

# Анализ трехфазных цепей при соединении приемников звездой.

## Четырехпроводная цепь

Рассмотрим схему замещения четырехпроводной цепи, в которой фазы генератора и приемника соединены звездой (рис. 3.10). Обычно сопротивления проводов значительно меньше сопротивлений приемников, поэтому при расчете таких цепей (если не требуется большая точность) сопротивления проводов можно не учитывать. Тогда фазные напряжения приемника  $(\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c)$  будут равны фазным напряжениям источника  $(\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C)$ , т. е.

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B, \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C. \quad (3.8)$$

Если комплексные сопротивления фаз приемника равны соответственно  $\underline{Z}_a$ ,  $\underline{Z}_b$  и  $\underline{Z}_c$ , то токи в каждой фазе можно определить по формулам

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a, \quad \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b, \quad \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c. \quad (3.9)$$

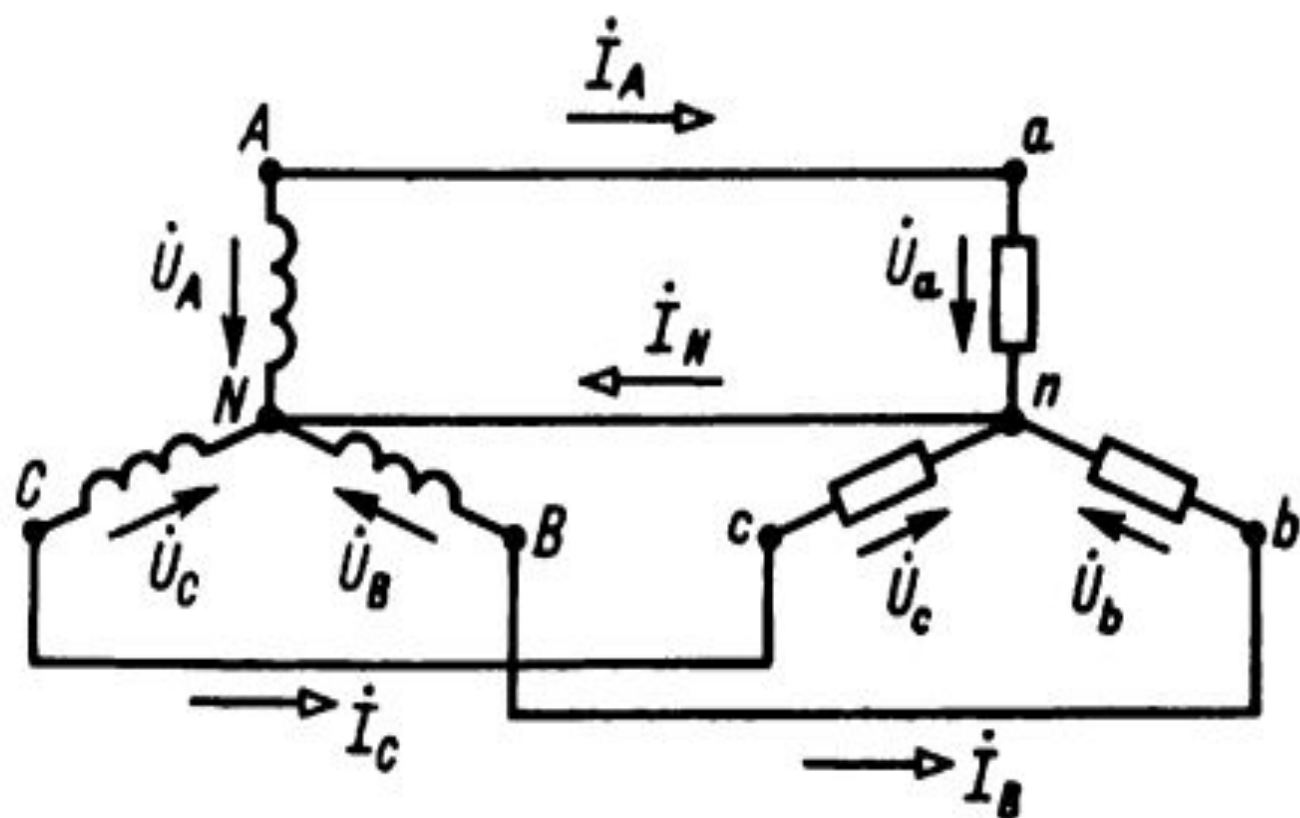


Рис. 3.10. Схема замещения четырехпроводной трехфазной цепи

Условно положительные направления токов в линейных проводах принимаются от источника к приемникам, в нейтральном проводе — от нейтральной точки приемника к нейтральной точке источника (см. рис. 3.10).

