

## ОБ ОШИБКАХ, ДОПУЩЕННЫХ ПРИ ПОСТАНОВКЕ ПРОБЛЕМЫ "ВЫБОРА УСЛОВНО ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ"

Кузьмин В.В., д.т.н., проф., Шпатенко Т.В., к.т.н.  
НИИ "Электротяжмаш"  
Украина, 61055, Харьков, пр-т Московский, 299  
тел. (0572) 95-66-47, E-mail: vvq@ukr.net

*Виконано аналіз причин та шляхів виходу з кризової ситуації, в яку зійшла проблема „вибору умовно позитивних напрямків” в теорії електричних машин. Показано, що вона опинилася неспроможною до розв’язання з причини похибності самого її формування. Обґрунтована фізична змістовність та математична коректність нового методичного підходу, який дає єдине можливе рішення в галузі побудування схем заміщення та векторних діаграм трансформаторів та інших типів електричних машин.*

*Выполнен анализ причин и путей выхода из кризисного состояния, в которое зашла проблема "выбора условно положительных направлений" в теории электрических машин. Показано, что она оказалась неразрешимой по причине ошибочности самой ее постановки. Обоснована физическая содержательность и математическая корректность нового методического подхода, дающего единственное решение в области построения схем замещения и векторных диаграмм электрических машин.*

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема выбора "условно положительных направлений" (УПН) в схемах замещения однофазного трансформатора и других типов электрических машин (ЭМ) продолжает служить предметом дискуссий и причиной разнобоя в изложении теоретических основ ЭМ. В десятках публикаций, посвященных этой проблеме, указывалось, что такое явно ненормальное положение наносит вред не только инженерной практике, но и процессу подготовки специалистов в высшей школе. Выполненный нами системный анализ [1] показал, что сложившаяся ситуация является следствием напластования ряда принципиальных ошибок, физических неточностей и математических некорректностей, допущенных в курсах ТОЭ и теории ЭМ. Предложенное там же однозначное и физически содержательное решение проблемы построения схем замещения и векторных диаграмм ЭМ до сих пор не реализуется в инженерной и учебной практике, несмотря на то, что оно является единственным решением, выдерживающим проверку инвариантным энергетическим критерием [2].

Да, внедрение нового методического подхода по [1] не удовлетворяет "критерию консервативности" А.В.Нетушила [3], ибо требует ломки ряда ошибочных представлений, укоренившихся в ТОЭ и теории ЭМ, но другого пути выхода из кризиса нет.

Целью настоящей статьи является вскрытие глубинных причин, породивших "проблему выбора УПН" в схемах замещения ЭМ, специфика которых заключается в том, что, несмотря на элементарность топологии контуров электрической схемы, они содержат источники переменной э.д.с. и осуществляют преобразование или передачу значительных потоков энергии (мощности).

### К АНАЛИЗУ ЦЕПЕЙ С ЭМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В связи с тем, что корни проблемы уходят в первоначальные разделы ТОЭ, посвященные анализу цепей постоянного тока, необходимо четко обозна-

чить базовые законы теории электричества, на которых со всей надлежащей строгостью будут построены последующие исследования.

Основным из них является дифференциальная форма обобщенного закона Ома для проводника [4, стр.180]

$$j = \lambda (E_k + E_c), \quad (1)$$

где  $j$  - плотность тока в проводнике;  $\lambda$  - удельная проводимость;  $E_k, E_c$  - напряженность электрического поля от действия кулоновских и сторонних сил соответственно.

