

Задание 2

```

-----
|          ЗАДАНИЕ ПО ТОЭ № 2          | №    4902 |
|-----|
|   e1= 424.26*sin( 500*t+ 90) В.   |
|   e3= 282.84*sin( 500*t+150) В.   |
|R2=  40.0 Ом.L3= .100 Гн.C1=  40.00мкФ|
|L кат.1= .140 Гн. НАМОТКА КАТ.1  ЛЕВАЯ|
|L кат.3= .120 Гн. НАМОТКА КАТ.3  ЛЕВАЯ|
|M(1-3) = .100 Гн.                   |
|НАГРУЗКА:СН=  40.000мкФ.СОЕ-НИЕ ЗВЕЗДА|
| ПОСТРОИТЬ КРУГОВУЮ ДИАГРАММУ ТОКА I2 |
| ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ  R2     |
|-----|

```

СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАНИЯ № 2

1. Разметить одноименные зажимы индуктивно связанных катушек.
2. Составить для рассматриваемой цепи систему уравнений по законам Кирхгофа для мгновенных значений и в символической форме.
3. Сделать «развязку» индуктивных связей в цепи.
4. Рассчитать токи в ветвях символическим методом. Записать мгновенные значения токов.
5. Составить баланс мощности. Определить показания ваттметров.

Задание №2

2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Задание имеет целью практического освоения студентами методов расчета и анализа установившихся режимов в линейных цепях синусоидального тока.

2.1. СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ К ЗАДАНИЮ №2

Для расчета задания студент получает от преподавателя индивидуальную карточку (рис.16). Электрическая схема, составленная по данным этой карточки, показана на рис.17. Она состоит из трех ветвей между узлами 0-1, 0-2, 0-3 и нагрузки, присоединенной к узлам 1, 2 и 3.

Домашнее задание по ТОЭ №2 $E_1=141\sin(500T+90)$ В $E_3=141\sin(500T-315)$ В $r_3=40.0$ Ом $L_1=0.100$ Гн $C_2=50$ мкФ $L_{кат2}=0.140$ Гн. Намотка кат. 2 правая $L_{кат3}=0.160$ Гн. Намотка кат. 3 левая $M(2-3)=0.140$ Гн. Нагрузка: $C_H=9.524$ мкФ, сое-ние тр-к Построить круговую диаграмму тока I_3 При изменении модуля сопротивления C_2

Источники ЭДС, активное сопротивление r , емкость C , индуктивность L , индуктивно связанные катушки (обозначаемые в таблице домашнего задания “ $L_{\text{кат}}$ ”) включаются последовательно в

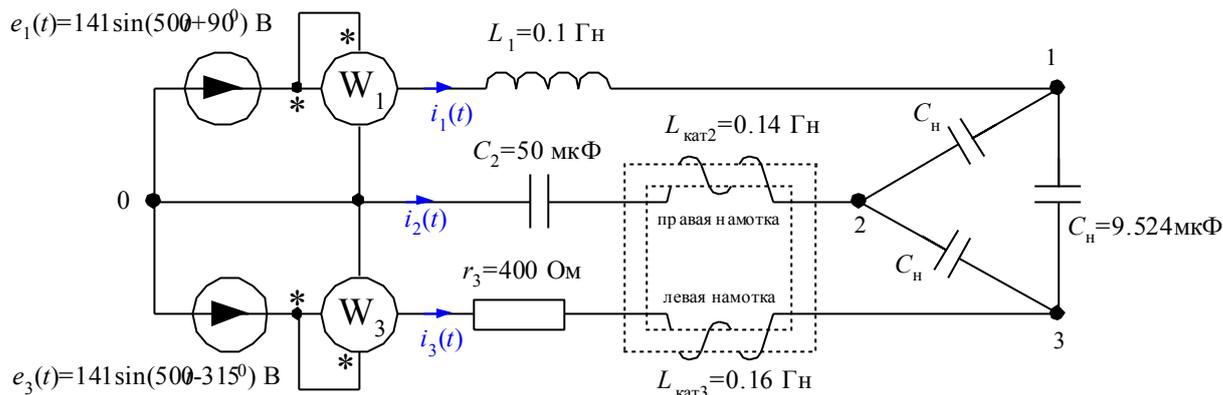


Рис.17

соответствующие ветви (например, E_1 и индуктивность L_1 в первую ветвь между узлами 0-1, емкость C_2 и катушка “ $L_{\text{кат}2}$ ” во вторую ветвь между узлами 0-2 и т.д.). Индуктивно связанные катушки (в карточке задания $L_{\text{кат}2}$ и $L_{\text{кат}3}$) обладают взаимной индуктивностью M . Индексы, стоящие при взаимной индуктивности « M », указывают на номера индуктивно связанных катушек. Например, в карточке рис.16 запись $M(2-3) = 0.14$ Гн означает наличие индуктивной связи между 2-й и 3-й катушками. В карточке указывается также направление намоток катушек. На рис.17 показана правая намотка 2-ой катушки и левая намотка 3-ей катушки.

