Министерство общего и профессионального образования
Российской федерации
Южно–Уральский государственный университет
кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

621.3(07)
Л814

С.П.Лохов

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ МОЩНОСТИ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Часть 2

МНОГОФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Учебное пособие

Челябинск
Издательство ЮУрГУ
1999

УДК 621.3.011(075.8)+621.314(075.8)

Лохов С.П. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ МОЩНОСТИ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ. МНОГОФАЗНЫЕ ЦЕПИ. – Учебное пособие.– Челябинск: ЮУрГУ, 1999. –Ч.2.–123 с.

Учебное пособие состоит из двух частей. В первой части концепция Фризе для одного электроприемника доведена до качественно новой теории энергетического баланса в произвольной электрической цепи однофазного питания.

Вторая часть продолжает развитие теории на трехфазные трехпроводные и двухфазные цепи. Введено качественно новое понятие пространственной ортогонализации, превращающее все двухполюсники произвольной цепи в трехполюсники. Только такой подход позволил прозвести трехфазный баланс энергетических составляющих к полной мощности. Из-за отсутствия единства в определении полной мощности трехфазной сети вторая часть пособие не может быть признана новой законченной теорией. Она демонстрирует методику построения новых теорий балансируемых энергетических составляющих.

Учебное пособие предназначено для студентов всех энергетических и электротехнических специальностей и особенно полезно для курсов «Теоретические основы электротехники», «Преобразовательная техника», «Электрические сети и системы».

Ил. 14, табл. 10, список лит.– 8 назв.

Одобрено учебно-методической комиссией
энергетического факультета

Рецензенты: Ф.Я. Изаков, Ю.Е. Синегубко.

ISBN 5-696-01249-3

ВВЕДЕНИЕ

«Метод важнее открытия, ибо правильный метод исследования обязательно рано иди поздно приведет к новым еще более выдающимся открытиям.»

Л.Д. Ландау

Эта книга является второй частью работы [57]. Для удобства чтения нумерация ВСЕГО продолжена, кроме нумерации страниц. Первая глава в этой части идет под номером 8, первая ссылка в списке литературы – [54], первый рисунок – 19, первая таблица – 11. Это существенно облегчает ссылки.

В первой части рассмотрены балансы энергетических ответственностей элементов произвольной цепи (во введении пояснена разница между «цепью» и «сетью») перед источником питания с двумя зажимами (однофазным), здесь будет рассмотрен источник питания с тремя зажимами (двухфазный и трехфазный – разница будет пояснена). Не рассматривается трехфазная четырехпроводная сеть питания.

Фризе закончил свою работу словами, что все написанное им легко переносится на трехфазные сети [45]. Конечно, здесь «маэстро» повел себя как великий Ферма, которому не хватило бумаги, чтобы написать доказательство своей теоремы. Сейчас большинство математиков уверено, что Ферма ошибался, думая, что у него есть доказательство. Так же думает автор пособия о Фризе.

Решение вопроса баланса энергетических ответственностей для трехфазной цепи невозможно без определения понятия полной мощности трехфазной сети питания, к значению которой должен сходиться баланс. В этом вопросе нет единого мнения [4, 5, 11, 16, 29, 30, 31, 38, 58], но есть существующая практика, когда на всех фазах стоят однофазные счетчики активной и реактивной энергии и их показания просто суммируют. В трехфазных счетчиках эта сумма получается автоматически. Аналогично поступают с ваттметрами и варметрами, определяя общесетевые параметры формулами

$$P_s = P_A + P_B + P_C; \qquad Q_s = Q_A + Q_B + Q_C. \qquad \text{(В.1)}$$

Представленный в главе 8 анализ н внесет ясности в данный вопрос, но продемонстрирует метод исследования. Объектом оптимизации станет фидерный трансформатор, значит исключаются потери в линиях. Их сопротивления следует отнести к трансформатору. Будут получены разные формулы полной мощности. Суть метода сводится к тому, что надо предложить какую-то реализуемую физическую модель процессов в идеализированном трансформаторе, а затем оптимизационными методами получить любые формулы. Тогда на нашей стороне будет физическая природа явлений, а это

0позволит произвести затем энергетический баланс и применить предлагаемые «трансформаторные преобразования». Это не получается, когда предлагаются сперва какие-то формулы, а потом под них предлагается подвести баланс.

Во второй половине данной части будет продемонстрирован метод разложения сигналов на энергетические составляющие, получения формул балансов ответственностей элементов цепи к одной из формул полной мощности. Для первой части пособия автор нашел только двух предшественников Фризе и Замараева [5, 7, 45]. Для предлагаемого метода автор... не смог найти предшественников. Работы без предшественников называются пионерскими. Автор заявляет, что им впервые в работах [25, 26] поставлен, а в работе [28] решен вопрос о балансе ответственностей элементов произвольной «цепи» за полную мощность (по одной из формул) трехпроводной сети питания. Все это нескромно, особенно нескромно найти место для пионера в такой завершенной науке как теоретические основы электротехники (ТОЭ), но должен же автор об этом заявить, а читатели пусть решат.

Предшественников нет потому, что какое-то подсознание мешало даже поставить вопрос о именно трехфазном (три полюса) балансе энергетических составляющих элементов (два полюса к несимметричному несинусоидальному трехфазному входу питания всей цепи и о распределение ответственности между элементами цепи за полную мощность на этом входе. Для решения такой задачи пришлось каждый элемент цепи (двухполюсник) рассмотреть как трехполюсник, приделать к нему виртуальный «трехфазный хвост» К временной ортогонализации периодических сигналов (Фризе или Грама-Шмидта) пришлось добавить пространственную ортогонализацию, когда одна и та же форма, но в разных фазах и в «хвосте» элемента находится в квадратуре к самой себе. А такая качественно разная квадратура требует качественно новых комплексных единиц, уже названных в первой части «размерностями».

«Пионерский» шаг дан как метод получения трехфазного баланса к одной выбранной формуле полной мощности. Значит его можно применить и для баланса под другую формулу. Поэтому эпиграфом к работе взяты слова Л.Д.Ландау. Сколько будет выбрано формул, столько будет получено балансов, а на каком же остановиться? Говорят, что критерием истины является практика. Но в исходных положениях не нарушаются фундаментальные законы физики, значит и результаты не вступят в конфликт с практикой, если не будут допущены ошибки. Тогда вторым критерием истины должны стать простота, красота и симметрия получаемых формул. Автор пособия не доволен простотой полученного, поэтому его метод следует повторить при других исходных данных.

Широко используются введенные в первой части определения скалярного (x,y) и векторного [x,y] произведения мгновенных периодических сигналов. Это значит, что анализируются только периодические сигналы. Нет даже попыток распространения результатов на переходные и длиннопериодические процессы, но предлагается принять, что все аппаратные решения второй части будут давать правильные показания в любых режимах.

В конце даны настолько подробные выводы по обеим частям пособия, что их скорее можно назвать рефератом. Поэтому рекомендуется перед чтением пособия прочитать эти выводы.

Замечания по данному пособию можно отправить по адресу электронной почты автора: lokhov1945@mail.ru

8. ПОЛНАЯ МОЩНОСТЬ ТРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ

8.1. Взаимодействия сигналов трехпроводной сети

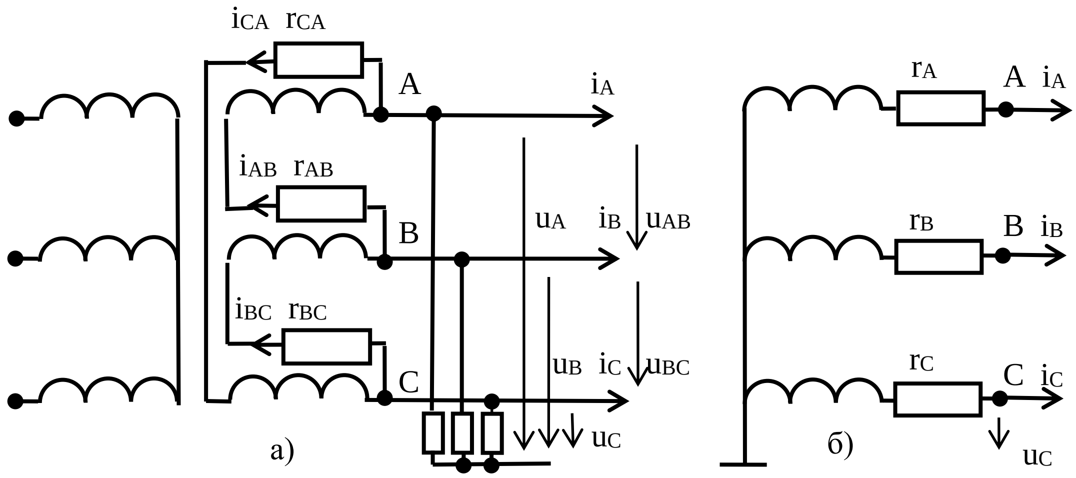


Рис.19

На мгновенные фазные сигналы трехфазной трехпроводной сети (рис. 19 а) наложены следующие связи

$$u_A + u_B + u_C = 0; \qquad i_A + i_B + i_C = 0. \qquad (8.1)$$

Линейные сигналы определяются через фазные

$$u_{AB} = u_A - u_B; \quad u_{BC} = u_B - u_C; \quad u_{CA} = u_C - u_A; \quad \text{(а)} \qquad (8.2)$$

$$i_{AB} = (i_A - i_B)/3; \quad i_{BC} = (i_B - i_C)/3; \quad i_{CA} = (i_C - i_A)/3. \quad \text{(б)}$$