Немаловажно внести ясность в вопрос, который обычно упускается из виду "а в каком геометрическом пространстве определены полевые векторы  $j, E_k$  и  $E_c$ ". Для квазилинейного тока они определены в каждой точке "нити тока" в одномерной координатной системе с реперным ортом  $e_{12}$ , направленным по касательной к нити тока (рис.1), изображение которой совпадает с формой проводника 1-2. При этом необходимо отметить, что направление  $j$  зависит от соотношения  $E_k$  и  $E_c$ :

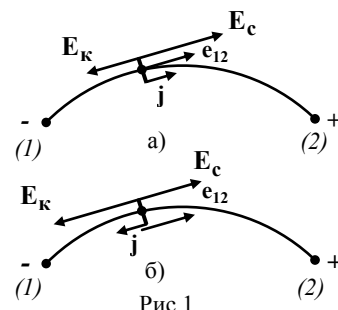


Рис.1

при  $|E_c| > |E_k|$  (генерирование)

$$(E_c \wedge j) = 0, \quad (2)$$

а при  $|E_c| < |E_k|$  (потребление)

$$(E_c \wedge j) = \pi, \quad (3)$$

причем эти соотношения инвариантны к выбору УПН орта  $e_{12}$ . В режиме холостого хода ( $j = 0$ ) результирующая напряженность поля в проводнике повсеместно равна нулю

$$E_k + E_c = 0, \quad (4)$$

что равносильно следующим соотношениям

$$E_k = -E_c, (E_k \wedge E_c) = \pi. \quad (5)$$

Вторым базовым соотношением, представляющим собой интегральную форму закона (1), является [4]

$$IR_{12} = U_{12} + E_{12}, \quad (6)$$

где  $I, R_{12}, U_{12}$  и  $E_{12}$  - параметры ветви "1-2".

Цитируем из [4, стр.181] "...произведение силы тока на сопротивление произвольного участка проводника равно сумме напряжений и сторонней э.д.с., приложенных к этому участку".

Если бы в дальнейшем авторы ТОЭ строго следовали этому правилу в приложении к каждой ветви электрических цепей с учетом того, что и ток  $I$  должен быть индексирован в том же едином для этой ветви УПН интегрирования (от точки "1" к точке "2"), то не возникло бы никаких проблем. Другими словами соотношение (6) следует использовать в более корректной форме

$$I_{12}R_{12} = U_{12} + E_{12}. \quad (7)$$

Оно справедливо независимо от того, какие концы ветви маркированы индексами "1" и "2" (или, что тождественно – в каком направлении ведется интегрирование вдоль нити тока).

Грубыми ошибками, которые традиционно допускаются при последующем изложении ТОЭ является то, что

-при трансформации локальных векторных соотношений (1)-(5) в интегральные скалярные параметры ветви последние незаконно представляются только в подклассе положительных действительных чисел;

-уравнение (7), справедливое для любой единичной ветви, распространяется на замкнутый контур.

Для аргументации перечисленного рассмотрим конкретные примеры ветвей и контуров.

Даже не вводя УПН для интегрирования, из (6) неизбежно следует, что при х.х. ветви с источником э.д.с. ( $I = 0$ ) оно вырождается в

$$U_{12} + E_{12} = 0, \quad (8)$$

которое в соответствии с положениями теории действительных чисел означает, что  $U_{12}$  и  $E_{12}$  - суть числа противоположные [5], т.е.

$$U_{12} = -E_{12}, \quad (9)$$

а отнюдь не равные, как это ошибочно принято считать повсеместно.

Это утверждение, шокирующее многих консерваторов, имеет весьма простое и физически содержательное истолкование: если в режиме х.х. во всех точках нити тока напряженности поля  $E_k$  и  $E_c$  скомпенсированы локально согласно (5), то эта же компенсация должна наблюдаться и в интегральном представлении в формуле (8).

И если мы вынуждены по традиции (по сообра-

жениям приборной реализации измерений [1]) считать напряжение  $U_{12}$  на зажимах ветви величиной положительной, то внутренняя э.д.с.  $E_{12}$  – суть величина отрицательная.