Нагрузка в цепи симметрична и присоединена к узлам 1, 2, 3, тип соединения (треугольник, либо звезда) задан в карточке задания.

Два ваттметра подключаются непосредственно к зажимам ЭДС (схема Арона), как показано на рис.17.

Примечание:

В карточке задания (рис.16) ЭДС записаны для мгновенных значений (обозначения E_1 вместо e_1 , T вместо t и т.п. обусловлены отсутствием в цифропечатающем устройстве ЭВМ соответствующих индексов). Например, запись E_1 , приведенную в карточке, следует расшифровывать как $e_1(t) = 141 \sin(500t + 90^\circ)$ В.

Положительные направления ЭДС и токов в ветвях принять, как на рис.17.

2.2. СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАНИЯ № 2

6. Разметить одноименные зажимы индуктивно связанных катушек.
7. Составить для рассматриваемой цепи систему уравнений по законам Кирхгофа для мгновенных значений и в символической форме.
8. Сделать «развязку» индуктивных связей в цепи.
9. Рассчитать токи в ветвях символическим методом. Записать мгновенные значения токов.
10. Составить баланс мощности. Определить показания ваттметров.

2.3. УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ

Если нагрузка соединена треугольником, её рекомендуется преобразовать в звезду. При этом сопротивление ветви треугольника (с учетом симметричности нагрузки) должно быть уменьшено в три раза. В рассматриваемом примере (рис.17) симметричная нагрузка, соединенная треугольником, имеет ёмкостный характер. С учетом этого, сопротивление ветви эквивалентной звезды определится соотношением:

$$x_{C'_H} = \frac{x_{C_H}}{3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\omega C_H} = \frac{1}{\omega 3C_H} = \frac{1}{\omega C'_H},$$

где $C'_H = 3C_H = 3 \cdot 9,524 = 28,572$ мкФ представляет собой емкость ветви эквивалентной звезды.

2.3.1. Разметка одноименных зажимов индуктивно связанных катушек.

Эскиз магнитной цепи с катушками и учетом направлений их намоток представлен на рис.18. Разметка выполняется в такой последовательности:

а) задаются направлениями токов i_2 и i_3 в катушках в соответствии с рис.18;

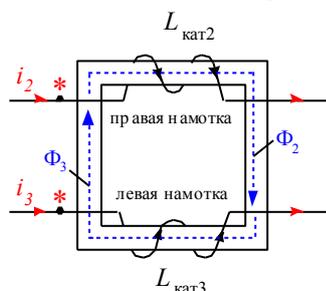


Рис.18

б) по правилу правоходного винта определяется направление магнитных потоков Φ_2 и Φ_3 , обусловленных протеканием токов i_2 и i_3 в катушках. В соответствии с этим правилом, вращение винта в направлении протекания тока i_2 по виткам катушки $L_{кат2}$, определяет направление магнитного потока Φ_2 , совпадающего с направлением поступательного движения винта. (В примере рис.18 вращение винта по часовой стрелке предопределяет его поступательное движение слева направо). Вращение правоходного винта в направлении протекания тока i_3 по виткам катушки $L_{кат3}$ (против хода часовой стрелки) предопределяет его поступательное движение справа налево. В этом же направ-

Два зажима, принадлежащих двум различным индуктивно-связанным элементам цепи, называют одноименными и обозначаются одинаковыми значками, если при одинаковом направлении токов относительно одноименных зажимов магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждом элементе суммируются.

лении ориентирован и магнитный поток Φ_3 (см. рис.18).

Характер взаимной ориентации магнитных потоков, порождаемых МДС каждой из катушек, позволяет оценить, какие зажимы катушек являются одноименными.