Линейные токи протекают через обмотки трансформатора, замкнутые в треугольник. Для линейных сигналов выполняются формулы балансов, аналогичные (8.1). В реальном трансформаторе возможно нарушение баланса токов обмоток трансформатора (рис. 19 а), но тогда это будут не токи по определению (8.2 б), то есть под линейными токами понимаются значения, рассчитанные по данным формулам. Формулы обратных преобразований сигналов

$$u_A = (u_{AB} - u_{CA})/3; \quad u_B = (u_{BC} - u_{AB})/3; \quad u_C = (u_{CA} - u_{BC})/3; \quad \text{(а)} \qquad (8.3)$$

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}; \qquad i_B = i_{BC} - i_{AB}; \qquad i_C = i_{CA} - i_{BC}. \quad \text{(б)}$$

Уравнение (8.1) связывает между собой фазные напряжения, определяемые по отношению к искусственной нулевой точке. Так принято и в ТОЭ. Однако это отличается от определения фазного напряжения, принятого у специалистов по трансформаторам: фазное напряжение – это напряжение на обмотке на одном стрежне трансформатора независимо от схемы ее включения. То есть у них принято «конструкторское» определение. Здесь понятия фазных и линейных сигналов принято в соответствии с уравнениями и направлениями стрелок на (рис. 19 а) и не зависят от схемы включения трансформатора.

Если u_C найти из (8.1) и возвести в квадрат, то

$$u_C^2 = u_A^2 + u_B^2 + 2 \cdot u_A \cdot u_B \,. \qquad (8.4)$$

Тогда после интегрирования получается первая формула трехпроводной связи через скалярные произведения сигналов

$$(u_A, u_B) = \frac{1}{T}\int_0^T u_A \cdot u_B \, dt = (U_C^2 - U_A^2 - U_B^2)/2. \qquad (8.5)$$

Такие же уравнения получаются для токов. Аналогично получены прочие соотношения, выводы которых опускаются. Ниже они приведены только для одной фазы, уравнения для оставшихся фаз могут быть записаны симметрично. Вводятся обозначение для квадрата действующего напряжения U_S^2 и тока I_S^2 трехфазной сети.

$$U_A^2 = (u_A, u_A); \qquad P_A = (u_A, i_A); \qquad \text{(а)}$$

$$U_S^2 = U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 = \qquad (8.6)$$

$$= (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)/3 = \qquad \text{(б)}$$

$$= -2\{(u_A, u_B) + (u_B, u_C) + (u_C, u_A)\};$$

$$U_{AB}^2 = 2\cdot U_A^2 + 2\cdot U_B^2 - U_C^2 = \\ = 2\cdot U_S^2 - 3\cdot U_C^2\ ; \qquad \text{(в)} \qquad (8.6)$$

$$U_A^2 = \{2\cdot U_{AB}^2 + 2\cdot U_{CA}^2 - U_{BC}^2\}/9; \qquad \text{(г)}$$

$$\{(u_{BC},i_A) + (u_{CA},i_B) + (u_{AB},i_C)\} = \qquad \text{(д)} \\ = 3\cdot\{(u_B,i_A) - (u_A,i_B)\}.$$

Используя формулы (4.23), (4.24) можно получить соотношения для векторных произведений

$$[u_A,u_A] \ = \ 0; \qquad \text{(а)}$$

$$[u_A,u_B] = -[u_B,u_A] = [u_B,u_C] = [u_C,u_A]; \qquad \text{(б)}$$

$$[u_A,u_{BC}] = 2\cdot[u_A,u_B]; \quad [u_{AB},u_{BC}] = 3\cdot[u_A,u_B]; \qquad \text{(в)} \quad (8.7)$$

$$[u_A,u_B]^2 \ = \ [u_A,u_B][u_B,u_C] = \qquad \text{(г)} \\ = U_A^2\cdot U_B^2 - (u_A,u_B)^2 \ = \\ = U_B^2\cdot U_C^2 \ - (u_B,u_C)^2 \ = \\ = U_S^4\ /4 - (U_A^4 + U_B^4 + U_C^4)/2 = \\ = (U_A + U_B + U_C)(U_A + U_B - U_C)(U_B + U_C - U_A)(U_C + U_A - U_B)/4.$$

Формула (8.7 г) интересна тем, что представляет собой формулу Герона и определяет 1/4 квадрата площади треугольника со сторонами, длина которых равна действующим значениям напряжений U_A, U_B, U_C. Если напряжения линейно зависимы, то их векторное произведение равно нулю, и из сливающихся линий можно построить треугольник только с нулевой площадью. Все сходится! Запись U_A^4 означает, что среднеквадратичное значение U_A^2 (1.6) было возведено в квадрат, а не «среднечетверичное» значение. Также U_S^4 – квадрат U_S^2 (8.6 б).

Интересны взаимодействия с посторонними сигналами, которые здесь обозначены как произвольные сигналы u_K, i_K какого-то элемента цепи.

$$(u_B,u_K)(i_C,i_K) \ + \ (u_C,i_K)(i_B,i_K) = \qquad (8.8) \\ = (u_A,u_K)(i_A,i_K) - (u_B,u_K)(i_B,\mathrm{i_K}) - (u_C,u_K)(i_C,i_K)$$

8.2. Оптимизация трехпроводной сети по потерям

Рассматривается только трехпроводная сеть без нулевого провода, так как конструкция и условия работы последнего качественно и количественно отличаются от линейных проводов, и автору не удалось даже подойти к решению проблемы энергетического баланса для этого случая. В литературе рассмотрены подходы к учету этого различия, например [11, 29, 58].

Анализируется схема замещения (рис. 19 а), где трансформатор является идеальным, а вынесенные сопротивления учитывают потери в нем и линиях. Обмотки соединены треугольником, что сложнее для анализа, но будет использовано ниже. Из-за трехпроводности выполняются все написанные соотношения для сигналов. Трехфазная активная мощность и общие потери выражаются формулами:

$$P_S = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T \{u_{AB}\cdot i_{AB} + u_{BC}\cdot i_{BC} + u_{CA}\cdot i_{CA}\}dt; \qquad (8.9)$$

$$\Delta P = \frac{1}{T}\int_0^T \Delta p\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T \{r_{AB}\cdot i_{AB}^2 + r_{BC}\cdot i_{BC}^2 + r_{CA}\cdot i_{CA}^2\}dt. \qquad (8.10)$$

Активные составляющие токов i_{a} имеет пока неопределенные, но оптимальные формы, обеспечивающие минимум потерь (8.10), при тех же напряжениях сети и передающие ту же активную мощность (8.9). По сравнению с параграфом 1.2 появились дополнительные связи (8.1), которые учитываются во вспомогательной функции (8.11) с еще двумя зависящими от времени неопределенными множителями (неопределенными функциями). Остальные действия строго формальны: к двум уравнениям (8.1) добавляются три уравнения для частных производных (8.12) и получается система (8.13).

