

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра теоретических основ электротехники

Построение векторной диаграммы. Расчёт цепей переменного тока графоаналитическим методом.
Построение топографической диаграммы напряжений

Методические указания по курсу «Электротехника»
для студентов всех специальностей БГУИР

Минск 2002

Содержание

Введение

1. Графоаналитический метод расчета
2. Топографическая диаграмма
3. Векторная диаграмма сложной электрической цепи.

ЛИТЕРАТУРА

Библиотека БГУИР

Введение

Расчеты в цепях с синусоидальными напряжениями и токами упрощаются, если вместо синусоид оперировать с их изображениями – вращающимися векторами (Рис. 1).

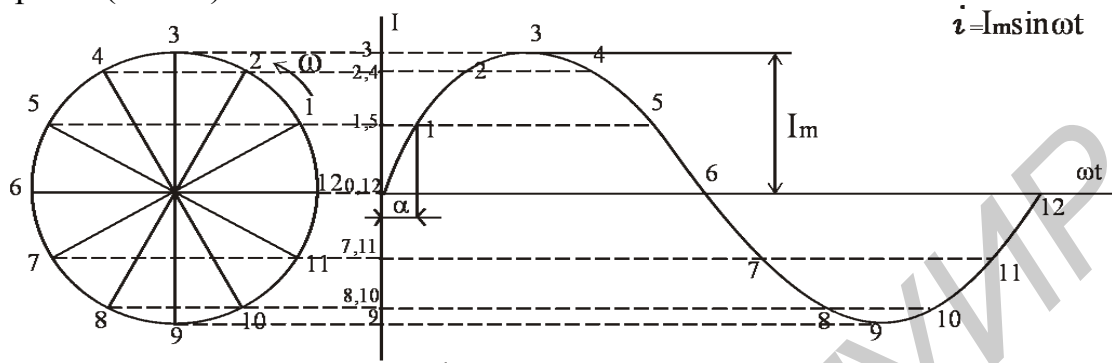


Рис. 1

Проекция конца вектора на ось координат совершает синусоидальные колебания : каждое мгновенное значение тока, соответствующее моменту времени t и фазовому углу ωt , можно рассматривать как проекцию на ось ординат вектора, повернувшегося на фазовый угол относительно оси абсцисс.

Таким образом, синусоидальная функция условно представляется вектором, длина которого определяется максимальным или действующим ее значением, а направление – ее начальной фазой; положительная начальная фаза откладывается от горизонтальной оси в сторону вращения векторов (против часовой стрелки). Векторы токов и напряжений, вращаясь с одной и той же

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad \sum_{k=1}^n E_k = \sum_{s=1}^n U_s.$$

угловой скоростью ω , неподвижны относительно друг друга. Условное изображение синусоидально изменяющихся во времени токов и напряжений при помощи векторов позволило записать в векторной форме первый и второй законы Кирхгофа.

Алгебраическому суммированию синусоид, т.е. суммированию их мгновенных значений, соответствуют геометрические действия над изображающими их векторами. Применение в этой форме законов Кирхгофа дает возможность путем построения векторных диаграмм достаточно просто и наглядно рассчитывать электрические цепи. Приступая к графическому расчету цепей переменного тока, следует помнить, что физические процессы на участках цепи с сопротивлением, индуктивностью, емкостью весьма различны.

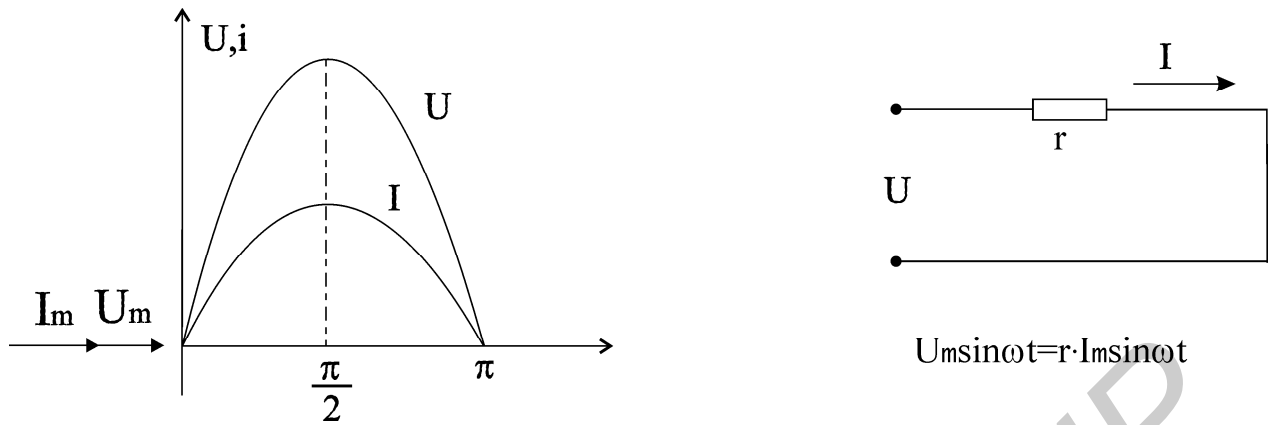


Рис.2

Соответственно вектор тока и вектор напряжения имеют одно направление.