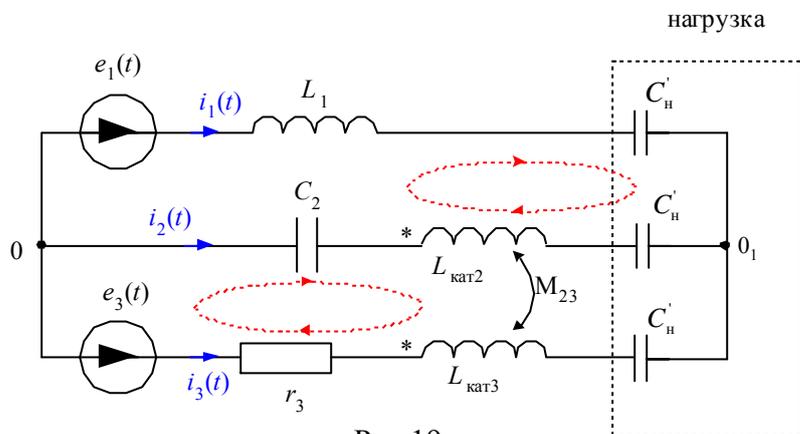


Рис.19

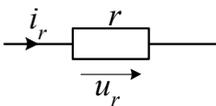
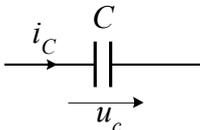
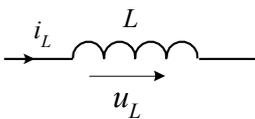
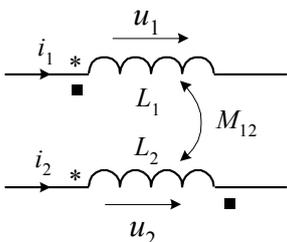
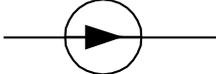
Согласно этому правилу, на рис.18 одноименные зажимы катушек обозначены звездочкой (*). Только при такой ориентации одноименных зажимов, как показано на рис.18, втекание токов i_2 и i_3 в эти зажимы приводит к суммированию потоков само- и взаимной индукции в каждой из катушек.

Полученная после разметки зажимов катушек расчетная схема представлена на рис.19 (ваттметры на схеме не показаны).

2.3.2. Система уравнений по законам Кирхгофа рассчитаем

При составлении уравнений по законам Кирхгофа в мгновенной и в символической форме (соотношения для токов и напряжений на элементах схемы в мгновенной и символической формах приведены в таблице 2) следует иметь в виду:

Таблица 2

№ п/п	Тип элемента и обозначения	Соотношения между напряжением и током	
		Для мгновенных значений	В символической форме
1	Активное сопротивление « r » 	$u_r = r \cdot i_r$	$\underline{U}_r = r \cdot \underline{I}_r$
2	Емкость « C » 	$u_C = \frac{1}{C} \int i_C \cdot dt$ $i_C = C \frac{du_C}{dt}$	$\underline{U}_C = -jx_C \cdot \underline{I}_C$, где $x_C = \frac{1}{\omega C}$ - емкостное сопротивление [Ом], $\omega = 2\pi f$ - круговая частота сети [с ⁻¹], C - емкость сети [Ф], f - частота сети [Гц]
3	Индуктивность « L » 	$u_L = L \frac{di_L}{dt}$	$\underline{U}_C = jx_L \cdot \underline{I}$, где $x_L = \omega \cdot L$ - индуктивное сопротивление [Ом], L - индуктивность [Гн]
4	Индуктивно связанные катушки  * - одноименные зажимы при согласном включении катушек, * - одноименные зажимы при встречном включении катушек.	$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M_{12} \frac{di_2}{dt}$, $u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M_{12} \frac{di_1}{dt}$, «+» для согласного включения, «-» для встречного включения.	$\underline{U}_1 = jx_{L1} \cdot \underline{I}_1 \pm jx_{M12} \cdot \underline{I}_2$, $\underline{U}_2 = jx_{L2} \cdot \underline{I}_2 \pm jx_{M12} \cdot \underline{I}_1$, где $x_{M12} = \omega \cdot M_{12}$ - сопротивление взаимной индуктивности [Ом], M_{12} - взаимная индуктивность между первой и второй катушкой [Гн].
5	ЭДС « e » 	$e(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi_e)$, E_m - амплитудное значение ЭДС.	Комплекс действующего значения $\underline{E} =$ $\frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_e} = E \angle \varphi_e$, E - действующее значение ЭДС.

а) число уравнений равно числу ветвей;

б) при составлении уравнений по 2-му закону Кирхгофа для контуров, содержащих элементы с магнитной связью необходимо руководствоваться следующим:

При расчете электрической цепи ЭДС само- и взаимоиндукции учитываются как напряжения и записываются в соответствующую часть уравнений Кирхгофа. При этом, если катуш-

ки включены согласно (токи индуктивно связанных катушек ориентированы одинаково относительно одноименных зажимов), то напряжения само- и взаимоиндукции в них имеют одинаковые знаки, если встречно, то знаки напряжений само- и взаимоиндукций противоположны. Для схемы, представленной на рис.19, уравнения (5) по первому и второму законам Кирхгофа для мгновенных значений (с учетом согласного включения индуктивно связанных катушек) имеют вид:

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0, \\ L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_H} \int i_1 dt - \frac{1}{C_H} \int i_2 dt - L_{\text{кат}2} \frac{di_2}{dt} - M_{23} \frac{di_3}{dt} - \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = e_1, \\ \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L_{\text{кат}2} \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C_H} \int i_2 dt - \frac{1}{C_H} \int i_3 dt - L_{\text{кат}3} \frac{di_3}{dt} - M_{23} \frac{di_2}{dt} - i_3 \cdot r_3 = -e_3. \end{cases} \quad (5)$$

Уравнения по второму закону Кирхгофа составлены с учетом обхода контуров в направлении движения часовой стрелки (показано пунктирной стрелкой). При составлении системы уравнений (5) для мгновенных величин удобно пользоваться таблицей 2.