До сих пор этому непреложному факту не уделялось должного внимания, ибо, как верно отмечено в [6], э.д.с. – есть физическая величина, которую нельзя измерить или наблюдать на экране осциллографа. Но попытки заменить э.д.с. напряжением холостого хода, равно как и неоднократные предложения вводить вместо падения напряжения противо-э.д.с. не выдерживают никакой критики, ибо они ведут к искажению физической картины передачи энергии внутри и вне контура [2], о чем речь пойдет ниже.

В элементарной ветви постоянного тока отрицательные значения могут принимать также величины тока  $I$  и мощности  $P$ , что часто вызывало недоумение даже у авторов фундаментальных учебников [7,стр.148], которые в этой связи предпринимали физически необоснованные попытки изменять УПН тока или напряжения при связывании ветвей в контур. Мы здесь намеренно временно воздерживаемся от воспроизведения таких контуров с множеством одиозных "стрелок", ибо совершенно независимо от выбора УПН существуют следующие инвариантные зависимости между знаками параметров рассматриваемой ветви постоянного тока:

$$\text{sign}E = -\text{sign}U, \quad (10)$$

$$\text{sign}I = \text{sign}E \text{ при } |E| > |U|, \quad (11)$$

$$\text{sign}I = -\text{sign}E \text{ при } |E| < |U|, \quad (12)$$

что совпадает с аналогичной направленностью исходных векторов по (2)-(5).

Отсюда также инвариантно следуют физически содержательные знаки потоков мощности [2]:

при  $|E| > |U|$  - процесс генерирования энергии ветвью,

$$\text{sign}(P_E) = \text{sign}(E) \cdot \text{sign}(I) > 0$$

(поступление энергии от стороннего источника);

$$\text{sign}(P_U) = \text{sign}(U) \cdot \text{sign}(I) < 0 \quad (13)$$

(отдача в соседнюю ветвь по проводникам)

при  $|E| < |U|$  - процесс потребления энергии ветвью,

$$\text{sign}(P_U) = \text{sign}(U) \cdot \text{sign}(I) > 0$$

(потребление из соседней ветви)

$$\text{sign}(P_E) = \text{sign}(E) \cdot \text{sign}(I) < 0 \quad (14)$$

(отдача в соседний контур или преобразование в механическую энергию)

Как уже отмечалось, отдавая дань традиции, мы вынуждены считать УПН напряжения (от "+" к "-", что, впрочем, реализовано в направлениях  $E_k$  и  $E_c$  на рис.1 исходя из УПН силы, принятой в законе Кулона). Для этого обход нити тока (рис.1) следует совершать в направлении от точки "2" к точке "1", т.е. в направлении, обратном единичному орту  $e_{12}$ , изображенному на этом рисунке

$$dl = -dl e_{12} = dl e_{21}. \quad (15)$$

В результате интегрирования мы получим следующие знаки параметров ветви

$$U_{21} = U > 0; E_{21} = E < 0,$$

$$I_{21} < 0 \text{ при } |E| > |U| \text{ и } I_{21} > 0 \text{ при } |E| < |U|. \quad (16)$$

Качественная картина распределения значений этих параметров на оси действительных чисел представлена на рис.2.

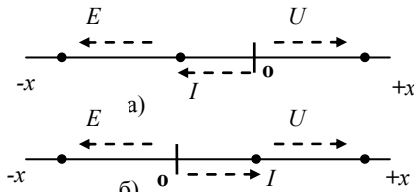


Рис.2

Прежде чем перейти к рассмотрению процедуры связывания ветвей в контур, отметим, что для одиночной ветви с источником э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $r_{21}$ , включенной на сеть бесконечной мощности  $U = const$ , когда значение сопротивления нагрузки  $R$  становится неопределенным, на базе соотношения (7) однозначно определяется значение и знак тока в ветви

$$I_{21} = \frac{U_{21} + E_{21}}{r_{21}}. \quad (17)$$

Для сравнения рассмотрим пассивную ветвь (без источника э.д.с.), включенную на тоже напряжение  $U$  и имеющую внутреннее сопротивление  $R$ . Очевидно, что здесь мы имеем частный случай активной ветви при  $E = 0$  и  $r = R$ , когда на основе (14),(16) и (17) имеем

$$I_{21}^* = \frac{U_{21}}{R} = \frac{U}{R} > 0$$

$$P_E = 0; P_U > 0, \quad (18)$$

в которых, казалось бы, ничего необычного нет. Но это далеко не так, ибо при связывании активной и пассивной ветвей в элементарный контур как раз и возникают серьезные затруднения, вызвавшие в свое время вторую принципиальную ошибку.