При соединении звездой фазные токи равны соответствующим линейным токам, например,  $\dot{I}_a = \dot{I}_A$ .

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (3.10)$$

Если приемники симметричные, то токи в фазах будут равны между собой и сдвинуты по фазе по отношению к соответствующим фазным напряжениям на один и тот же угол ( $\operatorname{tg} \varphi = X/R$ ). Построив векторную диаграмму токов для симметричного активно-индуктивного приемника (рис. 3.11), легко установить, что геометрическая сумма трех векторов тока равна нулю:  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ . Следовательно, в случае симметричного приемника ток в нейтральном проводе  $I_N = 0$ , поэтому необходимость в нейтральном проводе отпадает.

В четырехпроводные трехфазные цепи обычно включают однофазные несимметричные приемники, например, лампы или бытовые приборы, причем каждый из них включают между зажимами одной из фаз и нейтральным проводом (см. рис. 3.8). Благодаря нейтральному проводу напряжения на каждой фазе приемника будут равны соответствующим напряжениям генератора (или трансформатора). Следовательно, *нейтральный провод обеспечивает сохранение симметрии фазных*

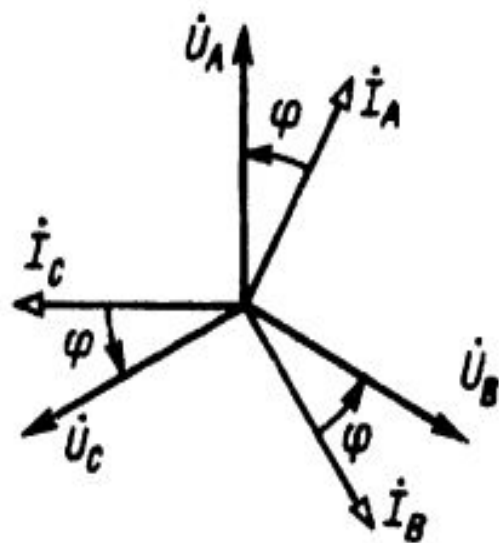


Рис. 3.11. Векторная диаграмма симметричного приемника, соединенного звездой

*напряжений несимметричного приемника. Но, очевидно, что токи в фазах будут разными, поскольку комплексные сопротивления фаз не равны между собой. Для несимметричного приемника векторы токов уже не представляют собой симметричной системы, и поэтому ток в нейтральном проводе не будет равен нулю.*

*Важным преимуществом четырехпроводной цепи является то, что при изменении режима работы одной из фаз режимы других фаз не изменяются, так как нейтральный провод обеспечивает постоянство фазных напряжений.*

# Трехпроводная цепь

Трехфазные цепи при соединении фаз приемника звездой без нейтрального провода называют **т р е х п р о в о д н ы м и** (рис. 3.16). В такую трехпроводную цепь можно включать только симметричные приемники, например, трехфазные электродвигатели, электрические печи.

Рис. 3.16 представляет собой схему с двумя узлами  $n$  и  $N$ , поэтому для определения напряжения  $\dot{U}_{nN}$  можно воспользоваться известной формулой междуузлового напряжения

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_a \dot{E}_A + \underline{Y}_b \dot{E}_B + \underline{Y}_c \dot{E}_C}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}, \quad (3.11)$$