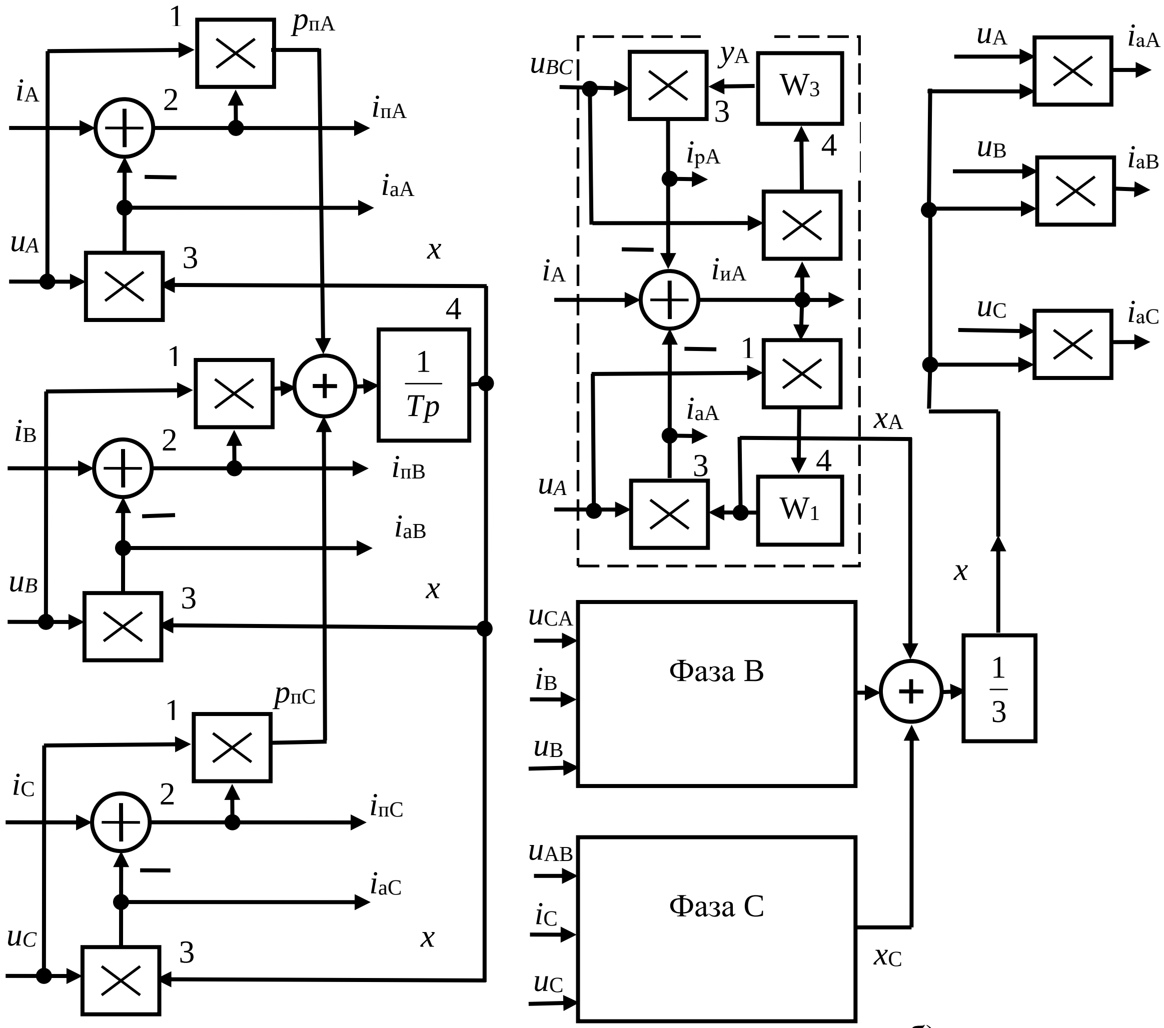
$$\begin{aligned} F^* = \Delta p + \lambda_1\cdot(u_{AB}\cdot i_{\text{a}AB} + u_{BC}\cdot i_{\text{a}BC} + u_{CA}\cdot i_{\text{a}CA}) +\\ + \lambda_2(t)\cdot(u_{AB} + u_{BC} + u_{CA}) + \lambda_3(t)\cdot(i_{\text{a}AB} + i_{\text{a}BC} + i_{\text{a}CA}); \end{aligned} \qquad (8.11)$$

$$dF^*/di_{\text{aAB}} = \lambda_1\cdot u_{AB} + 2\cdot r_{AB}\cdot i_{\text{a}AB} + \lambda_3(t) = 0\ ; \qquad (8.12)$$

$$\begin{aligned} -\lambda_1\cdot u_{AB} &= i_{\text{a}AB}\cdot 2\cdot r_{AB} + 0 + 0 + \lambda_3(t);\\ -\lambda_1\cdot u_{BC} &= 0 + i_{\text{a}BC}\cdot 2\cdot r_{BC} + 0 + \lambda_3(t);\\ -\lambda_1\cdot u_{CA} &= 0 + 0 + i_{\text{a}CA}\cdot 2\cdot r_{CA} + \lambda_3(t);\\ 0 &= i_{\text{a}AB} + i_{\text{a}BC} + i_{\text{a}CA} + 0. \end{aligned} \qquad (8.13)$$

Решение системы имеет вид (8.14). Формулы для остальных токов получаются по правилам симметрии записи и не приводятся.

$$i_{\text{a}AB} = -\frac{3\lambda_1}{2}\cdot\frac{r_{BC}\bullet u_A - r_{CA}\bullet u_B}{r_{AB}\bullet r_{BC} + r_{BC}\bullet r_{CA} + r_{CA}\bullet r_{AB}}; \qquad (8.14)$$



а) б)

Рис. 20

Неопределенный множитель находится через формулу мощности (8.9). Окончательная формула для оптимального тока (она же активная составляющая тока) имеет вид

$$i_{aAB} = \frac{P_S}{3}\cdot\frac{r_{BC}\bullet u_A - r_{CA}\bullet u_B}{U_A^2\bullet r_{BC}+U_B^2\bullet r_{CA}+U_C^2\bullet r_{AB}}. \quad (8.15)$$

При равных сопротивлениях получаются формулы для линейного и фазного токов

$$i_{aAB} = \frac{P_S}{U_{AB}^2+U_{BC}^2+U_{CA}^2}\cdot u_{AB}; \quad \text{(а)}$$

$$i_{aA} = \frac{P_S}{U_A^2+U_B^2+U_C^2}\cdot u_A; \quad \text{(б)} \quad (8.16)$$

Невязки определяют пассивные составляющие тока, которые могут быть компенсированы, так как не передают в сумме активной мощности:

$$i_{пA} = i_A - i_{aA}; \qquad i_{пB} = i_B - i_{aB}; \qquad i_{пC} = i_C - i_{aC}. \quad (8.17)$$

8.3. Измерение энергетических составляющих

Аппаратная реализация для трехпроводных измерений (рис. 20 а) реализует формулы (8.16 б), (8.17), но не прямолинейно, а так же как и схема (рис. 11 б) по сути разложения. Схема включает в себя три однофазных измерительных преобразователя (рис. 11 б), но с общим сумматором 5 трех сигналов пассивной мощности и общим интегратором 4. Общая интегрирующая обратная связь на этом интеграторе так формирует общий медленно изменяющийся сигнал x, что на входе интегратора отсутствует постоянная составляющая. Поэтому сигналы активных составляющих фаз повторяют формы фазных напряжений

$$i_{\mathrm{a}A} = x \cdot u_A\,; \qquad i_{\mathrm{a}B} = x \cdot u_B\,; \qquad i_{\mathrm{a}C} = x \cdot u_C\,, \tag{8.18}$$

и передают всю суммарную активную мощность. Умножители 1 измеряют активную мощность от пассивных составляющих токов (8.17), которая получается нулевой, благодаря интегрирующей обратной связи, то есть вся трехфазная мощность передается только активными составляющими, что и определяет их как активные. Схема не опубликована в авторском свидетельстве [49], так как экспертиза посчитала, что формула изобретения (см. параграф 7.1) защищает ее. Схемы типа (рис.11, 12, 20) позволяют выделять и другие ортогональные составляющие, если заданы их формы. На (рис. 20 б) в качестве такой формы использован сигнал линейного напряжения. Известно, что сигналы фазного тока и линейного напряжения используются в классических измерителях реактивной мощности. Поэтому схема выделяет мгновенные сигналы реактивных токов в классическом их определении [16]. Аналогично можно выделить и составляющие несимметрии строго по О.А.Маевскому [30], если не затрагивать вопроса о строгости их введения.

8.4. Полная мощность (если прямолинейно)

Для многофазной сети также почти общепринято, что полная мощность сети определяется как максимально возможная активная мощность сети (8.9) при сохранении напряжений и других пока неопределенных оптимальных токах с сохранением какой-то интегральной оценки, например, потерь (8.10). Как и для случая однофазного трансформатора, можно не проводить полный анализ, а воспользоваться готовыми формулами (8.15) для расчета активных составляющих и по заданным потерям (8.10) определить максимальную активную мощность, т.е. искомую полную мощность

$$S_S^2 = \frac{9(U_A^2 \bullet r_{BC} + U_B^2 \bullet r_{CA} + U_C^2 \bullet r_{AB})(I_{AB}^2 \bullet r_{AB} + I_{BC}^2 \bullet r_{BC} + I_{CA}^2 \bullet r_{CA})}{r_{AB} \bullet r_{BC} + r_{BC} \bullet r_{CA} + r_{CA} \bullet r_{AB}}. \qquad (8.14)$$

При равных сопротивлениях последние сокращаются и получаются классические формулы полной мощности через линейные и фазные сигналы

$$S_S^2 = (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)\cdot(I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}^2); \quad (а)$$

$$S_S^2 = (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)\cdot(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2). \qquad (б) \qquad (8.20)$$

Формула (8.20 б) получена Л.С.Лурье [29] для трехпроводной сети синусоидального несимметричного питания. Здесь изменен метод доказательства и не оговорены формы сигналов.