Система уравнений (5) для мгновенных величин может быть представлена в символической форме записи (см. таблицу 2):

$$\begin{cases} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0, \\ jx_{L_1} \cdot \underline{I}_1 + (-jx_{C_H}) \cdot \underline{I}_1 - (-jx_{C_H}) \cdot \underline{I}_2 - jx_{L_{\text{кат}2}} \cdot \underline{I}_2 - jx_{M_{12}} \cdot \underline{I}_3 - (-jx_{C_2}) \cdot \underline{I}_2 = \underline{E}_1, \\ (-jx_{C_2}) \cdot \underline{I}_2 + jx_{L_{\text{кат}2}} \cdot \underline{I}_2 + jx_{M_{12}} \cdot \underline{I}_3 + (-jx_{C_H}) \cdot \underline{I}_2 - (-jx_{C_H}) \cdot \underline{I}_3 - jx_{L_{\text{кат}3}} \cdot \underline{I}_3 - jx_{M_{12}} \cdot \underline{I}_2 - \underline{I}_3 \cdot r_3 = -\underline{E}_3. \end{cases} \quad (6)$$

При этом интегро-дифференциальные уравнения (5) преобразуются в алгебраические. В

$$\text{уравнениях (6): } x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \quad x_L = \omega L = 2\pi f L, \quad x_M = \omega M = 2\pi f M.$$

Система уравнений (6) наглядно показывает, что представление синусоидальных функций

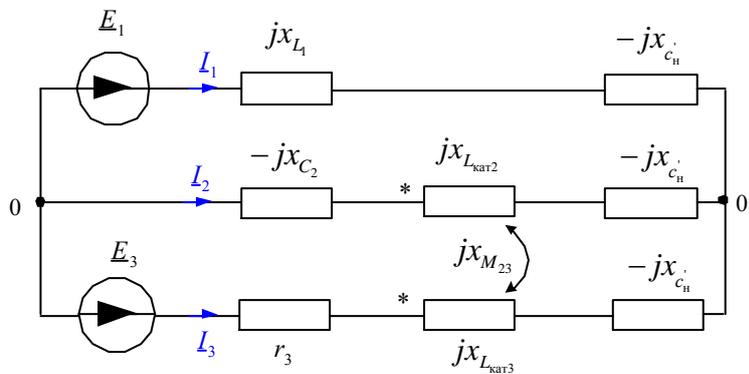


Рис.20

времени комплексными изображениями (символами) позволяет существенно упростить расчет цепи. На рис.20 изображена исследуемая схема в символическом представлении. Примечание. Уравнения (6) можно составить непосредственно по схеме замещения исходной схемы (рис.20) в символической форме.

2.3.3. Расчет токов символическим методом

Данный расчет можно проводить без «развязки» индуктивных связей по уравнениям (6). Однако, расчет рассматриваемой цепи может быть существенно упрощен, если воспользоваться «развязкой» индуктивно связанных элементов. При «развязке» индуктивных связей не принимается во внимание, согласно или встречно включены катушки. Ориентируются лишь на расположение одноименных зажимов магнитно-связанных катушек относительно узла, к которому они присоединены.

Правило развязки: две индуктивно-связанные катушки, присоединенные к какому-либо узлу непосредственно (узел 1 на рис.21), после «развязки» подключаются к этому же узлу 1 через промежуточную звезду сопротивлений ($\pm jx_{M_{12}}$). Если одноименные зажимы магнитно-связанных катушек одинаково ориентированы по отношению к узлу, к которому они подсоединены, то при развязке связей в ветви с индуктивно-связанными катушками включаются реактивные сопротивления ($-jx_{M_{12}}$), а в общую ветвь, исходящую из узла 1, включается сопротивление ($+jx_{M_{12}}$), и наоборот.