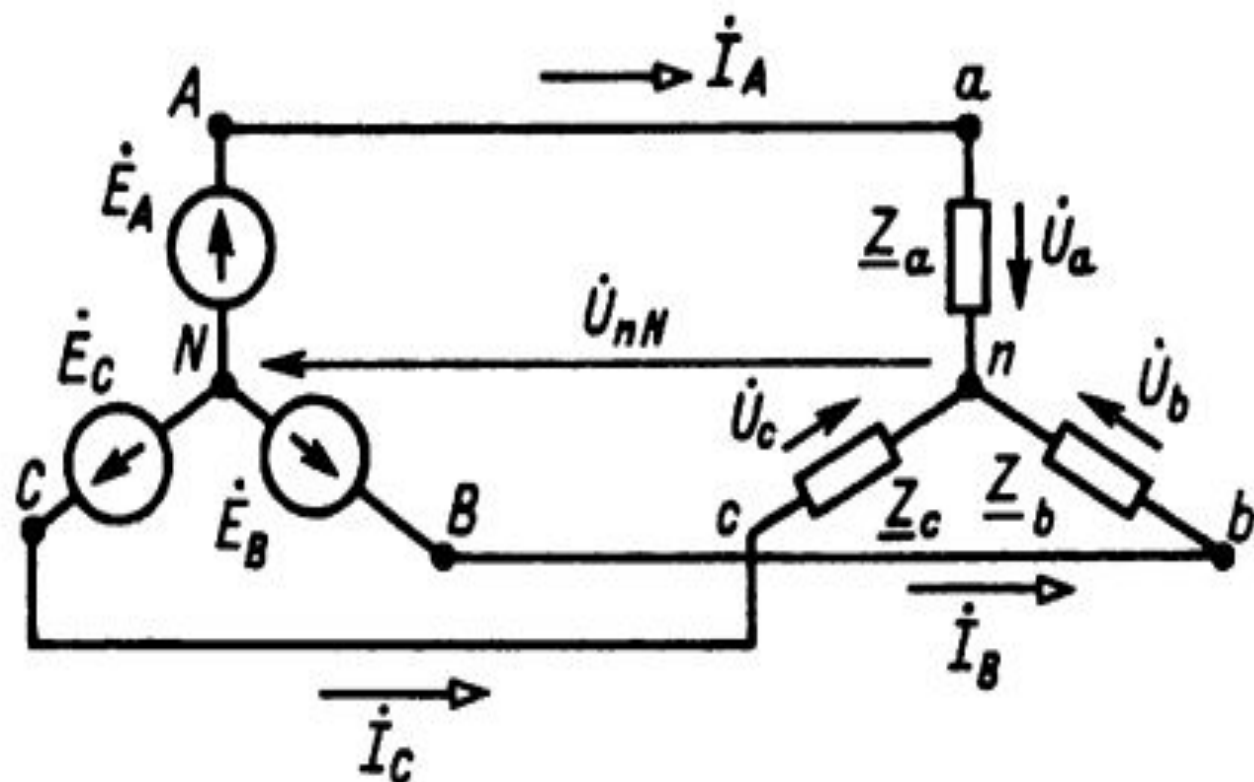


Рис. 3.16. Схема трехпроводной цепи при соединении приемников звездой

где  $\underline{Y}_a$ ,  $\underline{Y}_b$  и  $\underline{Y}_c$  — комплексные проводимости фаз приемника. Если приемник симметричный ( $\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c$ ), то  $\dot{U}_{nN} = 0$ , напряжения на фазах приемника равны напряжениям на фазах генератора, а токи в фазах равны и определяются по тем же формулам, что и для четырехпроводной цепи (3.9). В случае симметричного приемника иногда достаточно определить ток в одной из его фаз.

В инженерной практике симметричные трехфазные цепи часто изображают однолинейными (рис. 3.17), так как каждая фаза в них состоит из одинаковых элементов.

Если по каким-либо причинам несимметричные приемники, соединенные звездой, окажутся включенными в трехпроводную сеть (см. рис. 3.16), то между нейтральными точками приемника и источника возникнет напряжение  $\dot{U}_{nN}$ , называемое напряжением между нейтральюми.

Очевидно, что теперь напряжения на фазах приемника ( $\dot{U}_a$ ,  $\dot{U}_b$ ,  $\dot{U}_c$ ) будут отличаться от напряжений генератора ( $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$ ,  $\dot{U}_C$ ). Из второго закона Кирхгофа следует, что

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}. \quad (3.12)$$



Следовательно, зная  $\dot{U}_{nN}$  и фазные напряжения генератора, можно определить фазные напряжения приемника, а по ним — и фазные токи:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a, \quad \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b, \quad \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c. \quad (3.13)$$