8.5. Активные токи и полная мощность (если задуматься)

Определение полной мощности можно изложить другими словами, не меняя сути. По известным сигналам источника питания (любой фазности) нужно подобрать такой идеализированный трансформатор, для которого эти сигналы соответствовали номинальным. Определить потери в трансформаторе. При тех же напряжениях начать менять формы токов трансформатора так, чтобы при постоянстве потерь получить от трансформатора максимальную активную мощность. Эта активная мощность и будет полной мощностью для исходных сигналов. Трансформатор должен отличаться от идеального только наличием потерь от токов в нем, но эквивалентные сопротивления потерь не должны влиять на выходные напряжения. То есть потери надо считать по формуле (8.10), но в формуле (8.9) не учитывать падения напряжений от токов. Здесь потери будут пониматься суммарными, но в будущем можно вывести формулы полной мощности с сохранением пофазных потерь. Сложнее всего сконструировать (на бумаге) идеализированный трансформатор, для которого все сигналы соответствовали бы номиналам.

При оптимизационном рассмотрении однофазного трансформатора в параграфе 1.2 использовалась формула для среднеквадратичного значения тока (1.7), то есть оптимизация велась «ри тех же токах» а не «при тех же потерях». Можно ввести в формулу сопротивление с принятыми допущениями, но оно сократится и только усложнит доказательство формулы (1.18). И все же желательно поговорить об этом сопротивлении.

Номинальный режим работы трансформатора предполагает прежде всего номинальное значение индукции в его магнитопроводе. Ток намагничивания не учитывается в идеализированных расчетах, но это не означает, что можно подавать на трансформатор напряжение больше номинального. Да и меньше нельзя. При повышении напряжения для сохранения индукции надо тут же увеличить число витков обмотки и уменьшить сечение провода, чтобы сохранить заполнение окна медью. Тогда оказывается, что эквивалентное сопротивление обмотки зависит от ее номинального среднеквадратичного напряжения по формуле

$$r = k \cdot U^2 , \tag{8.21}$$

где k – какой-то постоянный коэффициент, определяемый уровнем технологии изготовления. Теперь оказывается, что потери для одной мощности получаются постоянными, например, напряжение увеличится в 2 раза, ток уменьшится в 2 раза, чтобы сохранить мощность, сопротивление увеличится в 4 раза, квадрат тока на сопротивление останется неизменным. Даже сокращать не надо, хотя сопротивление и сократится в формуле (1.18).

Не надо думать, что автор искусственно «притянул» пример эквивалентирования режимов работы с постоянством индукции и усложнил все. Во всех аппаратах напряжение тоже прямо участвует в определении полной мощности и даже прямо влияет на потери. Первое – это повышается стоимость всего. Но есть и второе. При увеличении напряжения кабельной линии надо увеличить толщину изоляции, нельзя увеличивать внешний диаметр кабеля, это будут неравные условия для эквивалентирования. Значит надо уменьшать внутренний диаметр, то есть сечение меди, повышая этим сопротивление. Законы этой связи очень сложны. Поэтому и используется простейший пример с трансформатором, когда удается получить простую формулу связи (8.21). Столь сложный подход к задаче эквивалентирования упрощается тем, до и после эквивалентирования напряжения не изменяются, значит, скорее всего и не потребуется сложный учет. Именно такое происходит в случае с однофазным трансформатором, где все эти рассуждения имеют «академический интерес».

Если все вышесказанное принято, то сразу становится понятным, сколь сложным должно стать определение полной трехфазной мощности при несимметрии напряжений по фазам. Эти фазы выполняются по одной технологии, значит, несимметрия напряжений должна привести к несимметрии сопротивлений и надо уже пользоваться формулой полной мощности (8.19). Не важно, каковы конкретные значения этих сопротивлений, важно соотношение между ними!

На (рис. 19 а) специально рассмотрен случай включения обмоток треугольником. Известны линейные напряжения на обмотках и можно для начала предположить изменение сопротивлений обмоток по формуле (8.21). Тогда формула (8.19) будет иметь вид

$$S_S^2 = \frac{9(U_{BC}^2 \bullet U_A^2 + U_{CA}^2 \bullet U_B^2 + U_{AB}^2 \bullet U_C^2)}{U_{AB}^2 \bullet U_{BC}^2 + U_{BC}^2 \bullet U_{CA}^2 + U_{CA}^2 \bullet U_{AB}^2} \cdot (U_{AB}^2 \cdot I_{AB}^2 + U_{BC}^2 \cdot I_{BC}^2 + U_{CA}^2 \cdot I_{CA}^2) = \quad (а)$$

$$= \left(3 - \frac{(U_{BC}^2 - U_{AB}^2)^2 + (U_{CA}^2 - U_{BC}^2)^2 + (U_{AB}^2 - U_{CA}^2)^2}{U_{AB}^2 U_{BC}^2 + U_{BC}^2 U_{CA}^2 + U_{CA}^2 U_{AB}^2}\right) \cdot \qquad (8.22)$$

$$\cdot (U_{AB}^2 \cdot I_{AB}^2 + U_{BC}^2 \cdot I_{BC}^2 + U_{CA}^2 \cdot I_{CA}^2). \qquad (б)$$

В упрощенном описании процессов напряжения и токи были несимметричны, но конечные формулы до сих пор получались симметричными. Сейчас получена первая формула с несимметрией токов и напряжений. Надо отметить, что в реальных случаях левый множитель почти не отличается от 3, а вычитаемое из трех в формуле (8.22 б) почти равно нулю. Например, $U_{AB} = 1$, $U_{BC} = 1$, $U_{CA} = 0.9$, одно действующее напряжение отличается на 10% – это сильная несимметрия. Тогда это вычитаемое составит

$$(0 + 0.19 + 0.19)/(1 + 0.81 + 0.81) = 0.0275 \qquad (8.23)$$

менее 1% от 3-х. Это вполне устраивает практику и можно округлить множитель до 3, упростив формулу (8.22), но это недопустимо для теории.

Три однофазных трансформатора с нулевым проводом

Этот параграф должен заставить читателя задуматься над методом определения трехфазной полной мощности. Легче понять проблему в системе трех однофазных трансформаторов с нулевым проводом без сопротивления в нем (рис. 19 б). Анализ получается проще из-за отсутствия трехпроводных связей (8.1). Формулы для мощности сети, потерь в ней, вспомогательной функции, ее производной для одной фазы и решение имеют вид

$$P_S = \frac{1}{T}\int_0^T \{ u_A \cdot i_A + u_B \cdot i_B + u_C \cdot i_C \} dt; \tag{8.24}$$

$$\Delta P = \frac{1}{T}\int_0^T \{ r_A \cdot i_A^2 + r_B \cdot i_B^2 + r_C \cdot i_C^2 \} dt; \tag{8.25}$$

$$F^* = \lambda_1 \cdot (u_A \cdot i_{aA} + u_B \cdot i_{aB} + u_C \cdot i_{aC}) + r_A \cdot i_{aA}^2 + r_B \cdot i_{aB}^2 + r_C \cdot i_{aC}^2; \tag{8.26}$$

$$dF^*/di_{aA} = \lambda_1 \cdot u_A + 2 \cdot r_A \cdot i_{aA} = 0 ; \tag{8.27}$$

$$i_{aA} = -(\lambda_1 / 2r_A) \cdot u_A ; \quad i_{aB} = -(\lambda_1 / 2r_B) \cdot u_B ; \quad i_{aC} = -(\lambda_1 / 2r_C) \cdot u_C. \tag{8.28}$$

Подстановка формул мощности и потерь в (8.28) определяет активные составляющие токов и полную мощность, причем при равных сопротивлениях формула (8.30) превращается в классическую форму (8.20).

$$i_{aA} = \frac{P_S \bullet u_A}{r_A \bullet (U_A^2 / r_A + U_B^2 / r_B + U_C^2 / r_C)}; \tag{8.29}$$

$$S_S^2 = (U_A^2/r_A + U_B^2/r_B + U_C^2/r_C) \cdot (r_A \cdot I_A^2 + r_B \cdot I_B^2 + r_C \cdot I_C^2). \tag{8.30}$$

Если связать активное сопротивление обмотки квадратичной связью с ее напряжением (8.21), то получатся формулы для активного тока и полной мощности

$$i_{aA} = \frac{P_S \bullet u_A}{3 \bullet U_A^2}; \tag{8.31}$$

$$S_S^2 = 3 \cdot (U_A^2 \cdot I_A^2 + U_B^2 \cdot I_B^2 + U_C^2 \cdot I_C^2). \tag{8.32}$$

Это и есть желаемое упрощение формулы (8.22), в которой не удавалось получить множитель 3. Как видно из формулы (8.31) сумма активных токов не равна нулю, сеть должна быть 4-х проводной. Это расплата за удаление трехпроводных связей из анализа. Интересно исследовать еще одну связь и задать объем меди обмоток всех трех фаз постоянным, тогда изменение меди любой из них возможно только за счет другой. Напряжение обмотки пропорционально числу витков, значит, длина проводника обмотки пропорциональна напряжению. При известных сечениях проводников S объем всей меди V составит

$$V = K \cdot (U_A \cdot S_A + U_B \cdot S_B + U_C \cdot S_C) = \text{const}. \tag{8.33}$$

Сопротивление r цилиндра указанных параметров пропорционально U/S, значит сечение пропорционально U/r. Тогда постоянный объем меди определится формулой

$$V = k\cdot(U_A^2/r_A + U_B^2/r_B + U_C^2/r_C) = \text{const}. \tag{8.34}$$

Этот всегда постоянный член является первым множителем в формуле (8.30), значит, полная мощность теперь будет определяться вторым множителем, который является потерями в трансформаторах (8.25). Можно наложить еще какие-то оптимизационные связи на эти потери.