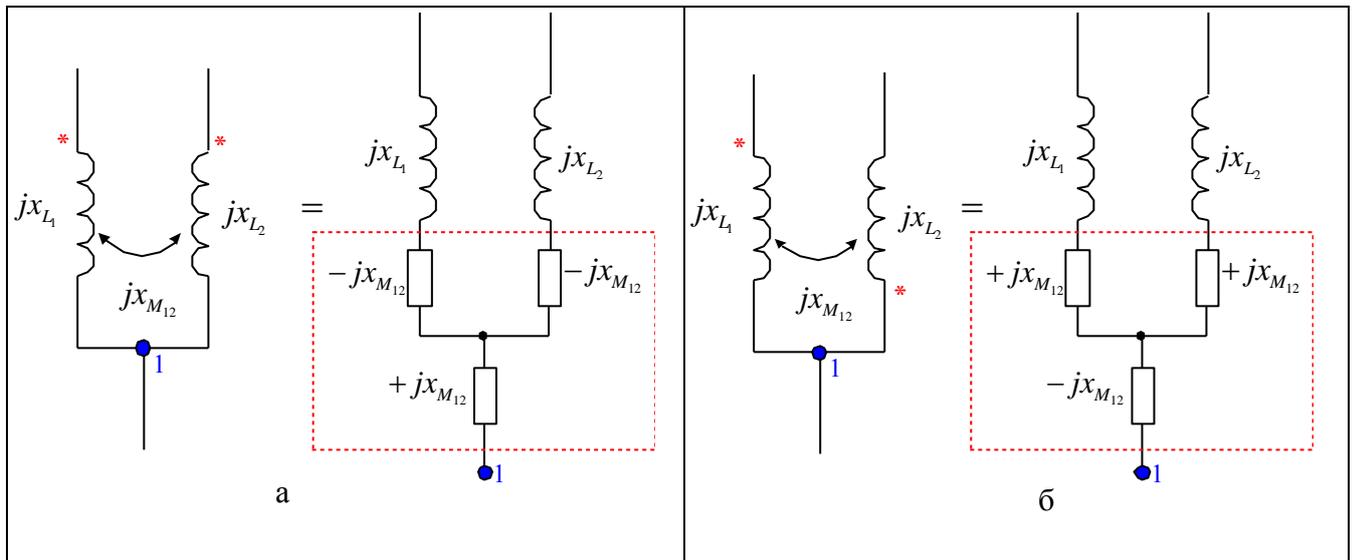


Рис.21

Рис.21 (а,б) иллюстрирует «развязку» магнитных связей для обоих случаев.

В результате развязки магнитных связей схема рис.20 принимает вид, показанный на рис.22.

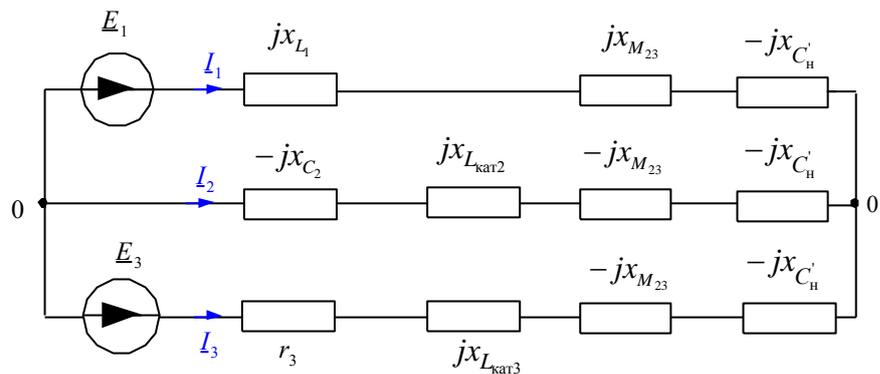


Рис.22

Наиболее просто полученная схема рассчитывается методом узловых потенциалов. Если принять потенциал φ_0 равным нулю, то уравнение для узла «01» по методу узловых потенциалов будет иметь вид:

$$\varphi_{01} \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) = \frac{E_1}{Z_1} + \frac{E_3}{Z_3}, \quad (7)$$

где Z_1, Z_2, Z_3 - комплексные сопротивления отдельных ветвей схемы (рис.22):

$$Z_1 = jx_{L_1} - jx_{C'_H} + jx_{M_{23}} = j\omega L_1 - j\frac{1}{\omega C'_H} + j\omega M_{23} =$$

$$= j500 \cdot 0,1 - j \frac{1}{500 \cdot 3 \cdot 9,524 \cdot 10^{-6}} + j500 \cdot 0,14 = j50 - j70 + j70 = j50 \text{ Ом}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_2 &= -jx_{C_2} + jx_{L_{кат2}} - jx_{M_{23}} - jx_{C'_H} = -j \frac{1}{\omega C_2} + j\omega L_{кат2} - j\omega M_{23} - j \frac{1}{\omega C'_H} = \\ &= -j \frac{1}{500 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} + j500 \cdot 0,14 - j500 \cdot 0,14 - j \frac{1}{500 \cdot 3 \cdot 9,524 \cdot 10^{-6}} = -j110 \text{ Ом}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_3 &= r_3 + jx_{L_{кат3}} - jx_{M_{23}} - jx_{C'_H} = r_3 + j\omega L_{кат3} - j\omega M_{23} - j \frac{1}{\omega C'_H} = \\ &= 40 + j500 \cdot 0,16 - j500 \cdot 0,14 - j \frac{1}{500 \cdot 3 \cdot 9,524 \cdot 10^{-6}} = 40 - j60 = 72,11 \angle -56,31^\circ \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом (8) ÷ (10) уравнение (7) приобретает вид:

$$\underline{\varphi}_{0_1} \left(\frac{1}{j50} + \frac{1}{-j110} + \frac{1}{72,11 \angle -56,31^\circ} \right) = \frac{141 \angle 90^\circ}{\sqrt{2} \cdot j50} + \frac{141 \angle -315^\circ}{\sqrt{2} \cdot 72,11 \angle -56,31^\circ}. \quad (11)$$