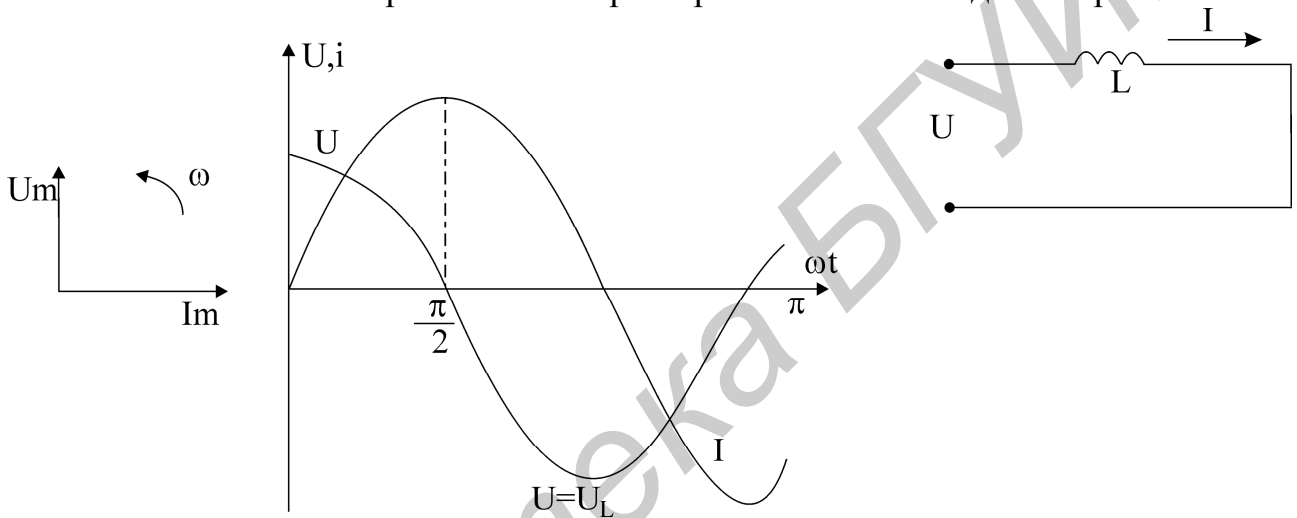


Рис.3

В индуктивном элементе ток отстает от напряжения на 90^0 и соответственно располагаются векторы (рис.3). Закон Ома для участка цепи только с индуктивным сопротивлением записывается $U_L = \omega L \cdot I$.

В емкостном элементе

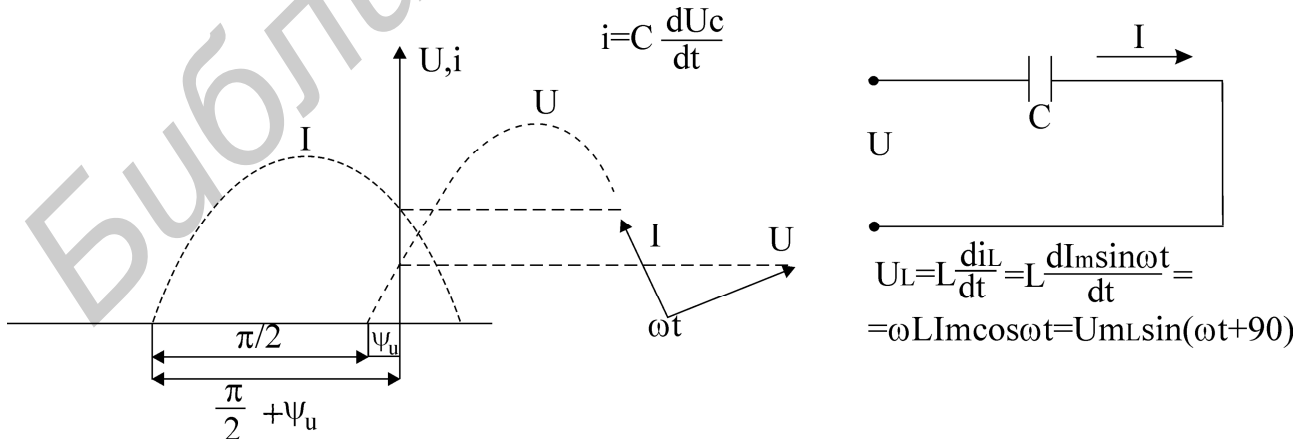


Рис.4

В активном сопротивлении ток и напряжение совпадают по фазе (рис.2). ток опережает напряжение на 90^0 (расположение вектора напряжения и тока показано на рис.4); закон Ома для участка цепи только с емкостным сопротивлением записывается $I_m = \omega C \cdot U_m$ или $U_c = 1/\omega c \cdot I$.

Рассмотрим расчет разветвленных электрических цепей с помощью векторных диаграмм.

1. Графоаналитический метод расчета

Графоаналитический метод расчета – это совокупность графического метода и метода пропорционального пересчета. Метод основан на том, что в линейной цепи токи пропорциональны напряжениям, векторная диаграмма напряжений и токов, рассчитанная и построенная для одного значения питающего цепь напряжения, сохранит свой вид при изменении величины этого напряжения, на диаграмме при этом изменятся лишь масштабы напряжений и токов.

Пример 1. Для цепи (рис.5) известны параметры

$R_1 = 8 \text{ Ом}$; $X_{C1} = 6 \text{ Ом}$; $X_{L1} = 10 \text{ Ом}$; $X_{L2} = 8 \text{ Ом}$; $R = 4 \text{ Ом}$; $X_{C1} = 9,1 \text{ Ом}$;

$U = U_m \sin(\omega t + 60^\circ) \text{ В}$.

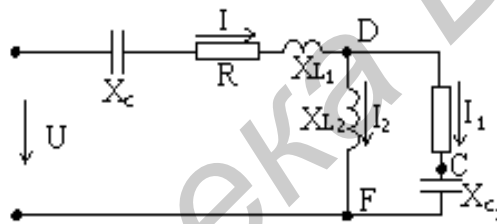


Рис.5

Требуется определить действующее значение токов ветвей, напряжений на участках цепи, начальные фазы токов и напряжений.

Построение векторной диаграммы начинается с наиболее удаленного источника элемента цепи, как говорят, с «конца» схемы. Принимаем масштабы для тока $m_i = 0,2 \text{ А/см}$ и для напряжения $m_U = 2 \text{ В/см}$. Задаем значение тока в ветви $I_1 = 1 \text{ А}$, определяем и строим на диаграмме напряжения на участках ветви d e f.

Падение напряжения на емкостном сопротивлении равно по величине $U_{ef} = X_{C1} I_1 = 6 \text{ В}$ и отстает по фазе от тока I_1 на 90° (вектор U_{ef} на диаграмме).

Падение напряжения на r_1 по величине равно $U_{ef} = r_1 I_1 = 8 \text{ В}$ и совпадает по фазе с током I_1 . Вектор напряжения ориентируем на диаграмме относительно тока I_1 . Сумма векторов U_{ef} и U_{de} определяет напряжение на участке $U_{df} = U_{ef} + U_{de} = U_{df}$. Из диаграммы по масштаб m_U определяем величину напряжения $U_{df} = 10 \text{ В}$. Далее используем закон Ома для участка цепи с сопротивлением X_{L2} , находим ток I_2 , так как $U_{df} = X_{L2} I_2$, то $I_2 = U_{df} / X_{L2} = 10/8 = 1,25 \text{ А}$.

Для узла d уравнение по первому закону Кирхгофа запишется $I = I_1 + I_2$.

Входное напряжение имеет начальную фазу $+60^\circ$, учтем это и построим ось отсчета углов начальных фаз. К вектору напряжения U_{af} проведем луч $f0$ из начала построения (точка f) под углом 60° , луч $f0$ будет осью отсчета углов начальных фаз всех токов и напряжений.