Самое простое это минимизировать потери (8.25) при новой связи (8.34) постоянства объема меди обмоток. Для этого формируется вспомогательная функция с неопределенным множителем, и приравниваются нулю три ее частные производные (традиционно пишется одна формула для фазы A)

$$F^* = r_A\cdot I_A^2 + r_B\cdot I_B^2 + r_C\cdot I_C^2 + \lambda\cdot(U_A^2/r_A + U_B^2/r_B + U_C^2/r_C); \tag{8.35}$$

$$dF^*/dr_A = I_A^2 - \lambda\cdot U_A^2/r_A^2 = 0; \tag{8.36}$$

$$r_A = U_A/I_A. \tag{8.37}$$

Подстановка в формулы (8.29), (8.30) определяет активную составляющую и полную мощность

$$i_{aA} = \frac{P_S \bullet I_A \bullet u_A}{U_A \bullet (U_A \bullet I_A + U_B \bullet I_B + U_C \bullet I_C)}; \tag{8.38}$$

$$S_S^2 = (U_A\cdot I_A + U_B\cdot I_B + U_C\cdot I_C)^2 \tag{8.39}$$

в условиях оптимального распределения меди между обмотками и полного использования магнитопроводов по индукции.

Для примера взяты произвольные значения напряжений и токов в двухортном представлении (нет искажений) и произведены расчеты по формулам, номера которых указаны

$\dot{U}_A = 3+j\cdot 0$; $\dot{I}_A = 0-j\cdot 4$; $P_A = 0$; $Q_A = 12$; $U_A^2 = 9$; $I_A^2 = 16$; $U_A = 3$; $I_A = 4$;

$\dot{U}_B = 0+j\cdot 4$; $\dot{I}_B = 3+j\cdot 4$; $P_B = 16$: $Q_B = 12$; $U_B^2 = 16$; $I_B^2 = 25$; $U_A = 4$; $I_B = 5$;

$\dot{U}_C = -3-j\cdot 4$; $\dot{I}_C = -3-j\cdot 0$; $P_C = 9$; $Q_C = 12$; $U_C^2 = 25$; $I_C^2 = 9$; $U_C = 5$; $I_C = 3$.

$$S_S^2 = (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)\cdot(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) = 2500; \tag{8.20}$$

$$S_S^2 = 3\cdot(U_A^2\cdot I_A^2 + U_B^2\cdot I_B^2 + U_C^2\cdot I_C^2) = 2307; \tag{8.32}$$

$$S_S^2 = (U_A\cdot I_A + U_B\cdot I_B + U_C\cdot I_C)^2 = 2209; \tag{8.39}$$

$$P_S^2 + Q_S^2 = 625 + 1296 = 1921. \tag{B.1}$$

Наименьшее значение дает формула (B.1), но это баланс активных и реактивных мощностей, что признается большинством. По О.А. Маевскому [30] квадрат полной мощности должен превышать это значение на величину квадрата мощности несимметрии. Теперь из примера видно, что за все расхождения в расчетах надо будет отвечать ей одной! К сожалению, представленный разброс мощностей не носит абсолютный характер, например, при других сигналах значение

формулы (8.32) превышает значение формулы (8.20). Строгое ранжирование формул не производилось. Запись формулы (8.39) без квадратов

$$S_S = U_A \cdot I_A + U_B \cdot I_B + U_C \cdot I_C \tag{8.40}$$

выглядит просто ошеломительно! От нее веет каким-то доисторизмом, когда был только постоянный ток, мощности можно было определять по вольтметру и амперметру, а потом складывать! При симметричных сигналах все формулы дают одинаковый результат.

Может надо добиться эквивалентности перераспределением стали магнитопроводов, чтобы индукция была одинаковой? Например, принять, что сечение магнитопровода пропорционально действующему напряжению при равенстве витков обмоток. Тогда нужно учитывать связь ($U_A + U_B + U_C$) =const. В этой связи корни квадратные из интегралов, а это осложняет анализ. Любые попытки последующих исследователей довести исследования этого будут осложнены тем, что при произвольных формах напряжений амплитуда индукции не пропорциональна действующему напряжению, надо еще учитывать коэффициент формы, а после этого красивые формулы уже не получатся.

Все эти подстройки таят в себе следующую опасность. Можно так оптимально подобрать трансформатор под исходные сигналы, что после после начала подбора оптимальных форм токов вариационными методами будут получены те же исходные значения, они же максимально уже согласованы с трансформатором! Именно поэтому формула (8.39) дала минимальное значение.

В дальнейшем анализе полная мощность определяется формулой (8.20), активные составляющие токов – формулами (8.16), практическое выделение которых можно осуществить схемой (рис. 20).

9. КОМПЛЕКСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ В ОДНОФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Истинные теоремы имеют множество доказательств. Сейчас последует еще одно доказательство формулы балансов ответственностей в однофазной цепи (4.25). Метод доказательства будет в дальнейшем использован для получения формул трехфазных балансов, поэтому он и помещен во второй части.

9.1. Операция деления в комплексных размерностях

В обычных комплексных числах операция деления заменяется операцией умножения на сопряженный комплекс по известному правилу

$$\dot{X}/\dot{Y} = \dot{X} \bullet \overset{*}{\dot{Y}}/Y^2. \qquad (9.1)$$

Комплексные размерности (глава 5) позволяют осуществить деление по этому же правилу (9.1), но без операции сопряжения. Уже объяснялось, что сопряжение придает свойство «некоммутативности» действительной единице (надо было бы $1 \cdot i = -i \cdot 1$). В системе комплексных размерностей (табл. 8, 9) нет действительной единицы, а все имеющиеся единицы некоммутативны, то есть $a \cdot v = -v \cdot a$, и не нужна операция сопряжения. Если поделить комплексы напряжений какого-то элемента и сети строго по правилам таблиц 8, 9, то получим

$$\frac{\dot{U}_k}{\dot{U}_S} = \frac{\dot{U}_S \bullet \dot{U}_k}{\dot{U}_S \bullet \dot{U}_S} = \qquad (а) \qquad .$$

$$= -\frac{\dot{U}_k * \dot{U}_S}{\dot{U}_S * \dot{U}_S} = \qquad (б) \qquad .$$

$$= \frac{(U_{S1} \bullet v_1 + U_{S2} \bullet v_2 + \ldots)(U_1 \bullet v_1 + U_2 \bullet v_2 + \ldots)}{U_S^2} = \qquad (в) \qquad .$$

$$= \frac{(U_{S1} \bullet U_1 + U_{S2} \bullet U_2 + \ldots) \bullet V^2 + \ldots}{(U_{S1}^2 + U_{S1}^2 + U_{S1}^2 + \ldots) \bullet V^2} \to \qquad (г) \qquad (9.2)$$

$$\to \frac{(U_{S1} \bullet U_2 - U_{S2} \bullet U_1) \bullet V_{12} + (U_{S1} \bullet U_3 - U_{S3} \bullet U_1) \bullet V_{13} + (U_{S2} \bullet U_3 - U_{S3} \bullet U_2) \bullet V_{23} + \ldots}{} \quad (д) \qquad .$$

Как видно, уже в (9.2) возникает проблема «левого» (а) или «правого» (б) произведений, что повлияет на знак только мнимой части (д) результата, но не повлияет на действительную (г). Из-за этого запись (9.2 б) становится неверной, так как может быть понято, что изменился знак действительной части. Подобная проблема была и ранее с обычными комплексными числами в (9.1), там субъективно решался вопрос, какой сомножитель записывать сопряженным. Из прошлого материала уже ясно, что проблема со знаком мнимой части имеет «местное значение», как со знаком реактивной мощности. Можно договориться о любом произведении, значит и любом знаке. В будущий окончательный результат будут входить четвертые степени или произведения пар. Принятые правила должны быть одинаковыми для обеих пар и «местные правила» не повлияют на знак векторной пары. Но из-за знака действительной части запись (9.2 б) недопустима, если принять правое произведение, то принять надо раз и навсегда и со знаком плюс в записи (9.2 б). Из (9.2 д) также видно, что при делении появляются комплексные размерности нового качества, то есть уже не v_1, v_2.