Определив из уравнения (11) потенциал узла «0₁»

$$\underline{\varphi}_{0_1} = 284,92 \angle 33,53^\circ \text{ В},$$

можно рассчитать комплексы токов в ветвях схемы (рис.22), используя закон Ома:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{(\underline{\varphi}_0 - \underline{\varphi}_{0_1}) + \underline{E}_1}{\underline{Z}_1} = \frac{-\underline{\varphi}_{0_1} + \underline{E}_1}{\underline{Z}_1} = \frac{-284,92 \angle 33,53^\circ + \frac{141}{\sqrt{2}} \angle 90^\circ}{j50} = 4,886 \angle 103,58^\circ \text{ А}, \\ \underline{I}_2 &= \frac{(\underline{\varphi}_0 - \underline{\varphi}_{0_2})}{\underline{Z}_2} = \frac{-\underline{\varphi}_{0_1}}{\underline{Z}_2} = \frac{-284,92 \angle 33,53^\circ}{-j110} = 2,59 \angle -56,47^\circ \text{ А}, \\ \underline{I}_3 &= \frac{(\underline{\varphi}_0 - \underline{\varphi}_{0_1}) + \underline{E}_3}{\underline{Z}_3} = \frac{-\underline{\varphi}_{0_1} + \underline{E}_3}{\underline{Z}_3} = \frac{-284,92 \angle 33,53^\circ + \frac{141}{\sqrt{2}} \angle -315^\circ}{72,11 \angle -56,31^\circ} = 2,607 \angle -96,23^\circ \text{ А}. \end{aligned}$$

Проверка:

Найденные значения токов удовлетворяют первому закону Кирхгофа для любого из узлов рассматриваемой схемы:

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_2 - \underline{I}_3,$$

$$4,886 \angle 103,58^\circ = -2,59 \angle -56,47^\circ - 2,607 \angle -96,23^\circ,$$

$$-1,1472 + j4,749 = -1,1477 + j4,75,$$

с погрешностью (как для мнимой, так и для действительной частей тождества) менее 0,2%, что

Перед расчетом схему (рис.22) рекомендуется привести к виду, показанному на рис.23, объединив в каждой ветви последовательно соединенные сопротивления в одно эквивалентное. При расчете символическим методом все операции осуществляются в комплексной форме (см. приложение3).

свидетельствует о достаточной точности расчета.

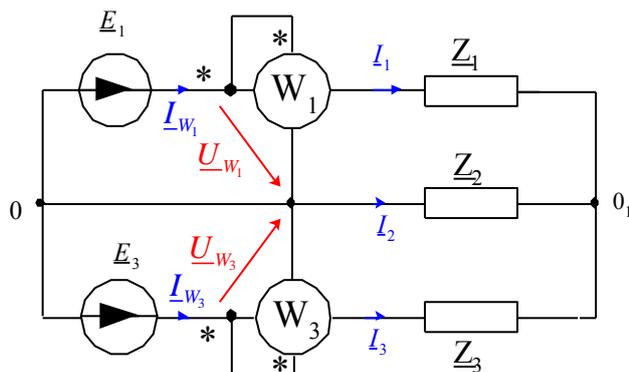


Рис.23

2.3.4. Баланс мощности

Баланс полной мощности в комплексной форме представляется в виде

$$\underline{S}_{\text{ист}} = \underline{S}_{\text{потр}},$$

где $\underline{S}_{\text{ист}} = \sum_n \underline{E}_n \cdot \underline{I}_n^* = \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^* + \underline{E}_3 \cdot \underline{I}_3^*$ - суммарная комплексная мощность источников ЭДС;

$\underline{S}_{\text{потр}} = \sum_n \underline{U}_n \cdot \underline{I}_n^* = \sum_n I_n^2 \cdot \underline{Z}_n = I_1^2 \cdot \underline{Z}_1 + I_2^2 \cdot \underline{Z}_2 + I_3^2 \cdot \underline{Z}_3$ - суммарная мощность потребителей;

\underline{U}_n и \underline{I}_n - комплексы напряжения и тока в комплексном сопротивлении \underline{Z}_n ;

\underline{I}_n^* - сопряженный комплекс тока, I_n - действующее значение тока (модуль комплексного тока).

Комплексные мощности источников и потребителей рекомендуется представить в алгебраической форме записи для оценки их активных и реактивных составляющих: $\underline{S} = P + jQ$.