Дело в том, что при единственно физически осмысленном варианте сопряжения рассматриваемых ветвей по общему напряжению на зажимах "2"- "1"

$$U_{21} = U_{21}^* = U \quad (19)$$

токи на границах ветвей испытывают явление "реверса",

$$I_{21} = -I_{21}^*, \quad (20)$$

которое в свое время было неверно истолковано, признано ошибочным, что в результате привело к тем нестыковкам и противоречиям, которые наблюдаются в современной теории ЭМ, да и в ряде положений ТОЭ.

Остановимся более детально на этом важном моменте. "Камнем преткновения" здесь является то, что в первом законе Кирхгофа [4] узлом считается место сопряжения трех и более ветвей, а здесь мы имеем как минимум - две. Обратимся к типичной схеме с тремя ветвями по [7, стр.148], изображенной на рис.3.

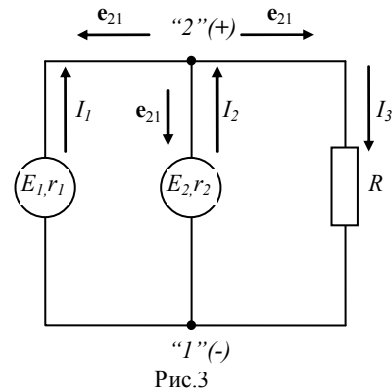


Рис.3

Составим уравнение токов с учетом правила определения их знаков по первому закону Кирхгофа

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0. \quad (21)$$

При переходе второй активной ветви в режим х.х.  $I_2$  обращается в нуль, а узел "2"- в стык двух ветвей, для которого из (21) следует, что

$$I_1 = I_3. \quad (22)$$

Подставляя в последнее соотношение значения токов в системе координат с ортом  $e_{21}$

$$I_1 = -I_{21}; I_3 = I_{21}^*$$

получим соотношение,

$$-I_{21} = I_{21}^*,$$

тождественно равно (20), что и требовалось доказать.

Что же касается выбора УПН в рассматриваемой схеме, то после выбора УПН напряжения  $U$  никакой свободы выбора не остается. Оно едино для всех ветвей (орт  $e_{21}$ ), автоматически выполняется для напряжения, а для токов должно удовлетворять законному и универсальному правилу "...для всех проводников, соприкасающихся в (узле), положительное направление тока должно быть, конечно, выбрано одинаковым образом, т.е. совпадающим либо с направлением (к узлу), либо с направлением от (него)." [8, стр.175].

Нет и не может быть УПН, выбранных отдельно для тока, напряжения или э.д.с.. Это - абсурд, ибо нигде в физике параметры процесса не рассматриваются в собственных системах координат по каждому параметру в отдельности. Поэтому все "стрелочки", изображенные на рис.3 и подобных схемах в ТОЭ и теории ЭМ, представляют собой попытку изобразить реальные направления параметров, что не всегда удается даже в цепях постоянного тока (для тока в ветвях с регулируемой э.д.с.), и совершенно неприемлемо для анализа цепей переменного тока, рассматриваемого класса (двухузловые многопараллельные цепи) где в крайнем случае, можно использовать "двунаправленные" стрелочки.

Отдельного рассмотрения заслуживает неправомерность общепринятой процедуры анализа процессов в контуре постоянного тока с круговым обходом его, при котором нарушается соотношение (20).