Числитель (9.2 г) – это скалярное произведение (u_S,u_K). Из сравнения (9.2 д) и (5.7) видно, что числитель (9.2 д) – это векторное произведение [u_S,u_K]. В (5.7 б) уже принята попытка условно обозначить все множество членов векторного произведения ?·[u_S,u_K]. Там знак «?» показывает, что [,] не действительное число, а форма записи. Более того, это может быть одно число, умноженное на какую-то одну мнимую единицу, а может быть множество членов и множество мнимых единиц. Каждый волен понимать это, как ему надо для решения задачи. Тогда формула (9.2) может быть переписана формально

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_k}{\dot{U}_S} = \{\frac{(u_S, u_k) \bullet V^2 + ?\bullet [u_S, u_k]}{U_S^2 \bullet V^2}\}. \qquad (9.3)$$

Принятыми в ТОЭ операциями можно выделить действительную Re{$\dot{K}$} и мнимую Im{$\dot{K}$} части.

9.2. Приведение элемента цепи ко входу питания

Формула (2.4), (9.4 а) для сети из параллельно соединенных элементов лежит в основе разрабатываемой теории, как и ее обоснование, рассуждениями в параграфе 2.2. Для сети из последовательно соединенных элементов ей эквивалентна формула (9.4 б).

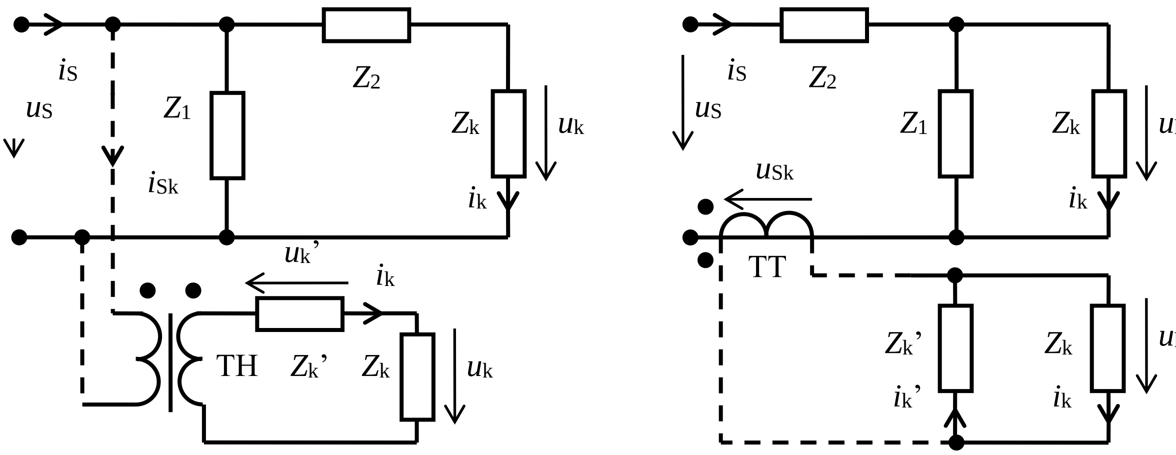
$$S_{Sk}^2 = U_S^2 \cdot (i_S, i_k) = U_S^2 \cdot \mathrm{Ex}(\dot{I}_S \bullet \dot{I}_k); \qquad (а) \qquad (9.4)$$

$$S_{Sk}^2 = I_S^2 \cdot (u_S, u_k) = I_S^2 \cdot \mathrm{Ex}(\dot{U}_S \bullet \dot{U}_k). \qquad (б) \qquad .$$

Прелесть некомплексной формы записи этих формул в наглядном обосновании. Действительно для обеих типов сетей (9.4) сумма элементных сигналов равна сетевому. Формулы окончательного баланса для цепи (4.25) построена на основе существования такого же баланса комплексных мощностей в цепи (4.12), из теоремы Телледжена. Но хотелось бы получить подобное как-то нагляднее, как в формулах (9.4). Для этого надо элементные сигналы в цепи привести ко входу питания, то есть к случаю сети, и применить формулы (9.4).

Идеальный трансформатор изменяет только амплитуды сигналов, не меняя их форм и сохраняя все виды мощностей на первичной и вторичной сторонах, сам имея нулевую ответственность. То есть, если внутри цепи есть элемент с напряжением формы сети u_S, но другой амплитуды u_k, мы можем заявить, что этот элемент подключен прямо к сети через трансформатор, рассчитать его коэффициент трансформации $k = u_k/u_S$, приведенное к сети значение тока элемента $i_{Sk} = k{\cdot}i_k$ и воспользоваться формулой (9.4 а) со скалярным произведением (i_S,i_k). И не имеет значения, есть ли этот трансформатор на самом деле. Если форма тока элемента повторяет сетевой, то мы можем утверждать, что он включен последовательно с сетью через трансформатор тока и воспользоваться формулой (9.4 б) с приведенным к сети напряжением элемента u_{Sk} .

В общем случае ни одна из форм сигналов не совпадает с сетевыми, но можно предположить существование гипотетического «комплексного» трансформатора с теми же свойствами (нулевая собственная ответственность S_{Sk}^2 за период) с комплексным коэффициентом трансформации $\dot{K}$ по формулам (9.2), (9.3). Тогда все элементы цепи этими трансформаторами можно энергетически эквивалентно привести к входу источника питания и воспользоваться формулами (9.4). На рисунке показано такое приведение внутреннего k-го элемента цепи к параллельному подключению ко входу комплексным трансформатором напряжения (рис. 21 а) и к последовательному подключению ко входу трансформатором тока (рис. 21 б).



а) Рис. 21 б)

Для схемы (рис. 21 а) приведенный к сети комплексный ток выражается формулой (9.5). Тогда при токе сети (9.6) ответственность перед сетью произвольного элемента цепи выразится уже знакомой нам формулой (9.7 е).

$$\dot{I}_{Sk} = \dot{I}_k \bullet \dot{K} = (I_1 \cdot a_1 + I_2 \cdot a_2 + ...) \cdot (u_S, u_k)/U_S^2 \quad + \qquad (а)$$

$$+(I_1 \cdot a_1 + I_2 \cdot a_2 + \ldots) \cdot \frac{(U_{S1} \bullet U_2 - U_{S2} \bullet U_1) \bullet V_{12} + (U_{S1} \bullet U_3 - U_{S3} \bullet U_1) \bullet V_{13} + ...}{U_S^2 \bullet V^2}; \qquad (б)$$

$$\dot{I}_S = I_{S1} \cdot a_1 + I_{S2} \cdot a_2 + I_{S3} \cdot a_3 + ... ; \qquad (9.6)$$

$$S_{Sk}^2 = U_S^2 \cdot \mathrm{Ex}\{ \dot{I}_S \bullet \dot{I}_{Sk} \} = U_S^2 \cdot \mathrm{Ex}\{ (I_{S1} \cdot a_1 + I_{S2} \cdot a_2 + ...) \cdot \dot{I}_{Sk} \} = \quad (а)$$

$$= U_S^2 \cdot (I_{S1} \cdot I_1 + I_{S2} \cdot I_2 + I_{S3} \cdot I_3 + ...) \cdot \frac{(u_S, u_k)}{U_S^2} + \qquad (б)$$

$$+U_S^2 \cdot \frac{(I_{S1} I_2 - I_{S2} I_1)(U_{S1} U_2 - U_{S2} U_1) + (I_{S1} I_3 - I_{S3} I_1)(U_{S1} U_3 - U_{S3} U_1) + ...}{U_S^2} = \qquad (9.7)$$

$$= U_S^2 \cdot (i_S, i_k \frac{(u_S, u_k)}{U_S^2}) + U_S^2 \cdot \qquad (в)$$

$$\cdot \Big\{ I_{S1} \cdot \{ I_1 \frac{(U_{S1} U_1 - U_{S1} U_1)}{U_S^2} + I_2 \frac{(U_{S1} U_2 - U_{S2} U_1)}{U_S^2} + I_3 \frac{(U_{S1} U_3 - U_{S3} U_1)}{U_S^2} + ... \} +$$

$$+ I_{S2} \cdot \{ I_1 \frac{(U_{S2} U_1 - U_{S1} U_2)}{U_S^2} + I_2 \frac{(U_{S2} U_2 - U_{S2} U_2)}{U_S^2} + I_3 \frac{(U_{S2} U_3 - U_{S3} U_2)}{U_S^2} + ... \} +$$