Пользуясь векторной диаграммой, можно записать мгновенные значения всех рассчитанных величин. Например, ток во второй ветви:

$$i_2(t) = \sqrt{2} \cdot I \sin(\omega t + \psi_i) = \sqrt{2} \cdot 1,25 \sin(\omega t - 20^\circ) \quad \psi_{i_2} = -20^\circ.$$

Напряжение участка df $U_{df} = \sqrt{2} \cdot 10 \sin(\omega t + 62^\circ)$ и т.д.

Построенная в такой последовательности векторная диаграмма напряжений носит название топографической.

2. Топографическая диаграмма

Топографические диаграммы представляют собой диаграммы комплексных потенциалов, причем каждой точке схемы соответствует определенная точка на топографической диаграмме.

Топографическая диаграмма позволяет измерить величину и начальную фазу напряжения любого участка цепи, не участвующего в расчете. Например,

$$U_{cf} = \sqrt{2} 19 \sin(\omega t + 95^\circ) \text{ В}$$

действующее значение напряжения между точками c и f схемы $U_{cf} = 19\text{В}$ и начальная фаза его $\psi = +95^\circ$, тогда

Рассмотрим пример построения топографической диаграммы на комплексной плоскости.

Пример 2. Дана цепь (рис.7), её параметры:

$E = 160 \text{ В}$; $X_{L1} = 36 \text{ Ом}$; $X_{L2} = 32 \text{ Ом}$; $X_{L3} = 12 \text{ Ом}$; $X_{C1} = 24 \text{ Ом}$; $X_{C2} = 10 \text{ Ом}$; $X_{C3} = 24 \text{ Ом}$; $R_1 = 24 \text{ Ом}$; $R_2 = 8 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; $Z_1 = 45,5e^{j18,44} \text{ Ом}$.

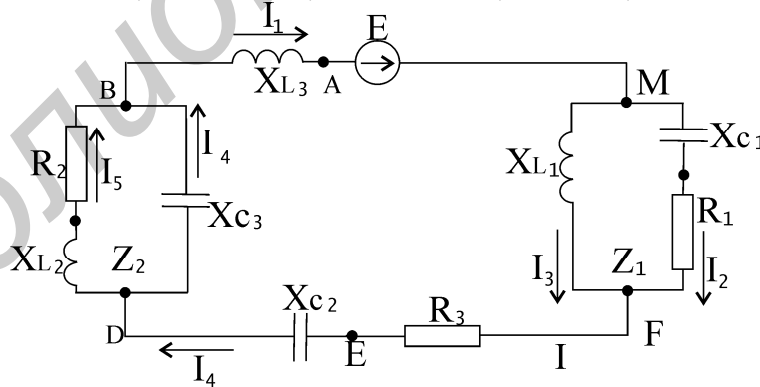


Рис.7

Комплексным методом рассчитаем токи цепи:

$$I_1 = 1,61e^{j26} \text{ А}; I_2 = 2,15e^{j89,4} \text{ А}; I_3 = 2,04e^{-j45,6} \text{ А}; I_4 = 4,7e^{57j} \text{ А}; I_5 = 3,4e^{-j103} \text{ А};$$

Строим на векторной плоскости диаграмму токов в масштабе $m_i=0,5 \text{ А/см}$ (рис.8). Для построения топографической диаграммы напряжений принимаем потенциал узла "а" равным нулю, $\varphi_a = 0$.

Тогда точка "а" будет находиться в начале координат комплексной плоскости. Вычислим комплексы напряжений на каждом из элементов цепи, обходя из точки "а" цепь против направления тока I_1 . При таком направлении обхода напряжение U_{ba} на сопротивлении X_{L3} :

$$U_{ba} = j X_{L3} I_1 = 19,3e^{j116} \text{ В.}$$

Строим вектор U_{ba} на комплексной плоскости (рис.8).

Из точки "а" под углом 116° к действительной полуоси $+1$ откладываем модуль $U_{ba} = 19,3 \text{ В}$ в масштабе $m_u = 10\text{В/см}$. Вершина построенного вектора соответствует точке "b". Стрелку вектора U_{ba} следует направить к точке "b", т.е. противоположно направлению стрелки напряжения U_{ba} на схеме цепи. топографической диаграмме вектор U_{ba} должен опережать по фазе вектор тока I_1 на 90° . Находим напряжение на сопротивлении r_2 :

$$U_{cb} = r_2 I_5 = 27,2e^{-j109} \text{ В.}$$

По полученному выражению из точки "b" строим вектор U_{cb} . Вершиной вектора U_{cb} является точка "с".

Контроль построения: вектор U_{cb} должен совпадать по фазе с вектором тока I_5 . Теперь находим напряжение на индуктивности X_{L2} :

$$U_{dc} = j X_{L2} I_5 = 108,8e^{-j19} \text{ В.}$$

Из точки "с" строим вектор U_{dc} . Вершиной построенного вектора является точка "d".

Контроль построения: вектор U_{dc} должен опережать по фазе вектор тока I_5 на 90° . Переходя по контуру в выбранном направлении, находим последовательно положение точек "e", "f", "k", "m" на комплексной плоскости. Вектор, соединяющий начало координат и точку "m", представляет собой ЭДС источника $E = U_{ma} = 160 \text{ В}$.

Пользуясь топографической диаграммой, легко определить напряжения между любыми точками цепи. Например, комплекс напряжения U_{mc} определяется вектором, соединяющим точки "с" и "m" и направленным к точке "m" (показан на рис.8 пунктиром). Измеряя на диаграмме модуль и начальную фазу вектора U_{mc} , находим $U_{mc} = 117e^{j5} \text{ В}$.

Пример 3. Рассмотрим расчет цепи на рис.7 графоаналитическим методом

Зададимся условным значением тока I_5 , пусть $I_5 = 1 \text{ А}$. В масштабе $m_i = 0,5\text{А/см}$ строим значение тока I_5 , полагая, что точка "b" находится в начале координат. Выбранному условному значению тока I_5 однозначно соответствуют условные значения всех остальных токов и напряжений в цепи. Эти напряжения и токи снабжаем меткой "штрих". Находим напряжение U'_{cb} . $U'_{cb} = r_2 I'_5 = 8\text{В}$.

В масштабе $m_u = 2,5\text{В/см}$ строим вектор напряжения U'_{cb} , совпадающий по фазе с вектором тока I'_5 (рис.9).