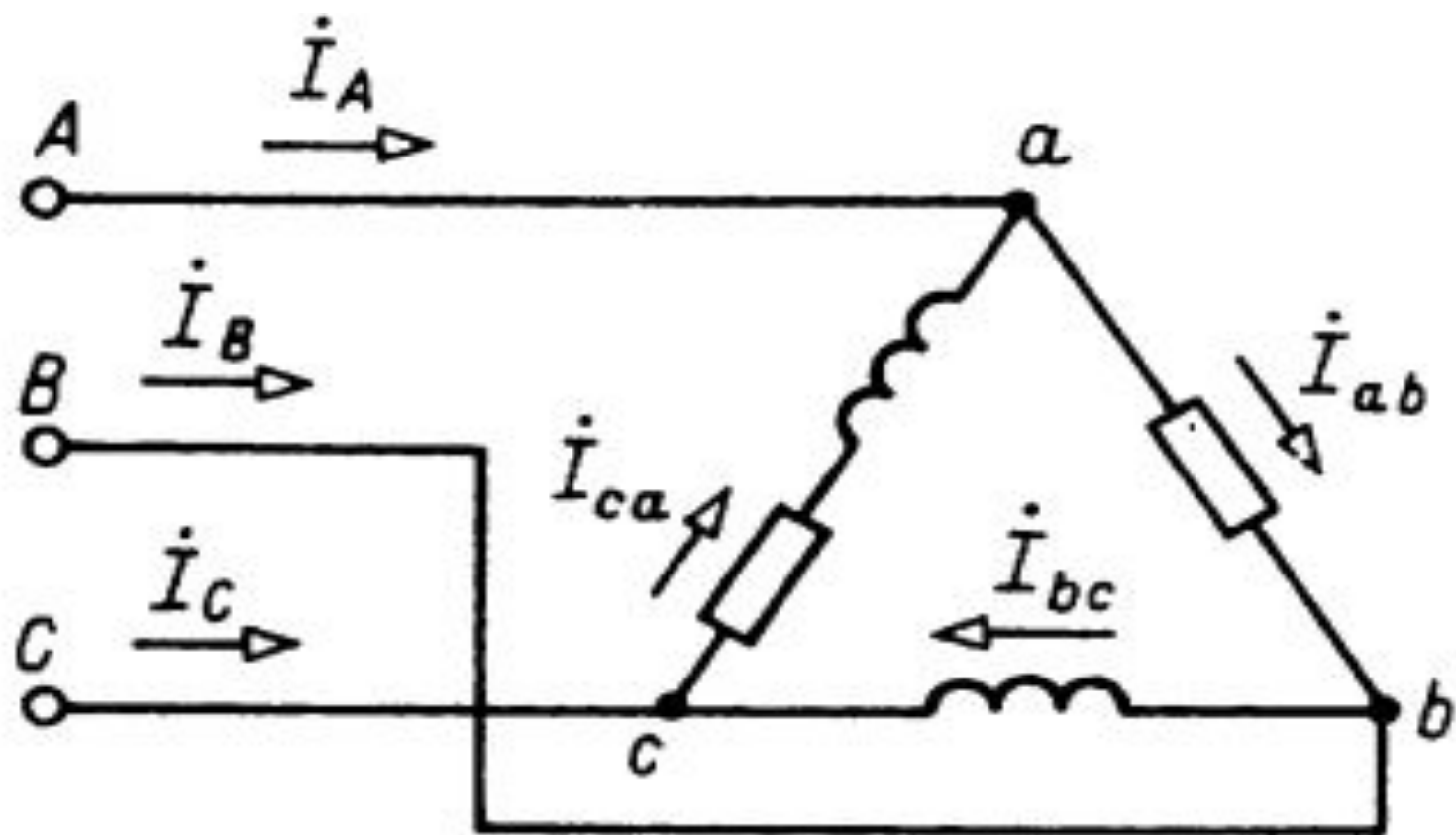
# Анализ трехфазных цепей при соединении приемников треугольником

Фазы трехфазных приемников могут соединяться треугольником. Такое соединение получится, если фазы приемника с сопротивлениями  $\underline{Z}_{ab}$ ,  $\underline{Z}_{bc}$ ,  $\underline{Z}_{ca}$  включить соответственно между линейными проводами (рис. 3.20). При этом фазные напряжения приемника равны соответствующим линейным напряжениям источника питания:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB}, \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC}, \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA}. \quad (3.15)$$

Токи в фазах приемника определяются по формулам

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{AB} / \underline{Z}_{ab}, \quad \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{BC} / \underline{Z}_{bc}, \quad \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{CA} / \underline{Z}_{ca}. \quad (3.16)$$



a)

Токи в фазах приемника определяются по формулам

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{AB}/\underline{Z}_{ab}, \quad \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{BC}/\underline{Z}_{bc}, \quad \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{CA}/\underline{Z}_{ca}. \quad (3.16)$$

В отличие от соединения звездой при соединении треугольником фазные токи не равны линейным. Линейные токи можно определить по фазным, составив уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов  $a$ ,  $b$  и  $c$  (см. рис. 3.20,  $a$ ):

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (3.17)$$

Важной особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что *при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз останется неизменным*, так как линейные напряжения генератора остаются постоянными (будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах, соединенных с этой фазой). Поэтому *схема соединения треугольником широко используется для включения несимметричной нагрузки.*

# Мощность трехфазных цепей

Мгновенная мощность трехфазного источника электрической энергии равна сумме мгновенных мощностей каждой из фаз:

$$p = p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C. \quad (3.19)$$

Среднее за период значение мощности, т. е. активная мощность генератора, равна сумме активных мощностей отдельных фаз:

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

Активную мощность трехпроводной цепи можно выразить также через линейные напряжения и токи, если определить из уравнения  $i_A + i_B + i_C = 0$  один из линейных токов, например,  $i_B = -i_A - i_C$ .

