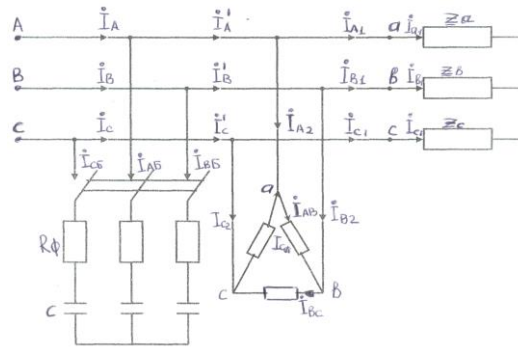


Рисунок 5.8. Расчетная схема

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_A}{Z_\phi} = \frac{220}{6,8e^{-j89^\circ}} = 32,3e^{j89^\circ} = (0,56 + j34,3)_A$$

$$\dot{I}_{BB} = \frac{\dot{U}_B}{Z_\phi} = \frac{220}{6,8e^{-j89^\circ}} = 32,3e^{j31^\circ} = (27,67 - j16,67)_A$$

$$\dot{I}_{\tilde{N}A} = \frac{U_C}{Z_\phi} = \frac{220e^{j120^\circ}}{6,8e^{-j89^\circ}} = 32,3e^{j209^\circ} = (-28,2 - j15,66)$$

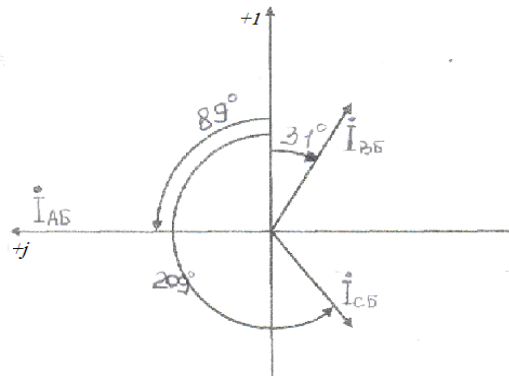


Рисунок 5.9 – Векторная диаграмма токов

Векторная диаграмма токов батареи конденсаторов приведена на рис. 5.9.

Главные токи в трехфазной сети при включении батареи конденсаторов (рис. 5.10)

$$\dot{I}_A = \dot{I}'_A + \dot{I}_{AB} = (34,9 - j34,9) + (0,56 + j34,3) = (35,46 - j0,6) \cong 36e^{j0,9^\circ} \approx 36A$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}'_B + \dot{I}_{BB} = (-47,7 - j312,8) + (27,67 - j16,67) = (-20,03 - j24,47) \cong 36e^{j240^\circ} = 36e^{-j120^\circ} A$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}'_C + \dot{I}_{CB} = (12,7 + j47,8) + (-28,2 - j15,66) = (-15,5 + j32,14) \cong 36e^{j120^\circ} A$$

Векторная диаграмма главных токов и напряжений показана на рис. 5.10.

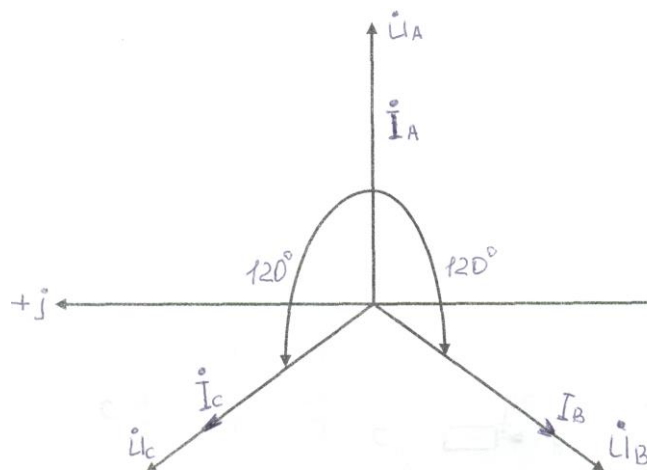


Рисунок 5.10. Векторная диаграмма токов и напряжений

Векторные диаграммы токов и напряжений при отключенной и выключенной батареях представлены на рис. 5.11 и рис. 5.12.