Вычислив напряжение $U'_{cd} = I'_5 X_{L2} = 32 \text{ В}$, строим вектор напряжения U'_{dc} , опережающий по фазе вектор тока I_5 на 90° . Соединив точки "b" и "d", получаем вектор U'_{db} . Измеряя линейкой его длину с учетом масштаба

напряжений, находим $U'_{db} = 33\text{В}$. По закону Ома находим ток $I'_4 : I'_4 = U'_{cb} / X_{c3} = 33/24 = 1,37\text{ А}$.

Из конца вектора тока I_5 строим вектор тока I'_4 , опережающий по фазе вектор напряжения U'_{db} на 90° . Векторно суммируя токи I'_4 и I'_5 находим ток I'_1 . Измеряя линейкой длину вектора тока I'_1 , находим $I'_1 = 0,47\text{А}$. Зная токи I'_1 , вычисляем напряжения $U'_{ed} = I'_1 \cdot X_{c2} = 4,7\text{ В}$; $U'_{fe} = I'_1 \cdot r_3 = 4,7\text{ В}$.

Библиотека БГУИР

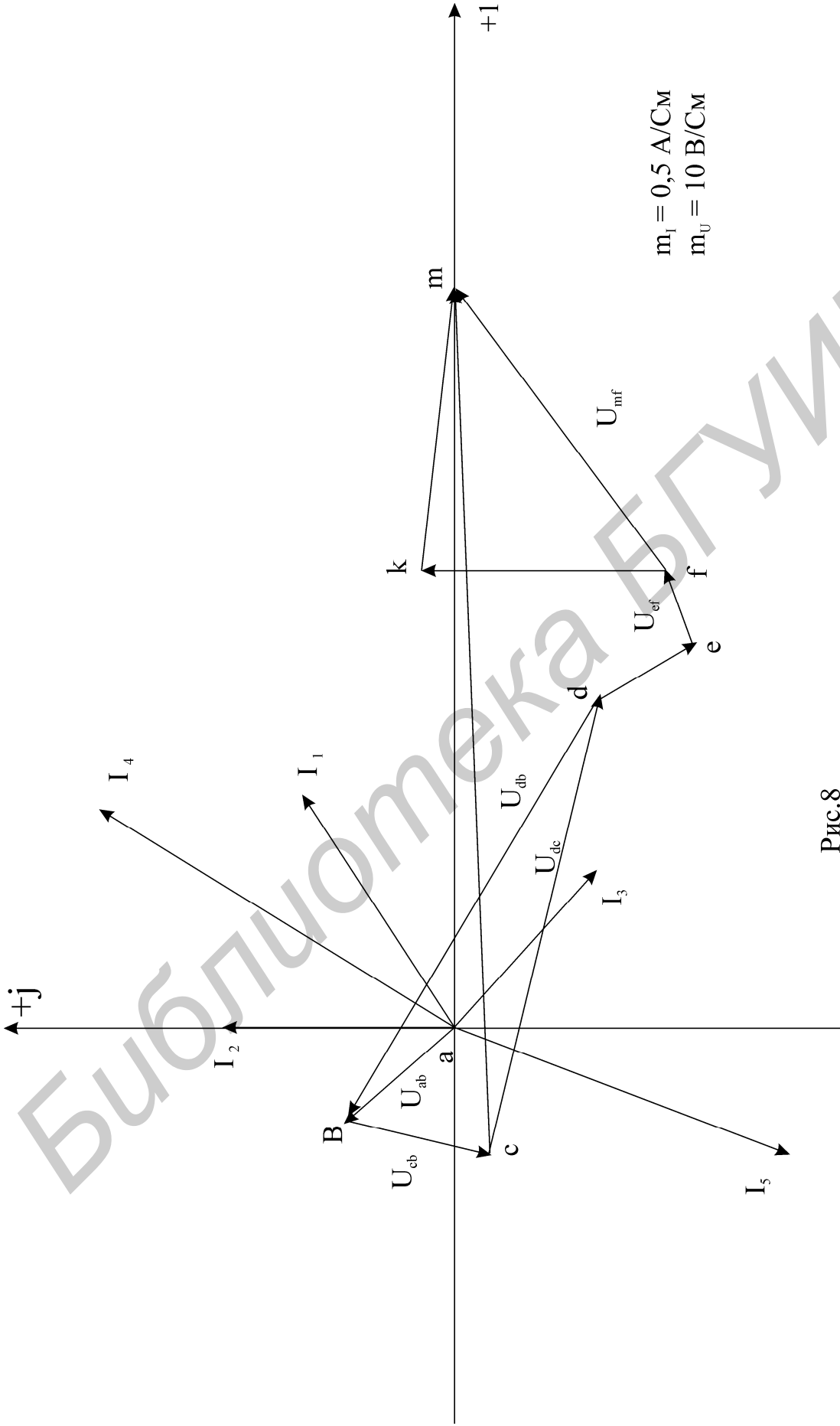


Рис.8

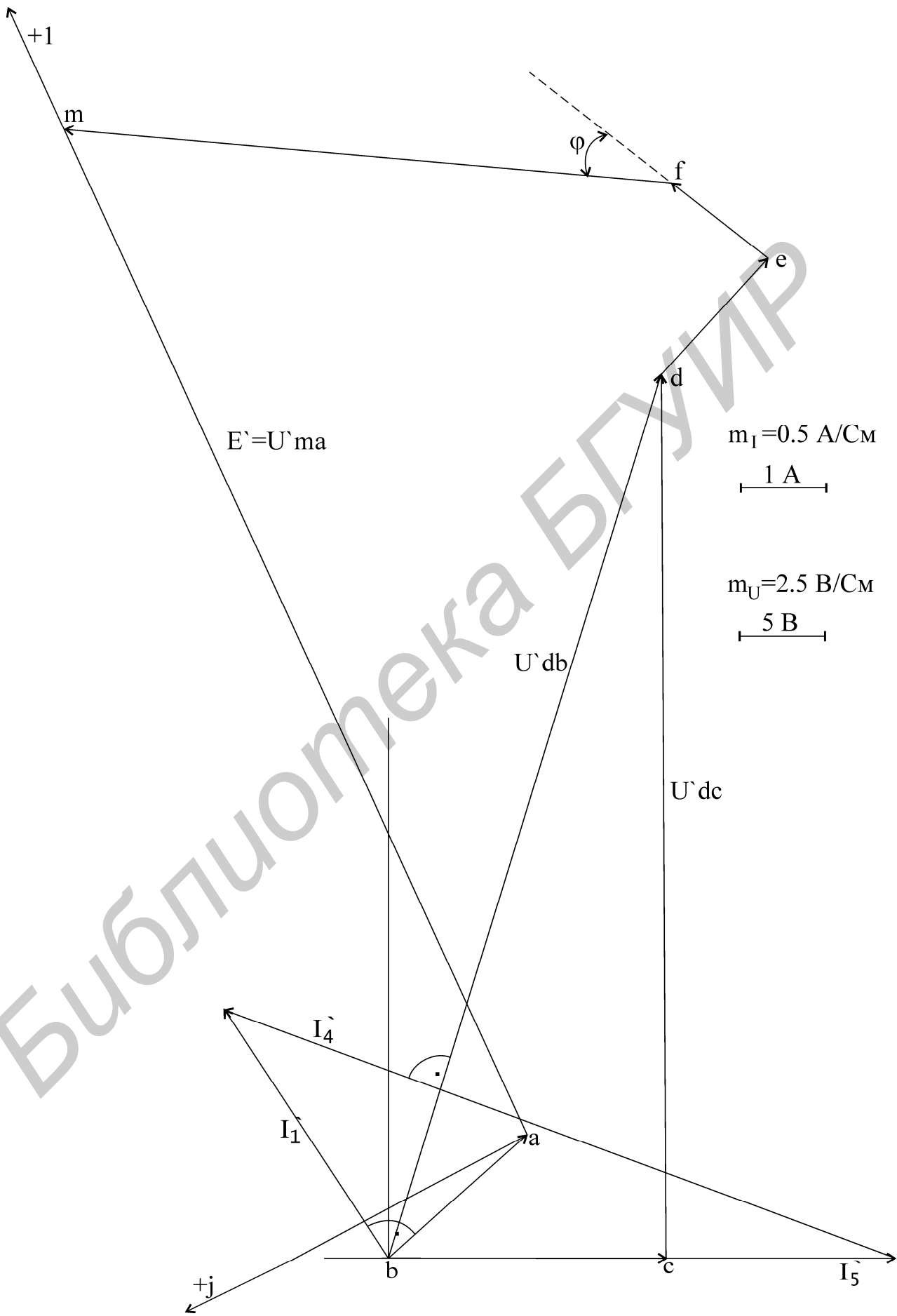


Рис.9

Из точки “d” строим вектор напряжения U'_{ed} , отстающего по фазе от тока I'_1 на 90° и вектор напряжения U'_{fe} , совпадающего по фазе с током I'_1 . Чтобы определить токи I'_3 и I'_2 для участка m-f цепи, построим дополнительную векторную диаграмму ($m_u=5\text{В/см}$, $m_i=0,5\text{ А/см}$). Пусть $I''_2=1\text{А}$. Тогда $U''_{kf}=I''_2 \cdot r_1 = 24\text{ В}$; $U''_{mk}=I''_2 \cdot X_{c1} = 24\text{ В}$.