Находя из (7) значения напряжений для активной и пассивной ветвей контура и приравнивая их сумму нулю, получаем (обходя контур по часовой стрелке,

т.е. против  $I_{21}$  и по  $I_{21}^*$ )

$$E_{21} - I_{21}r + I_{21}^*R = 0,$$

что в соответствии с принятыми правилами означает

$$\sum_k E_k + \sum_k I_k R_k = 0. \quad (23)$$

Этот результат принципиально расходится с классической формулировкой второго закона Кирхгофа

$$\sum_k E_k = \sum_k I_k R_k, \quad (24)$$

ибо повышение потенциала и падение напряжения (потенциала) суть физические величины противоположного знака, равно как  $U$  и  $E$  в формуле (9), которая представляет собой частный случай соотношения (23) при  $R \rightarrow \infty$ .

Так как в инженерной практике расчета цепей постоянного тока обе эти величины (э.д.с. и падение напряжения) считаются положительными, в этой области ТОЭ существующие подходы могут быть сохранены (с некоторыми оговорками), но для расчетов цепей переменного тока, где явление реверса тока и мощности на зажимах ветвей имеет принципиальное значение, предпочтение должно отдаваться формулировке (23).

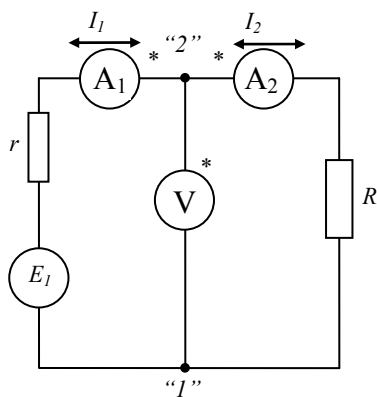


Рис.4

Единая система выбора УПН интегрированная (рис.3) имеет важное значение не только для теории, но и для практики организации электрических измерений. Строго говоря, подключение всех поляризованных приборов должно проводиться по схеме, изображенной на рис.4, т.е. одноименными клеммами "\*" или "+" к узлу "2". Но это практически реализуемо лишь для измерительных приборов с симметричными пределами измерений (например, для шлейфов осциллографа). Во всех остальных случаях полярность включения амперметра  $A_1$  приходится изменять во избежание "зашкаливания". Это относится и к ваттметрам того же класса [1].

Для того чтобы убедиться в правоте изложенных выше нетрадиционных положений, полезно снять осциллограмму перевода генератора постоянного тока в двигательный режим при работе на сеть. Характер такой осциллограммы приведен на рис.5.

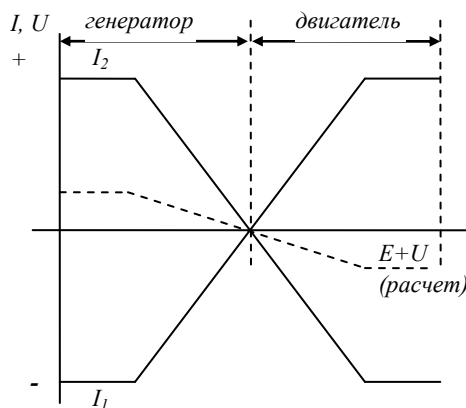


Рис.5

## К АНАЛИЗУ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ С ЭМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Изложенные в предыдущем разделе ошибочные положения еще более рельефно проявились при анализе цепей переменного тока с активными ветвями, содержащими регулируемые источники э.д.с., что, собственно и привело к возникновению противоречий при анализе схем замещения и построении векторных диаграмм трансформаторов и синхронных генераторов [1].

Здесь основной целевой функцией теоретических исследований является определение амплитудно-фазовых соотношений между интегральными параметрами ветвей, в которых осуществляется генерирование, трансформация, передача и потребление энергии на переменном токе. Но в отличие от ветвей с источниками и потребителями постоянного тока, где скалярные параметры  $E_k$ ,  $U_k$  и  $I_k$  относились к классу действительных чисел, в аналогичных ветвях переменного тока  $\vec{E}_k$ ,  $\vec{U}_k$  и  $\vec{I}_k$  принадлежат к классу векторов (хотя и "изображающих", что непринципиально).