Для рассматриваемого примера

$$\underline{S}_{\text{ист}} = P_{\text{ист}} + jQ_{\text{ист}} = \frac{141}{\sqrt{2}} \angle 90^\circ \cdot 4,89 \angle -103,58^\circ + \frac{141}{\sqrt{2}} \angle -315^\circ \cdot 2,607 \angle 96,23^\circ = 271,68 + j48,53 \text{ ВА},$$

$$\underline{S}_{\text{потр}} = P_{\text{потр}} + jQ_{\text{потр}} = 4,886^2 \cdot j50 + 2,59^2 \cdot (-j110) + 2,607^2 \cdot (40 - j60) = 271,77 + j47,97 \text{ ВА}.$$

Баланс активной мощности (оценка сверху) выполняется с погрешностью:

$$\xi_P = \frac{P_{\text{потр}} - P_{\text{ист}}}{P_{\text{ист}}} \cdot 100\% = \frac{271,77 - 271,68}{271,68} \cdot 100\% = 0,033\%,$$

баланс реактивной мощности выполняется с точностью:

$$\xi_Q = \frac{Q_{\text{ист}} - Q_{\text{потр}}}{Q_{\text{потр}}} \cdot 100\% = \frac{48,53 - 47,97}{47,97} \cdot 100\% = 1,16\%$$

2.3.5. Показания ваттметров

Показания ваттметров следует определять по выражению $P_W = \text{Re}(\underline{U}_W \cdot \underline{I}_W^*)$, или по соотноше-

нию $P_W = U_W I_W \cos\left(\overrightarrow{U}_W \overset{\wedge}{\overrightarrow{I}_W}\right)$, где \underline{U}_W - комплексное напряжение на обмотке напряжения ватт-

метра; \underline{I}_W^* - сопряженный комплексный ток, протекающий по токовой обмотке ваттметра.

$P_W > 0$, если ток I_W втекает в генераторный зажим токовой обмотки ваттметра (обозначен «*»), а напряжение U_W направлено от генераторного зажима обмотки напряжения ваттметра.

Для рассматриваемой схемы (рис.23):

$$\underline{U}_{W_1} = \underline{E}_1 = \frac{141}{\sqrt{2}} \angle 90^\circ \text{ В}, \quad \underline{I}_{W_1} = \underline{I}_1 = 4,886 \angle 103,58^\circ \text{ А},$$

$$\underline{U}_{W_3} = \underline{E}_3 = \frac{141}{\sqrt{2}} \angle -315^\circ \text{ В}, \quad \underline{I}_{W_3} = \underline{I}_3 = 2,607 \angle -96,23^\circ \text{ А}.$$

Следовательно,

$$P_{W_1} = \operatorname{Re}(\underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^*) = \operatorname{Re}\left(\frac{141}{\sqrt{2}} \angle 90^\circ \cdot 4,886 \angle -103,58^\circ\right) = 474,94 \text{ Вт},$$

$$P_{W_2} = \operatorname{Re}(\underline{E}_3 \cdot \underline{I}_3^*) = \operatorname{Re}\left(\frac{141}{\sqrt{2}} \angle -315^\circ \cdot 2,607 \angle 96,23^\circ\right) = -203,26 \text{ Вт}.$$

Рекомендуемая форма представления результатов расчета задания №2

Результаты расчета

Методы расчета	Расчетные величины						
	\underline{Z}_1	\underline{Z}_2	\underline{Z}_3	\underline{U}_{020}	\underline{I}_1	\underline{I}_2	\underline{I}_3
1. Символический							
2. Баланс мощности	$P_{\text{ген}}$		$Q_{\text{ген}}$		$P_{\text{потр}}$		$Q_{\text{потр}}$
3. Показания ваттметров	P_{W1}			P_{W2}			

где

- $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ - комплексы сопротивления ветвей исследуемой цепи после «развязки» магнитных связей,
- \underline{U}_{010} —комплекс разности потенциалов узловых точек рассматриваемой схемы,
- $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3$ —комплексы токов в ветвях с сопротивлениями $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$,
- $P_{\text{ген}}$ – активная мощность, генерируемая источниками ЭДС,
- $Q_{\text{ген}}$ – реактивная мощность, генерируемая источниками ЭДС,
- $P_{\text{потр}}$ – активная мощность, потребляемая в схеме,
- $Q_{\text{потр}}$ – реактивная мощность, потребляемая в цепи,
- P_{W1}, P_{W2} – показания ваттметров,
- \underline{I}_k – комплекс тока, для которого строится круговая диаграмма при $Z_2=0$,
- \underline{I}_x – комплекс тока, для которого строится круговая диаграмма при $Z_2=\infty$,

- Z_{ex} – комплекс входного сопротивления схемы относительно зажимов меняющегося сопротивления.

Приложение 3

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА РАБОТЫ С КОМПЛЕКСНЫМИ ЧИСЛАМИ

1. Комплексные числа (К.Ч.) используются для расчета символическим методом установившихся режимов в линейных электрических цепях при действии гармонических источников энергии.
2. Комплексному числу в алгебраической форме $\underline{A}=a+jb$ или в показательной форме $\underline{A}=Ae^{j\varphi}$ соответствует точка на комплексной плоскости $M(a, jb)$.