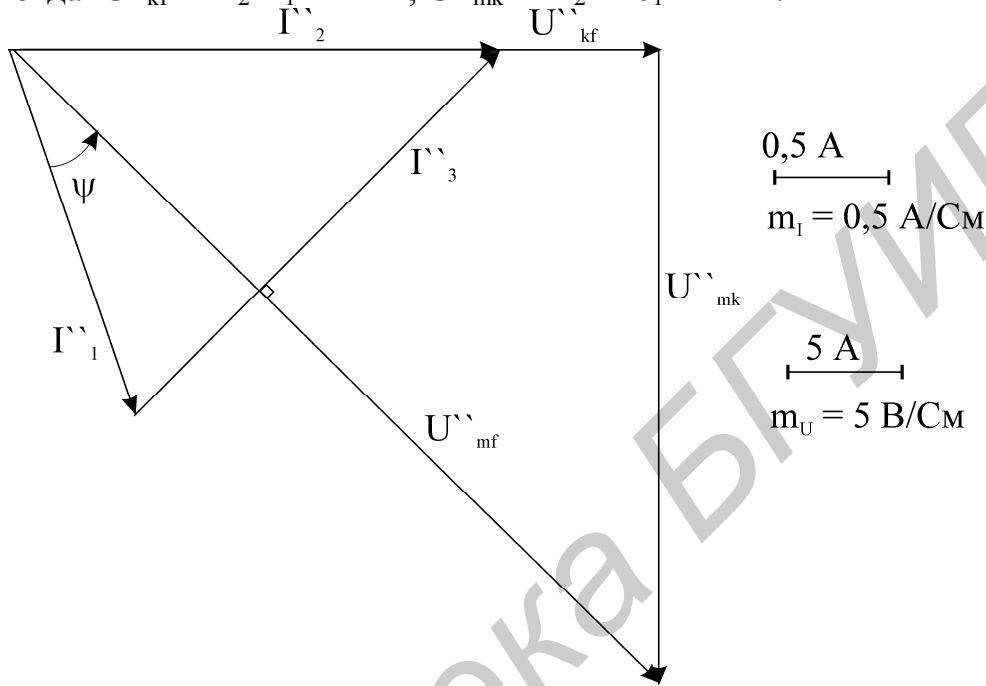


Рис.10

С учетом фазовых соотношений между током I''_2 и напряжениями U''_{kf} и U''_{mk} строим диаграмму (рис.10). Измеряя длину вектора U''_{mf} , с учетом масштаба напряжений находим его величину $U''_{mf} = 34\text{ В}$. Тогда величина тока I''_3 определяется следующим образом $I''_3 = U''_{mf}/X_{L1} = 34/36 = 0,94\text{ А}$.

Построив вектор I''_3 и суммируя векторы токов I''_2 и I''_3 , из диаграммы на рис.10 находим $I''_1 = 0,72\text{ А}$.

Чтобы привести диаграмму на рис.10 в соответствие с найденными ранее значениями тока I'_1 , находим коэффициент пересчета $K' = I'_1/I''_1 = 0,47/0,72 = 0,65$.

Умножая длины всех векторов на рис.10 на коэффициент K' и сохраняя неизменными фазовые углы, получим векторную диаграмму участка m-f, соответствующую току I'_1 .

$$I'_2 = I''_2 \cdot K' = 0,65\text{ А};$$

$$I'_3 = I''_3 \cdot K' = 0,61\text{ А};$$

$$U'_{mf} = U''_{mf} \cdot K' = 22\text{ В}.$$

Измеряем угол φ на диаграмме рис.10: $\varphi=20^\circ$.