Как и в предыдущем разделе, выбор УПН сводится исключительно к определению двух взаимосвязанных процедур:

- определение единого направления интегрирования ( $e_{21}$ ) вдоль анализируемой нити тока;
- установление единого порядка включения измерительных приборов для экспериментального определения амплитудно-фазовых соотношений между параметрами каждой ветви.

Первая из них носит чисто теоретический характер и обычно сводится к тому, что в двумерном геометрическом пространстве с положительной полуосью, на которую проецируются элементы векторной диаграммы (она обычно расположена вертикально и обозначается ON [4]) совмещается вектор напряжения  $\vec{U}$  на концах ветви. Это означает только лишь то, что в рассматриваемый момент времени мгновенное значение  $U$  по направлению совпадает с направлением  $e_{21}$  и равно амплитудному значению.

Так как мгновенные значения параметров ветви непрерывно изменяются во времени, изображение однонаправленных стрелок на любых схемах замещения ЭМ переменного тока не просто бессмысленно,

но и вредно в дидактическом плане. Эти "стрелочки" никоим образом не заменяют и не дополняют векторную диаграмму ветви, а только затемняют и искажают сущность физических процессов. Однонаправленными стрелками могут обозначаться только реперные орты  $e$  обхода ветвей.

Что касается постановки эксперимента, то здесь нет никакой разницы между цепями постоянного и переменного тока – шлейфы осциллографа нужно включать одноименными зажимами точно так же – как показано на рис.4.

Серьезной методологической ошибкой теории ЭМ является то, что она приступает к анализу сложных цепей (например, схемы замещения трансформатора), не уточнив принципы связывания ветвей в контур и контуров между собой. В результате теория такого элементарного устройства как однофазный двухобмоточный трансформатор стала ареной бесплодных споров и дискуссий, в которых одни авторы, проявляя научную беспринципность, соглашались с возможностью существования нескольких вариантов схем замещения и векторных диаграмм, а наиболее активные – требовали даже изменить знак в интегральном законе электромагнитной индукции [1].

На поверку оказывается, что новый методический подход, изложенный в [1] снимает все эти противоречия, вводя в рассмотрение единую и непротиворечивую векторную диаграмму, не требующую никаких изменений в фундаментальных законах электрофизики.

Обратимся в начале к рассмотрению элементарного контура, состоящего из двух активных ветвей  $\{\vec{E}_1, Z_1\}$  и  $\{\vec{E}_2, Z_2\}$  (рис.6), связанных контактным способом, т.е. условием

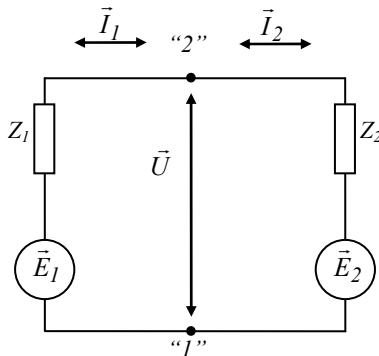


Рис.6

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_2 = \vec{U}. \quad (25)$$

Для любой ветви справедливо соотношение

$$\vec{U}_k + \vec{E}_k = \vec{I}_k Z_k, \quad (26)$$

частным случаем, которого (при понижении частоты до нуля) является (7).

Рассмотрим случай, когда

$$|E_2| > |U|; |E_1| < |U|.$$

Тогда для каждой ветви получим соответственно векторные диаграммы рис.7а и рис.7б, при заданном токе в контуре

$$\vec{I}_1 = -\vec{I}_2, (\vec{U} \wedge \vec{I}_1) < \pi/2,$$

т.е. при индуктивной нагрузке.