**Задача 2**

Выключающийся механизм приводится в действие при коротком замыкании между проводами в линии. Электромагнит отпускает защелку механизма, освобождая пружину выключающего механизма. Защелка отходит тогда, когда ток достигает значения  $I_{отп}=7\text{А}$ . Обмотка электромагнита обладает сопротивлением  $R=0,8\text{ Ом}$  и индуктивностью  $L=0,9\text{ Гн}$ . Общее сопротивление проводов линии  $0,5 R_{л}$ ; Общее сопротивление проводов, остающихся в закороченной части линии составляет  $0,125 R_{л}$ . Напряжение между проводами в начале линии равно  $U=16\text{ В}$ . На конце линии разомкнута (рис. 5.13)

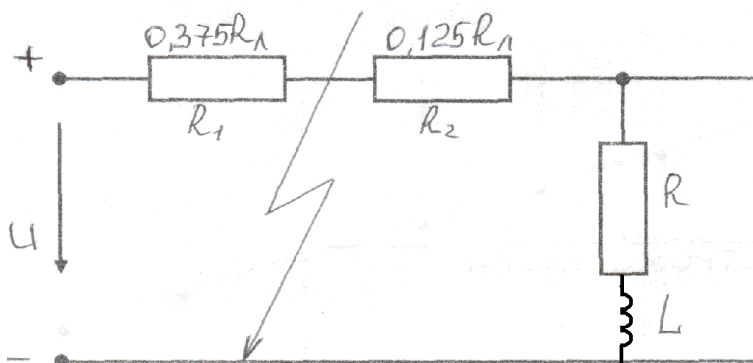


Рисунок 5.13. Исходная схема

Сопротивление линии  $R_{л}=1,1\text{ Ом}$

Решение:

Чертим эквивалентную схему замещения цепи в переходном режиме и указываем её параметры (рис.5.14)

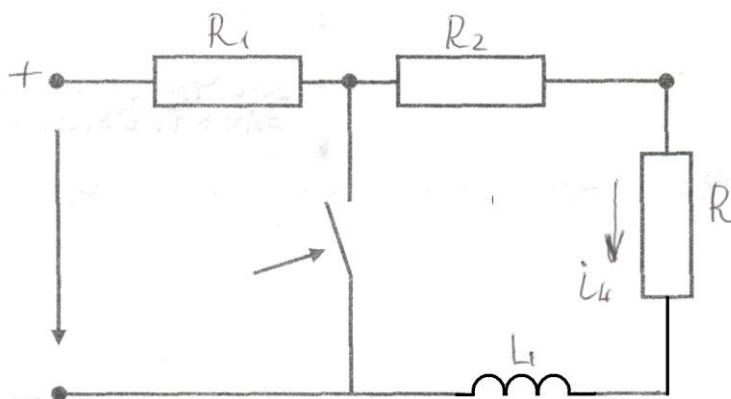


Рисунок 5.14. Схема замещения электрической цепи

Параметры цепи:

$$R_1=0,41\text{ Ом}; R_2=0,14\text{ Ом}; R=0,8\text{ Ом}; L=0,9\text{ Гн}$$

Находим ток в цепи до коммутации

$$i_L(0_-) = \frac{U}{R_1 + R_2 + R} = \frac{16}{0,41 + 0,14 + 0,8} = 11,8\text{А}$$

По первому закону коммутации имеем, что  $i_L(0_-) = i_L(0_+) = 11,8A$   
 после коммутации установившейся ток равен  $i_{Lmn} = 0$

Составляем дифференциальные уравнения по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений переходного тока

$$i_L(R_2 + R) + L \frac{di_L}{dt} = 0$$

Запишем уравнение для переходного тока в цепи выключающего механизма

$$i_L = i_{Lmn} + i_{Lcb}$$

В нашем случае  $i_{Lmn} = 0$ , поэтому переходный ток, протекающий через индуктивность, будет равен  $i_L = i_{Lcc} = Ae^{pt}$

Запишем дифференциальное уравнение для свободного тока

$$i_{Lcc}(R_2 + R) + L \frac{di_{Lcb}}{dt} = 0$$

Заменяем  $L \frac{di_{Lcb}}{dt} = L \cdot pi_{Lcc}$ , тогда  $i_{Lcc}(R_2 + R) + L \cdot pi_{Lcc} = 0$

Отсюда получаем характеристическое уравнение  $R_2 + R + L \cdot P = 0$

Определяем значение для P

$$p = -\frac{R_2 + R}{L} = -\frac{0,8 + 0,14}{0,9} = -1,04e^{-1}$$

Уравнение для переходного тока  $i_L$  запишется

$$i_L = Ae^{-1,04t^{(*)}}$$

Постоянную уравнения A находим из начальных условий при  $t=0$

Из уравнения (\*)

$$i_L(0_+) = A \cdot e^{-1,04 \cdot 0} = A = 11,8$$

Окончательно переходный ток, протекающий через катушку выключающего механизма, изменяется по закону

$$i_L 11,8e^{-1,04t}$$

Определяем время срабатывания выключающего механизма при  $I_{omn} = 7A$

Подставим этот ток в уравнение переходного тока  $i_L = 11,8e^{-1,04t}$

$$7 = 11,8e^{-1,04t}$$

Прологарифмируем обе части этого уравнения

$$\ln 7 = \ln(11,8e^{-1,04t}) = \ln 11,8 + \ln e^{-1,04t} = \ln 11,8 - 1,04t$$

После вычисления логарифмов имеем

$$t = \frac{\ln 11,8 - \ln 7}{1,04} = \frac{2,468 - 1,945}{1,04} = 0,6 \text{ с}$$