Под углом $\varphi=20^{\circ}$ по отношению к вектору I'_1 на рис.9 из точки f строим вектор U'_{mf} . Найдем теперь напряжение U'_{ba} :

$$U'_{ba} = I'_1 \cdot X_{L3} = 5,6 \text{ В.}$$

Поскольку напряжение U'_{ba} опережает по фазе ток I'_1 на 90° , то вектор U'_{ba} строится так, как показано на Рис.9. Соединяя точки “а” и “m” получаем вектор $E' = U'_{ma}$. Измеряя его длину находим

$$E' = U'_{ma} = 47 \text{ В.}$$

Векторная диаграмма на рис.9 является также и топографической диаграммой. ЭДС E превышает ЭДС E' в K раз:

$$K = E/E' = 160/47 = 3,4.$$

Поскольку рассчитываемая цепь линейна, то напряжения и токи, вызываемые ЭДС E , превышают условные напряжения U' и токи I' также в $K = 3,4$ раза.

Таким образом

$$I_5 = I'_5 \cdot K = 3,4 \text{ А;}$$

$$U_{db} = U'_{db} \cdot K = 112 \text{ В;}$$

$$I_4 = I'_4 \cdot K = 4,7 \text{ А;}$$

$$U_{ed} = U'_{ed} \cdot K = 17 \text{ В;}$$

$$I_1 = I'_1 \cdot K = 1,6 \text{ А;}$$

$$U_{mf} = U'_{mf} \cdot K = 75 \text{ В;}$$

$$I_2 = I'_2 \cdot K = 2,2 \text{ А;}$$

$$I_3 = I'_3 \cdot K = 2,1 \text{ А.}$$

Чтобы измерить начальные фазы токов и напряжений, следует на рис.9 выбрать такую систему координат, в которой ЭДС E имеет соответствующую заданию начальную фазу. Так как $\psi_e = 0$, то поместив начало координат в точку “а”, действительную полуось совмещаем с направлением ЭДС E , а полуось $+j$ строим ортогонально оси $+1$, как показано на рис.9.

II. Рассмотрим пример построения векторной диаграммы по известным токам и напряжениям (действующие значения напряжений и токов получены экспериментально). В этом случае при помощи векторной диаграммы можно решить обратную задачу расчета цепи: по токам и напряжениям цепи определить эквивалентные параметры двухполюсников, составляющих цепь.

П р и м е р 4. Дана цепь (рис.11), известны показания измерительных приборов. Найдем параметры двухполюсника, эквивалентного данной схеме.

$$U_{r1} = 6 \text{ В; } I = 1,5 \text{ А; } U_{r2} = 8 \text{ В; } I_1 = 1 \text{ А; } U_{r3} = 20 \text{ В; } I_2 = 0,8 \text{ А.}$$

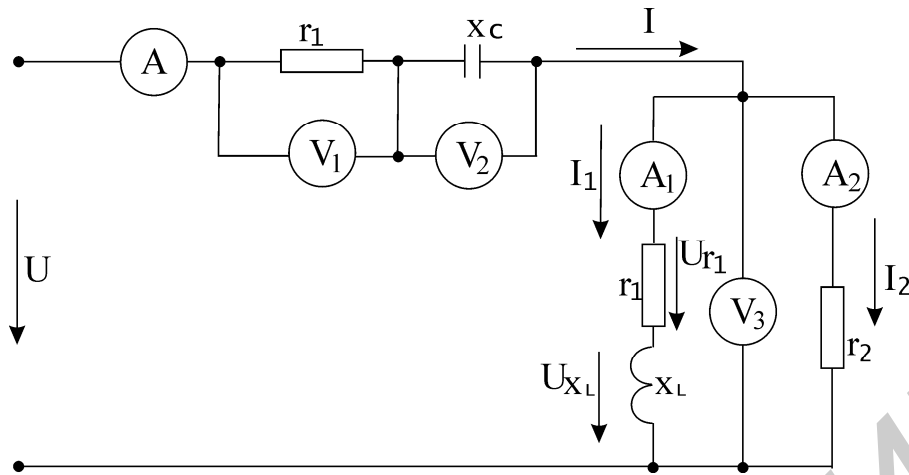


Рис.11

Для данной схемы можно составить три уравнения по законам Кирхгофа:

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & I = I_1 + I_2; \\
 (2) \quad & U = U_{r1} + U_{r2} + U_{r3}; \\
 (3) \quad & U_{r3} = U_{XL} + U_{r3};
 \end{aligned}$$

Решим эти уравнения графически. Построение диаграммы следует начать с построения вектора I_2 , для этой ветви известно взаимное расположение вектора тока и напряжения, участок с активным сопротивлением. В масштабе токов m_I в произвольном направлении строится вектор I_2 . Так как U_{r3} – падение напряжения на активном элементе, оно совпадает по направлению с вектором тока I_2 , в масштабе напряжений m_U , строим этот вектор. Ток I_1 в ветви с индуктивной катушкой отстает от напряжений U_{r3} на некоторый угол φ_L , который неизвестен.