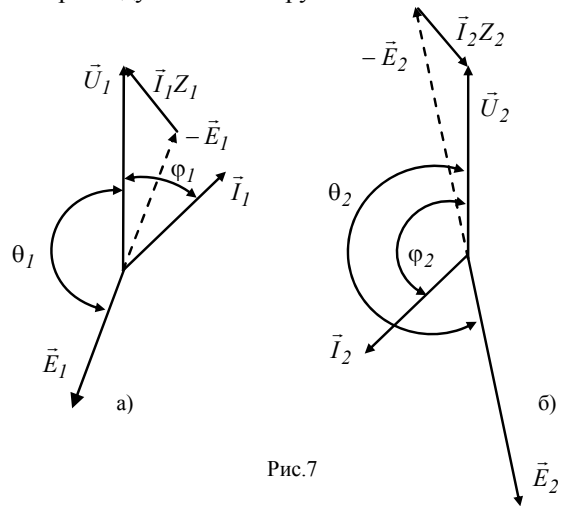


Рис.7

Построение каждой из диаграмм удобно вести по традиционному способу с учетом того, что согласно (26)

$$\vec{U}_k = -\vec{E}_k + \vec{I}_k Z_k \quad (27)$$

Диаграмма рис.7а соответствует режиму потребления ветвью 1 активной и реактивной мощности [2]:

$$P_{U_1} = U_1 I_1 \cos \varphi_1 > 0, \quad Q_{U_1} = U_1 I_1 \sin \varphi_1 > 0 \quad (28)$$

а также передаче энергии электромагнитным путем из контура

$$P_{E_1} = E_1 I_1 \cos(\varphi_1 + \theta_1) < 0. \quad (29)$$

Вторая ветвь (рис.7б) характеризуется выдачей активной и реактивной мощности

$$P_{U_2} < 0, \quad Q_{U_2} < 0, \quad (30)$$

а также поступлением энергии в ветвь (контур) за счет действия э.д.с.  $\vec{E}_2$ .

$$P_{E_2} = E_2 I_2 \cos(\theta_2 - \varphi_2) > 0. \quad (31)$$

Далее, разъединив ветви, свяжем их электромагнитно (рис.8) с условием связи

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_2 \quad (32)$$

и подключим к сети с напряжением  $\vec{U}_1$  и  $\vec{U}_2$  ( $U_1 > U_2$ ).

В результате мы получим однофазный двухобмоточный трансформатор ("идеальный" при соблюдении равенства токов в ветвях) с коэффициентом трансформации  $k=1$ , работающий на индуктивную нагрузку, векторная диаграмма которого изображена на рис.9.

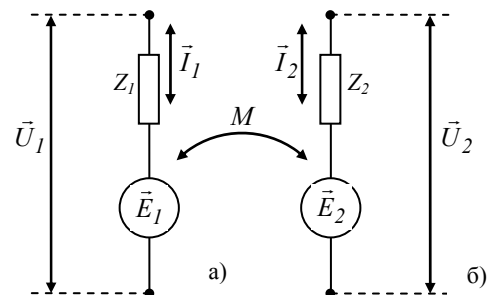


Рис.8

Эта диаграмма физически содержательна, устраняет все существующие противоречия и дает правильную картину потоков мощности как при работе на индуктивную (28)-(31), так и емкостную нагрузку [2].