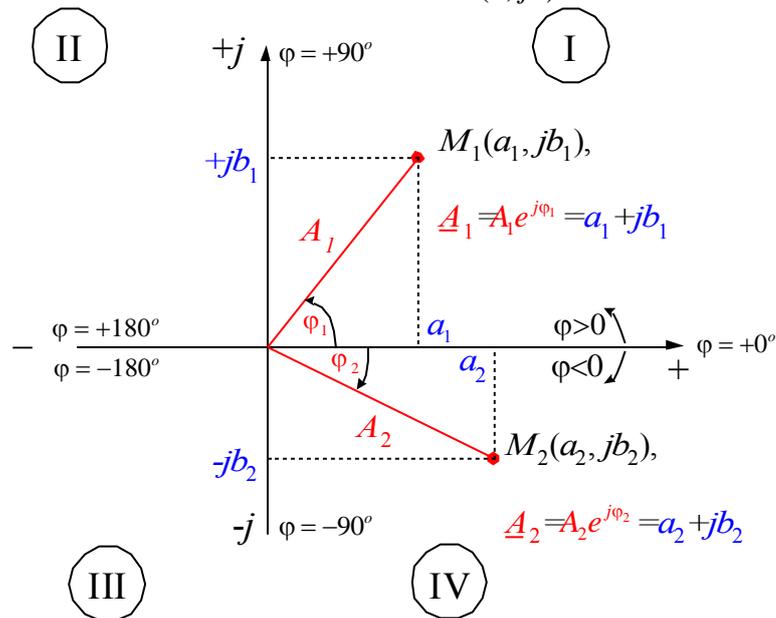


Рис.29

Из рис.29 видно, что при переходе от алгебраической формы к показательной справедливы соотношения, получаемые из прямоугольного треугольника:

$$\text{модуль К.Ч. } A = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad (14)$$

$$\text{аргумент К.Ч. } \operatorname{tg}\varphi = \frac{b}{a}, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{a} \quad (15)$$

$$A = \frac{a}{\cos \varphi} \quad \text{или} \quad A = \frac{b}{\sin \varphi} \quad (16)$$

При обратном переходе от показательной формы к алгебраической:
действительная часть К.Ч. $a = \operatorname{Re}(\underline{A}) = A \cos \varphi$ (17)

мнимая часть К.Ч. $b = \operatorname{Im}(\underline{A}) = A \sin \varphi$ (18)

3. Из анализа приведенных формул следуют важные соотношения:

а) $1 = e^{j0^\circ} = e^{j360^\circ} = e^{-j360^\circ}$;

б) $-1 = e^{+j180^\circ} = e^{-j180^\circ} = j \cdot j$;

в) $j = \sqrt{-1} = e^{j90^\circ}$;

$$\text{г) } -j = e^{-j90^\circ} = \frac{1}{j};$$

$$\text{д) если } \varphi=0, \underline{A}=a;$$

$$\text{е) если } \varphi=90^\circ, \underline{A}=jb;$$

$$\text{ж) если } \varphi=\pm 180^\circ, \underline{A}=-a;$$

$$\text{з) если } \varphi=-90^\circ, \underline{A}=-b;$$

4. Сложение и вычитание комплексных чисел удобно производить в алгебраической форме, а умножение и деление – в показательной. Поэтому необходимо уметь переходить от одной формы к другой.

5. Перевод К.Ч. из алгебраической формы в показательную.

Задано $\underline{A}=a+jb$, получить $\underline{A}=Ae^{j\varphi}$. В основе требуемого перевода лежат формулы (14,15 или (15,16).

Расчет по заданным формулам удобнее всего вести на микрокалькуляторах, имеющих функции «arcsin», «arccos» или «arctg». Не следует забывать, что значения аргументов указанных функций должно находиться в пределах $(-90^\circ) \div (+90^\circ)$. Для этого действительная часть комплексного числа должна быть больше нуля. Например, если задано число $\underline{A}=-4+j3$, его следует привести к виду $\underline{A}=-(4-j3)$, и затем все операции проводить с числом в скобках.

Контрольные примеры:

- $4-j3 = 5e^{-j36,9^\circ}$;
- $-4+j3 = -(4-j3) = -5e^{-j36,9^\circ} = 5e^{-j36,9^\circ} \cdot e^{-j180^\circ} = 5e^{-j216,9^\circ}$;
- $3+j4 = 5e^{j53,1^\circ}$;
- $-4-j3 = -(4+j3) = -5e^{j36,9^\circ} = 5e^{j36,9^\circ} \cdot e^{j180^\circ} = 5e^{j216,9^\circ}$;
- $4+j0,3 = 4,01e^{j4,28^\circ}$;
- $400+j3000 = 3020e^{j82,4^\circ}$.

6. Перевод К.Ч. из показательной формы в алгебраическую.

Задано $\underline{A}=Ae^{j\varphi}$, получить $\underline{A}=a+jb$. В основе требуемого перевода лежат формулы (17,18).

Контрольные примеры:

- $5e^{j36,9^\circ} = 4+j3$;
- $12,1e^{j53,8^\circ} = 7,15+j9,76$;
- $6,15e^{j128,4^\circ} = (3,84-j4,92)$;
- $5e^{-j36,9^\circ} = 4-j3$;
- $5e^{-j216,9^\circ} = -(4-j3)$;
- $500e^{j36,9^\circ} = 400+j300$.