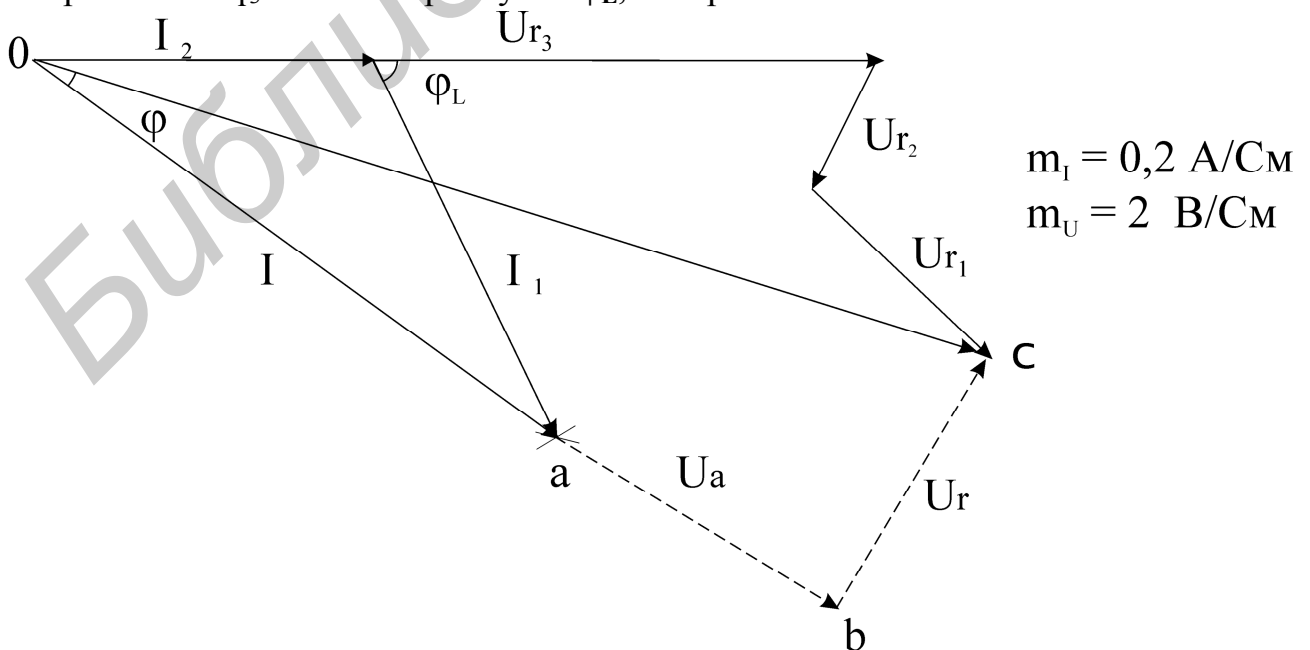


Рис.12

Используя показания амперметров A и A_1 , решаем графически первый закон Кирхгофа (1) методом засечек: из конца вектора тока I_2 делаем засечку радиусом, равным величине тока I_1 в сторону отставания от напряжения U_{r3} , а из начала построения т.О вектора I_2 делаем засечку радиусом, равным току I . Получаем векторную диаграмму токов заданной схемы. Из построения теперь можно определить φ_L – угол сдвига по фазе между током и напряжением на катушке. Далее достраивается диаграмма напряжений: напряжения U_{r1} и U_{r2} известны, U_{r3} – падение напряжения на емкости отстает от вектора тока ветви I на 90° , строим его из конца вектора U_{r2} , U_{r1} – падение напряжения на активном элементе совпадает с током ветви, строим из конца U_{r2} в направлении, параллельном току I . Замыкающий вектор на диаграмме напряжений соединяет начало построения и конец вектора U_{r1} , определяет в масштабе напряжение U на входе схемы, он равен $U = 22$ В. Теперь с помощью треугольников напряжений (сопротивлений), токов (проводимостей), построенных для какого-либо участка цепи или для всей цепи можно найти сопротивления, проводимости и параметры двухполюсника.

Определим эквивалентные параметры всей цепи заданной схемы (см. рис.11) – r, X, Z . Сначала строится треугольник напряжений ОВС: из конца вектора U опускается перпендикуляр на направление вектора тока I и определяется активная и реактивная составляющие напряжения – $U = U_a + U_r$. С учетом масштаба m_U $U_a = 21,6$ В, $U_r = 4,4$ В. По закону Ома можно подсчитать эквивалентное активное сопротивление схемы $R = U_a/I = 21,6/1,5 = 14,4$ Ом, эквивалентное реактивное сопротивление $X = U_r/I = 4,4/1,5 = 2,94$ Ом и модуль полного сопротивления схемы $Z = U/I = 22/1,5 = 14,7$ Ом.

3. Векторная диаграмма сложной электрической цепи.

Векторная диаграмма для сложной электрической цепи может быть построена только после расчета этой цепи; строится она на комплексной плоскости по известным комплексам токов всех ветвей и комплексам напряжений на каждом элементе цепи.

Пример 5. Заданы источники энергии, сопротивления схемы $E = 10$ В;
 $J = 2e^{j90}$ А; $r = 2X_L = X_C = 10$ Ом.

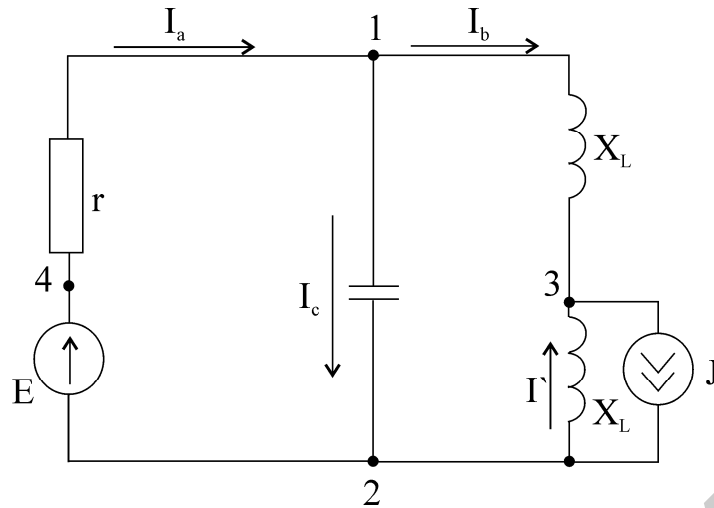


Рис.13

В результате расчета определены токи в ветвях:

$I_a = j \text{ A}$, $I_c = \sqrt{2} e^{j45} = (1 + j) \text{ A}$, $I_b = -1 \text{ A}$, $I' = (1 + 2j) \text{ A}$ и падения напряжений на каждом элементе схемы: $U_{12} = 10 - j10 = 14,14e^{-j45} \text{ В}$, $U_{32} = 10 - j5 = 11,2e^{-j26,6} \text{ В}$, $U_{41} = j10 \text{ В}$

Для построения векторной диаграммы составим уравнение по первому и второму законам Кирхгофа в общем виде и в численном выражении:

узел 1 $I_A = I_B + I_C$; $j1 = -1 + 1 + j$;

(4)

узел 2 $I_C + J = I' + I_A$; $1 + j + 2j = 2j + 1 + j$;

(5)

узел 3 $I_B + I' = J$; $-1 + 2j + 1 = 2j$;

(6)

контур 1-2-4-1

(7)

$$E_1 = U_{41} + U_{12} = rI_A - jX_C I_C;$$

$$10 = 10j1 - 10j(1+j);$$

контур 1-3-2-1

(8)

$$U_{13} - U_{23} - U_{12} = jX_L I_B - jX_L I' + jX_C I_C = 0;$$

$$+j5(-1) - j5(2j+1) + j10(1+j) = 0;$$

контур 2-J-3-2

(9)

$U_{32} = -jX_L I' = (10 - 5j) \text{ В}$ – напряжение на участке с источником тока.