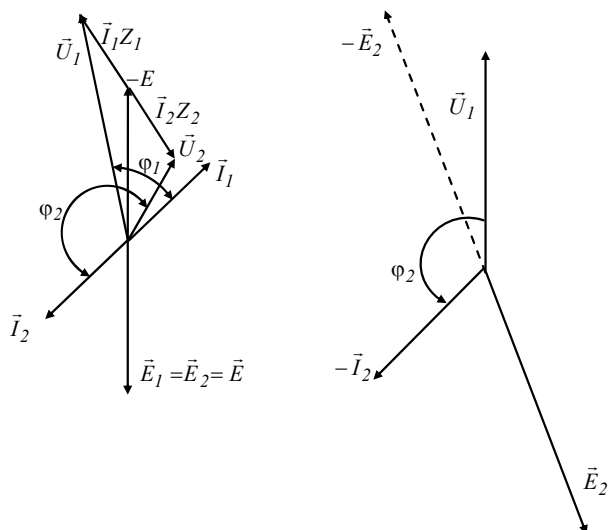


Рис.9

В заключение следует отметить, что схема рис.8 более физически содержательна, чем Т-образная чисто электрическая, ибо последняя неправомерно исключает из рассмотрения магнитную цепь ЭМ [1].

Примеры реализации рассмотренного подхода даны в [1].

#### ВЫВОДЫ

1. Проблема "выбора условно положительных направлений" оказалась неразрешимой и бесплодной в деле построения непротиворечивых схем замещения и векторных диаграмм электрических машин по причине ошибочности самого подхода, на котором она основана.

2. Осуществленный на заре становления теории электричества выбор УПН действия кулоновских сил, направления постоянного тока в нагрузке, а также полярности включения вольтметра не оставляет никакой свободы выбора УПН в цепях постоянного тока – интегрирование полевых векторов должно вестись в едином направлении для каждой ветви от клемм "+" к клеммам "-". При этом набор интегральных скалярных параметров всегда будет содержать как положительные, так и отрицательные значения. Если мы по традиции вынуждены считать напряжение на зажимах ветви положительным, то э.д.с. всегда будет иметь отрицательное значение.

3. Полученные в статье универсальные уравнения связи параметров состояния ветви на постоянном и переменном токе позволяют вести анализ режима работы ветви независимо от характера связи с другими ветвями.

4. Совмещение векторных диаграмм ветвей и связывание уравнений их состояния должно осуществляться:

- при контактном соединении – по общему базовому вектору напряжения на зажимах, обычно совмещаемому с положительной полуосью;

- при электромагнитной связи (трансформатор) – по общему базовому вектору э.д.с., совмещенному с отрицательной полуосью.

В последнем случае отпадает необходимость рассмотрения Т-образной схемы замещения, игнорирующей роль магнитопровода.

5. Действие первого закона Кирхгофа должно распространяться и на случай сопряжения в узле двух ветвей (из которых хотя бы одна активная). При этом получает наглядное объяснение явление "реверса тока" на клеммах сопрягаемых ветвей – токи источника и токи приемника всегда находятся в противофазе.

6. Изложенные в статье принципы доказывают физическую содержательность и математическую корректность нового методического подхода, снимают все противоречия и разногласия в рассмотренных разделах теории, и тем самым, подводят черту под затянувшейся бесплодной дискуссией.

7. Внесение соответствующих уточнений в научно-техническую и учебно-методическую литературу является насущным и неизбежным мероприятием.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кузьмин В.В., Шпатенко Т.В. О путях преодоления разнобоя и несогласованностей при построении схем замещения и векторных диаграмм электрических машин. //Вестник НТУ"ХПИ".-2002.-№12.
- [2] Кузьмин В.В., Сколотин В.В. К анализу вариантов векторных диаграмм однофазных трансформаторов при помощи инвариантных энергетических критериев. // Сб. трудов международной конференции "Проблемы автоматизированного электропривода".-Вестник НТУ"ХПИ".-2003.
- [3] Нетушил А.В. О системном подходе в преподавании электротехнических дисциплин. //Электричество.-№5.-1986.
- [4] Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. М.-Л.: ГЭИ.-1959 т.1.
- [5] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (пер. с англ.).-М: "Наука", 1970.
- [6] Антик И.В. О выборе условно положительных направлений напряжений и токов при анализе работы трансформаторов. //Электричество.-№1.-1985.
- [7] Важнов А.И. Электрические машины.-Л.:Энергия.-1969.
- [8] Тамм И.Е. Основы теории электричества. -М: "Наука", 1976, 616с.

Поступила 12.10.2003