Подставляя это равенство в выражение для мгновенной мощности (3.19), получим

$$p = u_{AB} i_A + u_{CB} i_C. \quad (3.20)$$

Тогда

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{AB} i_A + u_{CB} i_C) dt = \\ &= U_{AB} I_A \cos \alpha + U_{CB} I_C \cos \beta, \end{aligned} \quad (3.21)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — углы сдвига фаз векторов линейных токов  $\dot{I}_A$  и  $\dot{I}_C$  относительно соответствующих линейных напряжений  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{CB}$ . На этом основан метод двух ваттметров для измерения активной мощности в трехпроводной цепи.

Как известно, активная мощность любой из фаз (например, фазы  $a$ ) определяется из соотношения  $P_a = U_a I_a \cos \varphi_a$ . Активная мощность трехфазного приемника равна арифметической сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P = P_a + P_b + P_c. \quad (3.22a)$$

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c. \quad (3.22б)$$

Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (3.22в)$$

Активная мощность симметричного трехфазного приемника

$$P = 3P_{\Phi} = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi_{\Phi}.$$

Аналогично выражается и реактивная мощность:

$$Q = 3Q_{\Phi} = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi_{\Phi}.$$

Так как за номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, то мощности удобнее выражать через линейные величины  $U_{\text{Л}}$  и  $I_{\text{Л}}$ .

При соединении фаз приемника звездой  $U_{\Phi} = U_{\text{Л}}/\sqrt{3}$ ,  $I_{\Phi} = I_{\text{Л}}$ , при соединении треугольником  $U_{\Phi} = U_{\text{Л}}$ ,  $I_{\Phi} = I_{\text{Л}}/\sqrt{3}$ . Поэтому независимо от схемы соединения фаз симметричного приемника его активная мощность  $P = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos \varphi_{\Phi}$ , где  $U_{\text{Л}}$  и  $I_{\text{Л}}$  — линейные напряжение и ток;  $\cos \varphi$  — фазный. Обычно индекс "Л" не указывают и формула принимает вид

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi. \quad (3.23a)$$

Соответственно реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi \quad (3.23б)$$

и полная мощность

$$S = \sqrt{3} UI. \quad (3.23в)$$



# 4. Переходные процессы в линейных электрических цепях

## 4.1. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В предыдущих главах рассматривались стационарные (установившиеся) режимы работы электрических цепей, при которых в результате относительно длительного действия источников электрической энергии устанавливаются постоянные или синусоидальные токи. Однако в ряде случаев необходимо исследовать не установившиеся процессы, возникающие в электрических цепях вследствие коммутации, т. е. включения или выключения источника энергии либо элементов цепи, а также в результате скачкообразного изменения параметров  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементов цепи.

*Электромагнитные процессы, возникающие в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому, называются переходными.* Переходные процессы могут происходить во многих электротехнических устройствах не только в начале или в конце их работы, когда включается или выключается источник питания, но и при возникновении аварийных ситуаций, когда происходит обрыв или короткое замыкание части электрической цепи.

Иногда значения токов или напряжений некоторых элементов цепи в переходном процессе могут во много раз превышать номинальные значения, на которые рассчитаны эти элементы. Для предотвращения выхода из строя этих элементов используют аппаратуру, автоматически защищающую электрическую цепь от перенапряжений и чрезмерного увеличения токов. При эксплуатации электротехнических устройств и выборе аппаратуры защиты необходимо знание максимальных значений токов и напряжений, возникающих в переходном режиме, и время, за которое они достигаются.

В ряде электротехнических устройств, особенно часто в устройствах промышленной электроники, переходные процессы являются основными условиями их работы, а не свидетельством аварийного режима. Так, переходные процессы, связанные с зарядкой и разрядкой конденсаторов, лежат в основе работы некоторых типов электронных генераторов.

Переходные процессы возникают в цепях, содержащих индуктивные катушки и конденсаторы, так как эти элементы обладают способностью накапливать и отдавать энергию соответственно магнитного и электрического полей. Возникновение переходных процессов объясняется тем, что индуктивные катушки и конденсаторы являются инерционными элементами, так как изменение энергии электрического или магнитного поля не может происходить мгновенно. Накопление энергии за счет источника или отдача ее в электрическую цепь происходят хотя и в очень малые, но конечные промежутки времени.

Расчет напряжений и токов на участках исследуемой электрической цепи во время переходного процесса проводят, пользуясь уравнениями, составленными в соответствии с законами Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений. Они характеризуют электрическое состояние цепи в любом режиме, в том числе и в переходном. Для электрических цепей с линейными элементами, имеющими постоянные параметры  $R$ ,  $L$  и  $C$ , эти уравнения представляют собой линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами. Решение дифференциальных уравнений, как известно, может осуществляться различными методами.