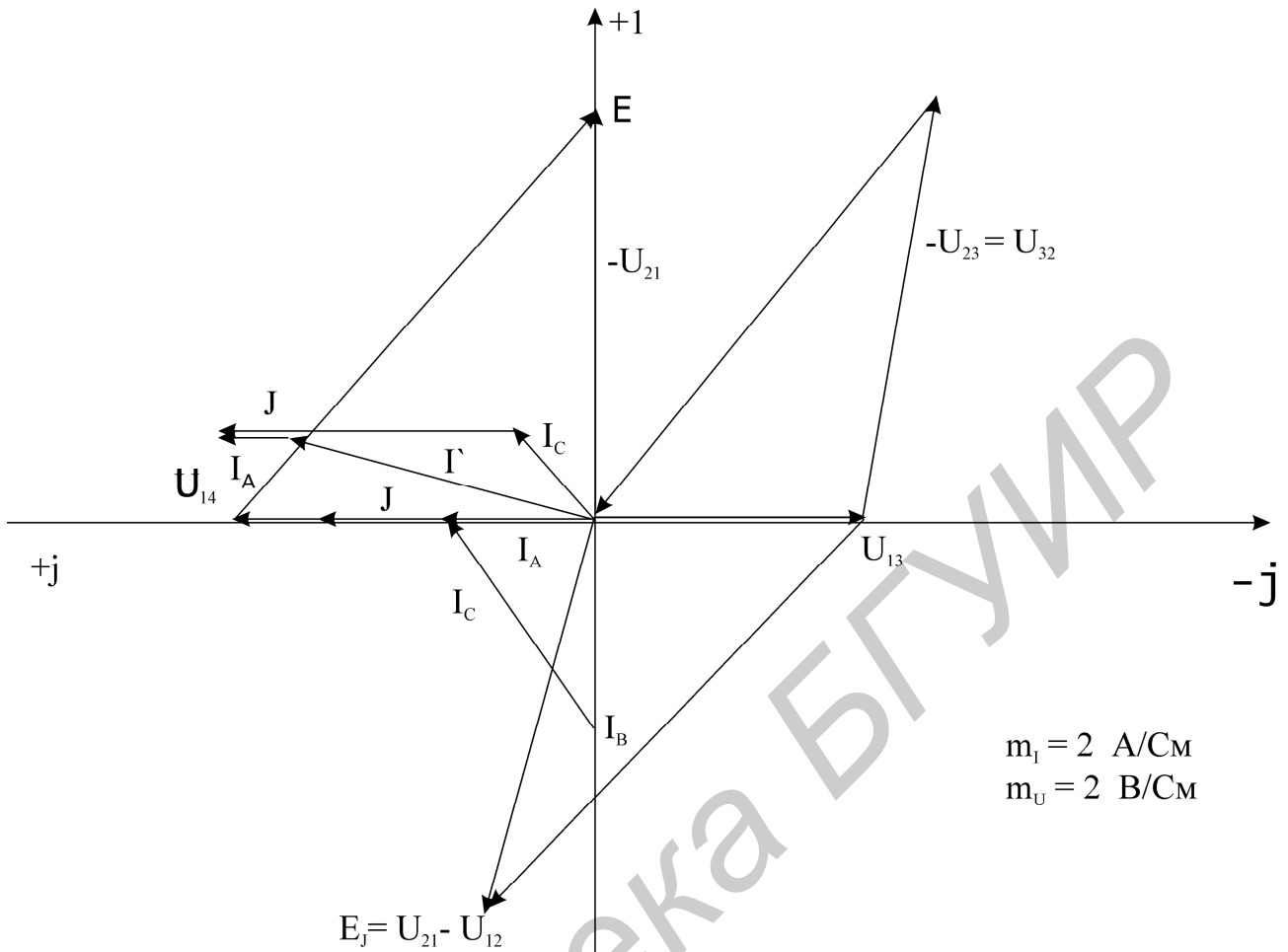


Рис. 14

Приступим к построению уравнения (4). В выбранном масштабе токов $m_I = 2 \text{ A/см}$ на комплексной плоскости (Рис.14) строим ток I_B , из его конца – ток I_C . Соединяем начало координат с концом вектора тока I_C , получим вектор тока I_A (построение можно вести по модулю комплекса тока и аргументу, можно строить действительные и мнимые составляющие токов). Построена векторная диаграмма токов, отображающая уравнение (4). Для узла 2 графически решаем уравнение (5); из начала координат строим комплекс тока I_C , к току I_C прибавляя ток источника тока J , сумма этих токов по уравнению (5) равна сумме комплексных токов J и I_A , из начала координат строим ток J , из его конца – ток I_A . Получаем замкнутый многоугольник. Так как по 1 закону Кирхгофа независимых уравнений может быть составлено два, ограничиваемся построенными на диаграмме двумя уравнениями.

Перейдем к построению двух независимых уравнений второго закона Кирхгофа (7 и 8).

Из начала координат строим комплекс напряжения U_{41} – напряжение на участке с активным сопротивлением совпадает по направлению с током I_A . Из

конца U_{41} строим U_{12} – напряжение на емкости (это падение напряжения отстает от тока I_C на 90°), сумма этих комплексных напряжений равна комплексу ЭДС E , действующей в цепи – соединяем начало построения т.О с концом комплекса напряжения U_{12} . Комплекс ЭДС E был задан действительным числом, так мы и получили на диаграмме: вектор напряжения E направлен по действительной оси.

Для контура 1-3-2-1 строится комплекс напряжения U_{13} . Вектор I_B . Из конца U_{13} строим напряжение $-U_{23}$, замыкающим вектором будет напряжение $-U_{12}$ (алгебраическая сумма комплексных напряжений в этом контуре равна 0). Используя векторную диаграмму, можно графически определить напряжение источника тока J , обозначим его E_J . Для контура 1-3-J-2-1 уравнение по второму закону Кирхгофа $U_{13} - U_{12} = E_J$. На диаграмме вычтем из комплекса U_{13} напряжение U_{12} , получим $E_J = U_{23}$.

Библиотека БГУИР

ЛИТЕРАТУРА

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники, ч.1,М., “Энергия”, 1978.
2. Зевеке Г.В., Иконкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М., “Энергия”,1975.

Библиотека БГУИР

Св план 2001, поз. 27(вед.)

Методическое указание

Построение векторной диаграммы. Расчет переменного тока графоаналитическим методом. Построение топографической диаграммы напряжений.

Редактор Т.А. Лейко

Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16.

Бумага Печать офсетная

Усл. печ. л. Уч.-изд.л. 1, 5.

Тираж экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Лицензия ЛП №156 от 05.02.2001.

Лицензия ЛВ №509 от 03. 08.2001.

220013, Минск, П. Бровки, 6