Искомое время срабатывания выключающего механизма составляет 0,6 с. Строим график зависимости тока спада от времени из уравнения

$$i_L = 11,8e^{-1,04t}$$

Расчеты сведем в табл. 5.1

Таблица 5.1 – Расчеты зависимости тока спада от времени

t, с	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$i_L, A$	11,8	10,8	9,8	8,8	7,9	7,2	7	6,2	5,4	4,3	4,2

Строим график  $i_L(t) = 11,8e^{-1,04t}$  (рис. 5.15)

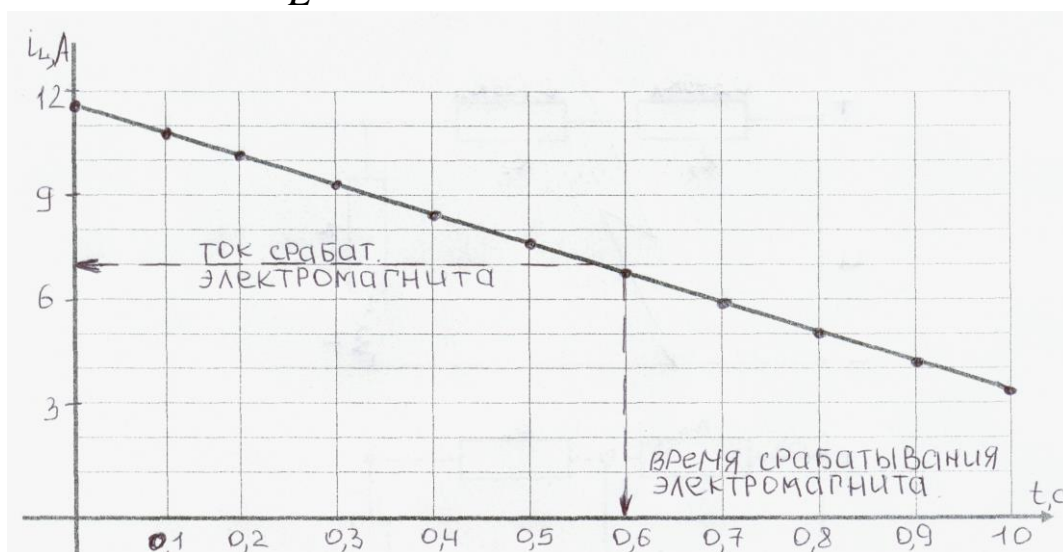
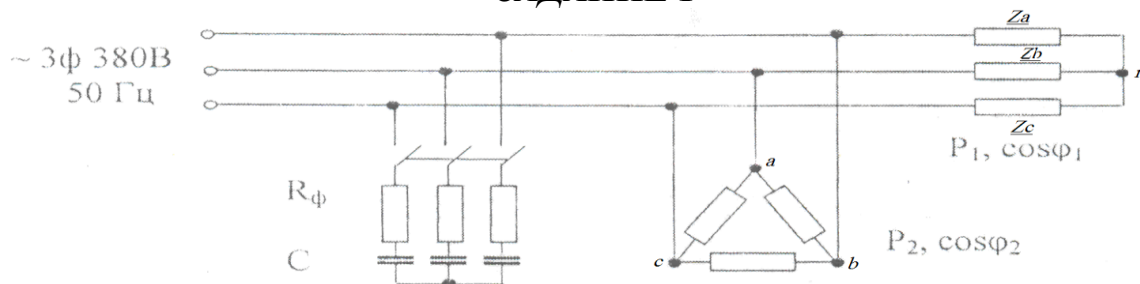


Рисунок 5.15. График переходного процесса

**Рекомендуемая литература**

1. Горбунов А.Н., Кабанов И.Д., Кравцов А.В., Редько И.Я. Теоретические основы электротехники: /М.: 1998-491с. с ил
2. Лоторейчук Е.А. Теоретические основы электротехники М.: Высш.шк 2000
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.-М.: Высш.шк., 1984
4. Сборник задач по теоретическим основам электротехники: учебное пособие для энерг. и приборост. спец. вузов.-4е изд., перераб./Л.А. Бессонов, И.Т. Демидова и др.; Л.А.Бессонова.-М.: Высш. шк., 2000.-528с. с ил.