Расчет напряжений и токов на участках исследуемой электрической цепи во время переходного процесса проводят, пользуясь уравнениями, составленными в соответствии с законами Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений. Они характеризуют электрическое состояние цепи в любом режиме, в том числе и в переходном. Для электрических цепей с линейными элементами, имеющими постоянные параметры  $R$ ,  $L$  и  $C$ , эти уравнения представляют собой линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами. Решение дифференциальных уравнений, как известно, может осуществляться различными методами.

При непосредственном интегрировании дифференциальных уравнений общий интеграл линейных дифференциальных уравнений со свободным членом (правой частью) получается в результате суммирования частного решения данного неоднородного уравнения и его общего решения при равенстве нулю правой части, т. е. однородного уравнения.

Ч а с т н о е р е ш е н и е дифференциального уравнения находят для установившегося режима, когда переходный процесс закончен. При этом токи и напряжения на участках цепи определяются параметрами источника энергии и элементов электрической цепи. Определение токов и напряжений осуществляется одним из рассмотренных ранее методов расчета цепей постоянного или переменного тока. Токи и напряжения, которые получаются в результате частного решения для установившегося режима, называют п р и н у ж д е н н ы м и или у с т а н о в и в ш и м и с я  $(i_y, u_y)$ .

О б щ е е р е ш е н и е дифференциального уравнения без правой части соответствует режиму цепи в отсутствие внешнего источника энергии, т. е. свободному режиму. Токи и напряжения, которые получаются в результате общего решения однородного дифференциального уравнения, определяются лишь параметрами элементов цепи и называются с в о б о д н ы м и  $(i_{св}, u_{св})$ .

Алгебраические суммы установившихся и свободных токов и напряжений равны переходному току и напряжению, т. е. их значениям во время переходного процесса:

$$i_{пер} = i_y + i_{св}, \quad u_{пер} = u_y + u_{св}. \quad (4.1)$$

При интегрировании дифференциальных уравнений, как известно, появляются постоянные, которые определяют на основе начальных условий, вытекающих из двух законов коммутации.

*Первый закон коммутации* говорит о том, что ток в ветви с индуктивной катушкой не может изменяться скачком. В первый момент переходный ток сохраняет значение, которое он имел в момент, предшествовавший коммутации.

*Второй закон коммутации* свидетельствует о том, что напряжение на конденсаторе не может изменяться скачком. Значение этого напряжения в момент, предшествовавший коммутации, сохраняется и в первый момент после коммутации. При этом предполагается, что коммутация осуществляется мгновенно.

Допущение скачка тока в ветви с индуктивным элементом или напряжения на емкостном элементе привело бы к заключению о неизбежности скачкообразного изменения энергий магнитного и электрического полей:

$$W_M = \frac{Li^2}{2}, \quad W_E = \frac{Cu^2}{2}. \quad (4.2)$$

Но скачкообразное изменение этих энергий возможно лишь при бесконечно больших мощностях, так как  $p_M = \frac{dW_M}{dt} = Li \frac{di}{dt}$ ,  $p_Э = \frac{dW_Э}{dt} = Cu \frac{du}{dt}$ .

Поскольку электрических цепей бесконечно большой мощности нет, скачкообразное изменение энергий магнитного и электрического полей невозможно. Это говорит о том, что первый и второй законы коммутации соблюдаются во всех электрических цепях.

# Переходные процессы в цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора.

Рассмотрим электрическую цепь, в которой к источнику постоянной ЭДС  $E$  подключается конденсатор емкостью  $C$ , последовательно соединенный с резистором, сопротивление которого равно  $R$  (рис. 4.2). Будем считать, что до включения источника ЭДС напряжение на конденсаторе было равно нулю, следовательно, энергия его электрического поля также равнялась нулю. После замыкания выключателя  $B$  в цепи возникает ток и конденсатор заряжается до тех пор, пока напряжение на нем не достигнет значения ЭДС источника  $E$ .



Согласно второму закону Кирхгофа, уравнение электрического состояния этой цепи в переходном режиме имеет вид

$$Ri_{\text{пер}} + u_{C_{\text{пер}}} = E. \quad (4.3)$$

Используя известное соотношение, связывающее ток и напряжение на конденсаторе  $i = C \frac{du_C}{dt}$ , уравнение (4.3) можно записать иначе:

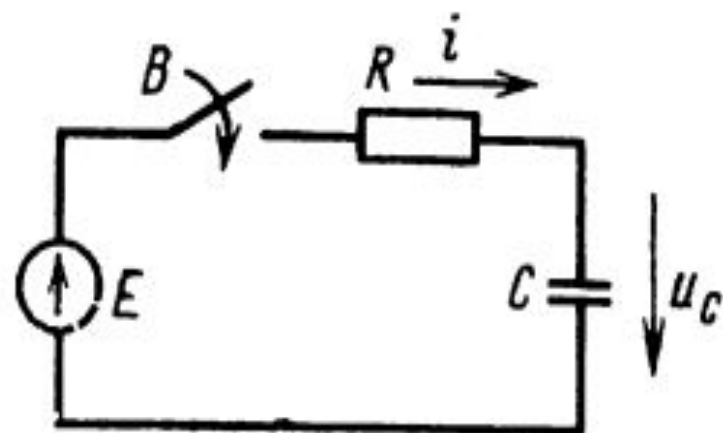
$$RC \frac{du_{C_{\text{пер}}}}{dt} + u_{C_{\text{пер}}} = E. \quad (4.3a)$$

Как было указано, выражение для установившегося напряжения следует найти при  $t \rightarrow \infty$ . Тогда напряжение на конденсаторе перестает изменяться  $\left( \frac{du_C}{dt} = 0 \right)$  и в соответствии с уравнением (4.3a)

$$u_{C_{\text{у}}} = E.$$

Выражение для свободного напряжения  $u_{C_{\text{св}}}$  определяется решени-

Рис. 4.2. Схема цепи зарядки конденсатора



ем однородного дифференциального уравнения:

$$RC \frac{du_{C_{св}}}{dt} + u_{C_{св}} = 0 \quad (4.4)$$

или

$$\frac{du_{C_{св}}}{dt} + \frac{1}{RC} u_{C_{св}} = 0. \quad (4.4a)$$

Решение этого уравнения, как известно из математики, имеет вид

$$u_{C_{св}} = A e^{pt}. \quad (4.5)$$

Подставляя его в уравнение (4.4a), получим

$$A p e^{pt} + \frac{A}{RC} e^{pt} = A e^{pt} \left( p + \frac{1}{RC} \right) = 0. \quad (4.6)$$

Значение  $p$  находят из решения уравнения

$$p + \frac{1}{RC} = 0, \quad (4.7)$$

которое называется характеристическим уравнением.

Корнем этого уравнения является значение  $p = -\frac{1}{RC}$ .

Таким образом, выражение для  $u_{C_{св}}$  можно записать в виде

$$u_{C_{св}} = A e^{-t/RC} = A e^{-t/\tau}. \quad (4.5a)$$

Величину  $\tau = RC$  называют постоянной времени, так как она имеет размерность времени и характеризует скорость протекания переходного процесса. Она определяет время, в течение которого напряжение  $u_{C_{св}}$ , затухая, уменьшается в  $e$  раз по сравнению со своим начальным значением  $u_{C_{св}}(0) = A$ . Чем больше  $\tau$ , тем дольше продолжается переходный процесс. Таким образом, постоянная времени является мерой инерции электрической цепи при протекании переходных процессов.

Переходный процесс можно считать практически законченным через  $t = 3\tau$ , так как к этому времени напряжение  $u_{C_{св}}$  снижается до 5% своего первоначального значения и напряжение на конденсаторе становится практически равным  $u_{C_{у}}$ .

С учетом найденных выражений для  $u_{C_y}$  и  $u_{C_{св}}$  переходное напряжение на конденсаторе

$$u_{C_{пер}} = u_{C_y} + u_{C_{св}} = E + A e^{-t/\tau}. \quad (4.8)$$

Для определения коэффициента  $A$  воспользуемся вторым законом коммутации. В момент, предшествующий коммутации, конденсатор не был заряжен и напряжение на нем было равно нулю. Следовательно, в первый момент после замыкания выключателя при  $t = 0$  напряжение  $u_C(0+)$ , сохраняясь неизменным, будет также равно нулю. Подставляя это начальное условие в уравнение (4.8), получим  $E + A = 0$ , т. е.  $A = -E$ . Следовательно,

$$u_{C_{пер}} = E - E e^{-t/\tau} = E(1 - e^{-t/\tau}). \quad (4.9)$$

Переходный ток в цепи

$$i_{пер} = C \frac{du_{C_{пер}}}{dt} = CE \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}. \quad (4.10)$$

Графики изменения переходного тока и напряжения на конденсаторе при его зарядке показаны на рис. 4.3. Переходный ток конденсатора зависит от сопротивления резистора  $R$ . В первый момент после коммутации ( $t = 0+$ ) ток ограничивается только сопротивлением, т. е.

$$i(0+) = E/R, \quad (4.11)$$

а напряжение на резисторе равно ЭДС источника  $E$ .

На рис. 4.3 пунктиром показаны кривые напряжений  $u_{Cу}$  и  $u_{Cсв}$ , а тонкой линией касательная к кривой тока  $i(t)$ , которая дает возможность графически определить значение постоянной времени  $\tau$ , численно равной подкасательной.

По мере увеличения напряжения на конденсаторе ток в цепи уменьшается. Ток в рассматриваемой цепи может изменяться скачком, поскольку она не содержит элемента, обладающего индуктивностью. Это

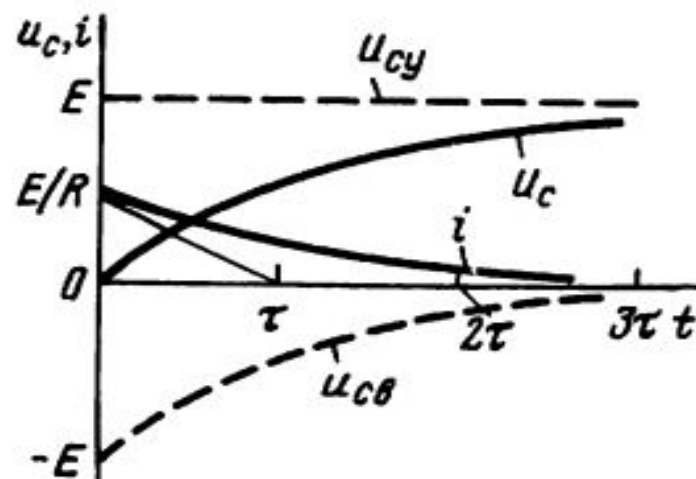


Рис. 4.3. Графики зависимостей переходных напряжений и тока от времени при зарядке конденсатора

необходимо учитывать в случаях, когда к источнику напряжения подключается цепь, содержащая конденсатор. Если активное сопротивление цепи невелико, то ток в момент включения источника напряжения может быть очень большим, значительно превышающим номинальное значение.

При подключении к источнику напряжения нагрузочного устройства с помощью кабеля следует иметь в виду, что его распределенная емкость может быть значительной, а сопротивление проводов кабеля небольшим, поэтому в момент включения ток в цепи источника напряжения может достигать очень большого значения.

При разрядке конденсатора емкостью  $C$ , заряженного до напряжения  $u_C = U_0$ , на резистор сопротивлением  $R$  (рис. 4.4) установившееся напряжение на конденсаторе  $u_{Cy} = 0$  и переходное напряжение  $u_{Cпер}$  равно свободному напряжению  $u_{Cсв}$ . Ток при разрядке конденсатора (см. рис. 4.4) не совпадает по направлению с напряжением  $u_C$ , поэтому

$$i = -C \frac{du_C}{dt}. \quad (4.12)$$

Уравнение электрического состояния цепи рис. 4.4 в этом случае с учетом выражения (4.12), а также выбранных направлений тока  $i$  и напряжения  $u_C$ , имеет вид

$$RC \frac{du_{C\text{пер}}}{dt} + u_{C\text{пер}} = 0. \quad (4.13)$$

Решение этого уравнения аналогично выражению (4.5а) для  $u_{C\text{св}}$ :

$$u_{C\text{пер}} = u_{C\text{св}} = Ae^{-t/RC}. \quad (4.14)$$

Поскольку  $u_C(0+) = U_0$ , постоянная интегрирования  $A = U_0$  и переходное напряжение на конденсаторе при его разрядке

$$u_{C\text{пер}} = u_{C\text{св}} = U_0 e^{-t/RC}, \quad (4.15)$$

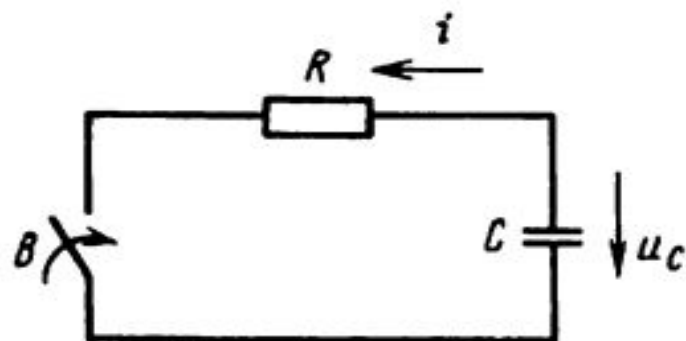


Рис. 4.4. Схема цепи разрядки конденсатора



а переходный ток

$$i_{\text{пер}} = -C \frac{du_{C_{\text{пер}}}}{dt} = \frac{U_0}{R} e^{-t/RC}, \quad (4.16)$$

При разрядке конденсатора запасенная в нем энергия электрического поля преобразуется в теплоту, выделяющуюся в резисторе сопротивлением  $R$ . Длительность переходного процесса при разрядке конденсатора, так же как и при его зарядке, зависит от постоянной времени  $\tau = RC$ .