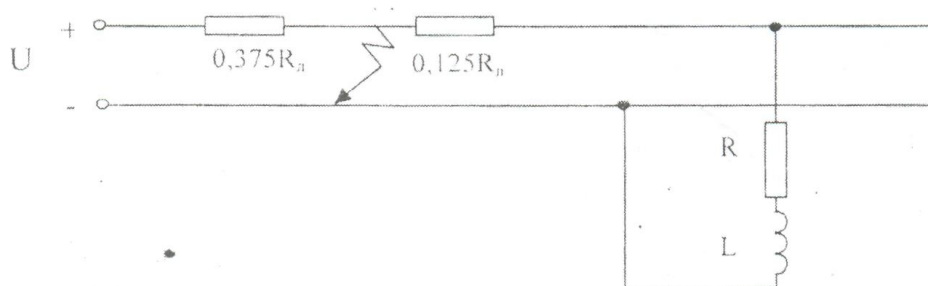
## **Приложения**

**ЗАДАНИЕ 1**

К линии с линейным напряжением  $U_{\text{Л}} = 380 \text{ В}$  подключены два симметричных приёмника. Для компенсации реактивной мощности подключены конденсаторы по схеме «звезда» проводами сопротивлением  $R_{\phi}$ . Определить:

- Токи в проводах трёхфазной линии при отключенной батарее конденсаторов.
- Токи в проводах трёхфазной линии при включенной батарее конденсаторов.
- Ёмкость конденсатора в фазе батареи конденсаторов.
- Мощность потерь в проводах между батареей конденсаторов и трёхфазной линией.
- Полную мощность, потребляемую потребителем.
- Построить векторную диаграммы токов и напряжений до и после компенсации  $Q$ .

Вариант	$P_1, \text{кВт}$	$\text{Cos } \varphi_1$	$P_2, \text{кВт}$	$\text{Cos } \varphi_2$	$R_{\phi}, \text{Ом}$

**ЗАДАНИЕ 2**

Выключающий механизм приводится в действие при коротком замыкании между проводами в линии. Электромагнит отпускает защёлку, освобождая пружину выключающего механизма. Защёлка отходит, когда ток, спадая, достигает значения  $I_{\text{отп}}$ . Обмотка электромагнита имеет индуктивность  $L$  и сопротивление  $R$ . Сопротивление линии равно  $R_{\text{л}}$ . Напряжение в начале линии, разомкнуто!; на конце, равно  $U$ . Определить, через какое время после короткого замыкания придёт в движение выключающий механизм. Построить кривую спада тока в обмотке электромагнита в функции времени

Вариант	$U, \text{В}$	$I_{\text{отп}}, \text{А}$	$R, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$	$R_{\text{л}}, \text{Ом}$

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ**  
**ФГБОУ ВПО «Брянская государственная сельскохозяйственная академия»**

**Факультет заочного обучения**

**Кафедра «Системы энергообеспечения»**

## **КУРСОВАЯ РАБОТА**

**по дисциплине «Теоретические основы электротехники»**

**на тему: Расчет и анализ параметров трехфазных систем  
и переходных процессов в линейных электрических цепях»**

**Выполнил студент** \_\_\_\_\_

**Группа** \_\_\_\_\_ **№ зачетной книжки** \_\_\_\_\_

**Проверил** \_\_\_\_\_

**Оценка** \_\_\_\_\_

**Дата** \_\_\_\_\_

**Брянск 201** \_\_\_\_\_



## Содержание

Предисловие

1. Требования к оформлению курсовой работы

2. Содержание задания

.....Задание 1

.....Задание 2

3. Общие сведения

3.1 Общие сведения о трехфазных цепях

3.1.1 Понятие о трехфазных цепях

3.2.2 Схемы соединения трехфазных цепей

3 Мощность в трехфазных цепях

4 Переходные процессы в линейных электрических цепях

4.1 Основные сведения о расчёте переходных процессов электрических цепей

5 Примеры выполнения курсовой работы

    Задача №1

    Задача №2

Рекомендуемая литература

Приложение

Учебное издание

Широбокова Ольга Евгеньевна

Прыгов Николай Михайлович

Маркарянц Лариса Михайловна

Никитин Антон Михайлович

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Редактор Лебедева Е.М.

---

Подписано к печати 24.04.2014. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Усл. п. л. 2,44. Тираж 100 экз. Изд. 2691.

---

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии.  
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянская ГСХА