$$+ I_{S3} \cdot \{ I_1 \frac{(U_{S3} U_1 - U_{S1} U_3)}{U_S^2} + I_2 \frac{(U_{S3} U_2 - U_{S2} U_3)}{U_S^2} + I_3 \frac{(U_{S3} U_3 - U_{S3} U_{31})}{U_S^2} + ... \} + ... \Big\} =$$

$$= U_S^2 \cdot (i_S, \mathrm{Ex}\{ \dot{K} \} \cdot i_k) + U_{S2} \cdot \mathrm{Ex}\{ \dot{I}_S \mathrm{I}, \mathrm{Im}\{ \dot{K} \} \cdot \dot{I}_k \} = \qquad (г)$$

$$= U_S^2 \cdot K_u \cdot (i_S, i_k) + \mathrm{Ex}\{[u_S, u_k][i_S, i_k]\} = \qquad (д)$$

$$= (u_S, u_k)(i_S, i_k) + [u_S, u_k][i_S, i_k]. \qquad (е)$$

За пределами «экстракции» (9.7 а) остается множество членов с мнимыми единицами типа $a_1 \cdot a_2 \cdot V_{13}$ с попарно несовпадающими номерами. Перед последней формулой написаны интересные ее варианты. Из варианта (в) видно, почему при переходе от (г) к (е) сокращается U_{S2}. В последнем варианте (е) опущена запись операции экстракции.

Несомненный методологический интерес представляет вариант (9.7 в). Вторая часть варианта – это алгебраическое преобразование мнимой части всех формул (4.25 в), (9.7 е), она отражает работу мнимого трансформатора. Эта часть представляет собой множество формул типа $I_{S1} \cdot () + I_{S2} \cdot () + ...$ Так записывается скалярное произведение, когда скобки соответствуют действующему значению сигнала той же формы, то есть i_1, i_2 ..., при условии взаимной ортогональности этих форм $(i_1,i_2) = 0$. Значит выражения в скобках осуществляют эквивалентное энергетическое преобразование (мнимое трансформирование) различных форм. При этом форма сама на себя мнимо не трансформируется, например, в члене $I_{S1}\cdot I_1\cdot(U_{S1}\cdot U_1 - U_{S1}\cdot U_1) = 0$. Эта форма трансформируется действительным трансформатором в члене $I_{S1}\cdot I_1\cdot(\mathrm{u_S,u_k})/U_S^2$. Форма записи мнимого трансформатора (9.7 в) соответствует специфической форме раскрытия векторной пары (5.12), которая была дана в первой части, как красивое противопоставление извращенному векторному произведению. Здесь в (9.7 в) отмеченная внутренняя красота формы (5.12) реально проявила себя! Вообще, в преобразованиях форм мнимым трансформатором есть что-то общее с преобразованиями Гильберта.

Не следует слишком увлекаться умозаключениями типа (9.7 в), так как все это, включая гиперкомплексные числа и размерности, является инструментом приведения баланса к тождеству квадратов (4.15). Так же скептически следует относиться к «физическому обоснованию сущности явления» через привлечения комплексных чисел в курсе ТОЭ. Классические комплексные числа также являются инструментом, помогающим исследователю не запутаться в преобразованиях, спариваниях членов, определениях знаков этих пар при подведении баланса под тождество квадратов (4.13).

9.3. Приведение входа питания к элементу

Если представленный на (рис. 21 а) трансформатор является действительным, то его коэффициент трансформации определяется действительной частью комплексного коэффициента (9.3)

$$K_u = \mathrm{Ex}\{\dot{K}\} = (\mathrm{u_S,u_k})/U_S^2 \tag{9.8}$$

и между его выходом и элементом (рис. 21 а) получатся невязка напряжения u'_k

$$u'_k = u_k - K_u\cdot u_S. \tag{9.9}$$

Получается, что вход питания цепи приводится к элементу. Невязка ортогональна напряжению сети и по определению, и по формулам

$$(u_S,u'_k) = (u_S,u_k) - (u_S,u_S)\cdot(u_S,u_k)/U_S^2 = 0. \tag{9.10}$$

Проводимые операции по своей сути опять являются началом процедуры ортогонализации Грама-Шмидта в ином порядке: $u_S \rightarrow u_k \rightarrow$..., а после нахождения комплексного произведения опять получается известная формула (9.7 е). Ранее отмечалось, что порядок ортогонализации никак не влияет на результат. Напряжение u'_k не участвует в скалярной части формулы из-за (9.10), интересно посмотреть на его поведение в векторной части. Воспользуемся для этого тождеством (4.23), (5.8)

$$[u_S,u'_k][i_S,i_k] = (u_S,i_S)(u'_k,i_k) - (u_S,i_k)(u'_k,i_S) = \quad (9.11)$$

$$= (u_S,i_S)(u_k,i_k) - (u_S,i_k)(u_k,i_S) - \quad (а)$$

$$- K_u\cdot\{ (u_S,i_S)(u_S,i_k) - (u_S,i_k)(u_S,i_S) \}= [u_S,u_k][i_S,i_k]. \quad (б)$$

Из-за нуля в фигурных скобках векторные пары $[u_S,u_k]$ и $[u_S,u'_k]$ оказались тождественными. Можно сказать, что в ВЕКТОРНОМ ПРОИЗВЕДЕНИИ УЧАСТВУЕТ НЕ САМО НАПРЯЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТА, А ЕГО ОРТОГОНАЛЬНАЯ НЕВЯЗКА с напряжением сети. Аналогично ведет себя токовая невязка i'_k тока элемента с током сети при их взаимном приведении (не важно, кого к кому) в схеме (рис. 21 б). Теперь можно написать еще один вариант формул энергетического баланса участия k-го элемента цепи в полной мощности через невязки

$$S_{Suk}^2 = (u_S,u_k)(i_S,i_k) + [u_S,u'_k][i_S,i_k]; \quad (а) \quad (9.12)$$

$$S_{Sik}^2 = (u_S,u_k)(i_S,i_k) + [u_S,u_k][i_S,i'_k]. \quad (б)$$

Для красоты записи формулу (9.12 а) можно дополнить членом + $(u_S,u'_k)(i_S,i_k)$, так как $(u_S,u'_k) = 0$ по определению. Аналогично формулу (9.12 б) можно дополнить членом + $(u_S,u_k)(i_S,i'_k)$. Это дает нам право сказать, что невязка приводится комплексным трансформатором, а не мнимым. Полезность такой фразы сомнительна.

В схеме (рис. 21 б) осуществляется эквивалентное энергетическое приведение элемента ко входу питания последовательно (или наоборот). Появляется также невязка тока, формулы получаются идентичными и все кончается формулой (9.12 б). Для однофазной цепи оказывается, что напряженческий (9.12 а) и токовый (9.12 б) подходы дают одинаковые результаты

$$S_{Suk}^2 = S_{Sik}^2 = S_{Sk}^2. \quad (9.13)$$

Тождественность последних формул с (4.25 б), (9.7 е) не вызывает сомнений, но не понятно, за что им такая честь, как выделение отдельной главы? Ответ: «В этих формулах еще ярче подчеркнуто другое мировоззрение, что элемент цепи участвует в общем энергетическом балансе своим током и напряжением, а не мощностью. А теперь еще сильнее – в скалярном балансе своим током и напряжением

$$S_{Suk}^2 \quad = (u_S,u_k)(i_S,i_k) + ... \qquad (а) \qquad (9.14)$$

и в векторном балансе невязками (остатками) тока и напряжения

$$... \quad + [u_S,u'_k][i_S,i_k]. \qquad (б) \qquad (9.14)»$$

К формуле (а) мы приходим через реальный (действительный) трансформатор в схеме (рис. 21 а), а для формулы (б) надо остаток (9.9) привести мнимым трансформатором. Первая часть (а) обеспечивает баланс по всей цепи, а вторая часть (б) только перераспределяет его, давая в сумме нуль. Только такое другое мировоззрение позволило автору получить формулу трехфазного энергетического баланса в следующей главе. Интересно также, что член $P_S{\cdot}P_k$ энергетического баланса появляется только после раскрытия векторной части балансов (9.12), (9.14 б). Там, где балансируются «вторые» по шагу Грама-Шмидта невязки. Так и хочется написать «второстепенные» в обиду авторам энергопотоковых теорий.

Теперь для осуществления трехфазного баланса надо рассмотреть работу сперва «действительного» трехфазного трансформатора.

10. МНОГОФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

10.1. Трехфазные преобразования

Принято, что полная мощность трехпроводной сети определяется формулой (8.20) и сохраняются все трехпроводные связи (8.1).(8.8). Перебором вариантов автор установил, что только схема переключаемого трансформатора (рис. 22 а) сохраняет значение полной мощности (8.20) на первичной и вторичной сторонах. На этой схеме имеется четыре тройки симметричных обмоток трансформатора с разным количеством витков. Для простоты принято, что на первичной стороне число витков W=1, тогда число витков на вторичной стороне будет коэффициентом трансформации K соответствующей обмотки. Включение троек на рисунке соответствует классическому фазоповоротному варианту, что абсолютно противоречит мировоззрению автора пособия, не признающего сдвигов. Это – классический ФАЗОПЕРЕРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЙ трансформатор. Глядя на рисунок, легко написать уравнения перераспределения напряжений от первичной стороны ко вторичной (10.1) и токов от вторичной к первичной (10.2). Эти уравнения (10.1 а) компактнее записываются в матричной форме (10.1 б):

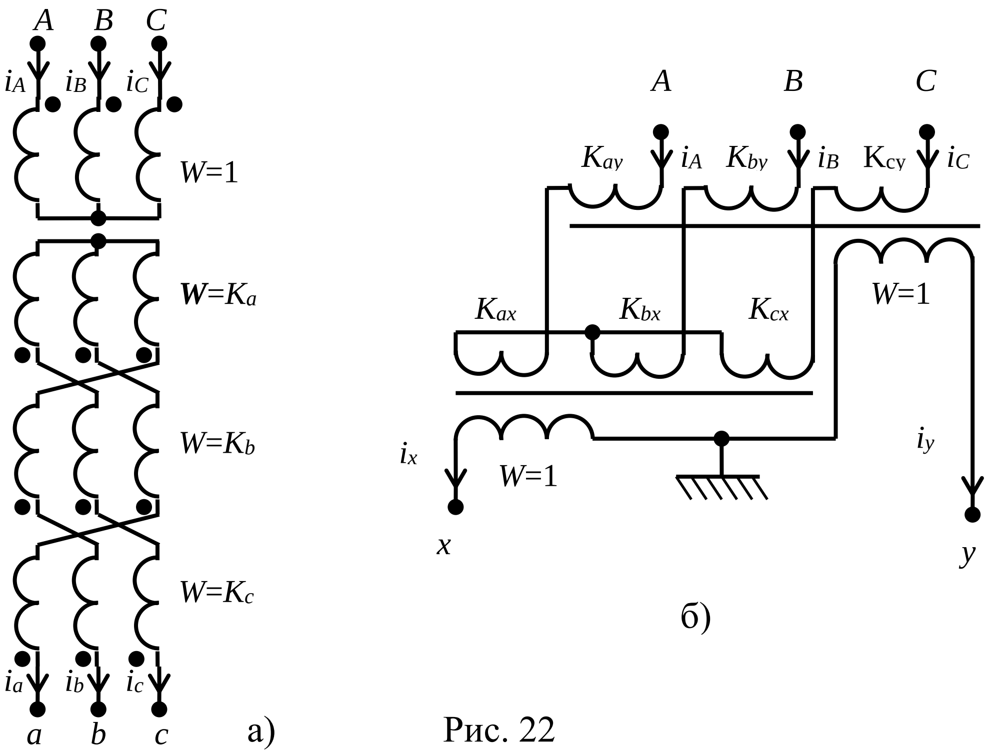


Рис. 22

$$
\begin{aligned}
u_a &= K_c \cdot u_A + K_a \cdot u_B + K_b \cdot u_C\,; \\
u_b &= K_b \cdot u_A + K_c \cdot u_B + K_a \cdot u_C\,; \qquad \text{(а)} \quad (10.1) \\
u_c &= K_a \cdot u_A + K_b \cdot u_B + K_c \cdot u_C\,;
\end{aligned}
$$

$$
\begin{vmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} K_c & K_a & K_b \\ K_b & K_c & K_a \\ K_a & K_b & K_c \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{vmatrix}; \qquad \text{(б)}
$$

$$
\begin{vmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} K_c & K_b & K_a \\ K_a & K_c & K_b \\ K_b & K_a & K_c \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{vmatrix}. \qquad (10.2)
$$

Здесь коэффициенты индексированы так под красоту записи фазы C, которая в будущем займет особое положение. Обратные решения проще найти, заменив последние уравнения в каждой системе из трех уравнений на нулевые балансы (8.1). Определитель обоих систем получился одинаковым. Позже он окажется равным квадрату общего коэффициента трансформации K , поэтому так его и обозначим

$$
K^2 = \begin{vmatrix} K_c & K_a & K_b \\ K_b & K_c & K_a \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 0.5 \cdot \{\, (K_a - K_b)^2 + (K_b - K_c)^2 + (K_c - K_a)^2 \,\}; \qquad (10.3)
$$

$$
\begin{vmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{vmatrix} = \frac{1}{K^2} \begin{vmatrix} K_c & K_b & K_a \\ K_a & K_c & K_b \\ K_b & K_a & K_c \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{vmatrix}; \qquad (10.4)
$$

$$\begin{vmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{vmatrix} = \frac{1}{K^2} \begin{vmatrix} K_c & K_a & K_b \\ K_b & K_c & K_a \\ K_a & K_b & K_c \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{vmatrix}. \tag{10.5}$$

С их учетом уравнений связи из (10.1) получаются уравнения для квадратов мгновенных значений (10.6), а затем для из суммы (10.7):

$$\begin{vmatrix} u_a^2 \\ u_b^2 \\ u_c^2 \end{vmatrix} = K^2 \cdot \left\{ \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} (K_a - K_b)^2 & (K_b - K_c)^2 & (K_c - K_a)^2 \\ (K_c - K_a)^2 & (K_a - K_b)^2 & (K_b - K_c)^2 \\ (K_b - K_c)^2 & (K_c - K_a)^2 & (K_a - K_b)^2 \end{vmatrix} \right\} \cdot \begin{vmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{vmatrix}; \tag{10.6}$$

$$(u_a^2 + u_b^2 + u_c^2) = K^2 \cdot (u_A^2 + u_B^2 + u_C^2). \tag{10.7}$$

Аналогично получаются уравнения связи для квадратов токов (не приводятся), а их сумма (10.8) показывает, что K^2 действительно является обобщенным коэффициентом трансформации и выполняется баланс не только полных мощностей на разных сторонах трансформатора, но даже этот баланс (8.20) для МГНОВЕННЫХ значений (10.9):

$$(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2) = K^2 \cdot (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2); \tag{10.8}$$

$$(u_A^2 + u_B^2 + u_C^2)(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2) = (u_a^2 + u_b^2 + u_c^2)(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2). \tag{10.9}$$

После того, как напряженческий (10.7), токовый (10.8) и энергетический (10.9) балансы в общем случае доказаны, можно ограничить избыточность трех коэффициентов трансформации, так как для любого перераспределения напряжений достаточно двух обмоток, включенных зигзагом. Сделаем это ограничение оптимизационным. С практической точки зрения надо минимизировать медь вторичных обмоток. Медь одной обмотки при неизменных токах пропорциональна числу витков, поэтому надо получить минимум суммы модулей коэффициентов трансформации. Модули минимизируются только численными методами, поэтому ограничимся поиском квазиоптимума: минимум суммы квадратов коэффициентов трансформации (10.10). Для поиска минимума формируется вспомогательная функция (10.11 а), в которую входят минимизируемая функция и функция неизменной связи K^2 = const (10.3) с неопределенным множителем. После взятия трех производных вспомогательной функции, приравнивания их нулю (10.11 б, в, г), а потом суммирования, получается уравнение связи для коэффициентов (10.12), обеспечивающее требуемый минимум (10.10) при неизменном общем коэффициенте трансформации (10.3):

$$K_a^2 + K_b^2 + K_c^2 = \min. \tag{10.10}$$

$$F^* = K_a^2 + K_b^2 + K_c^2 + \lambda \cdot 0.5 \cdot \{ (K_a - K_b)^2 + (K_b - K_c)^2 + (K_c - K_a)^2 \}; \text{ (а)}$$

$$dF^*/dK_a = 2 \cdot K_a + \lambda \cdot \{2 \cdot K_a - K_b - K_c\} = 0; \text{ (б)} \tag{10.11}$$

$$dF^*/dK_b = 2 \cdot K_b + \lambda \cdot \{2 \cdot K_b - K_c - K_a\} = 0; \text{ (в)}$$

$$dF^*/dK_c = 2 \cdot K_c + \lambda \cdot \{2 \cdot K_c - K_a - K_b\} = 0. \text{ (г)}$$

$$K_a + K_b + K_c = 0. \tag{10.12}$$

Во всей литературе по электрическим машинам даются формулы трехфазного фазовращателя

$$\begin{vmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{vmatrix} = \frac{2K}{3} \begin{vmatrix} \cos(\varphi) & \cos(\varphi-120) & \cos(\varphi+120) \\ \cos(\varphi+120) & \cos(\varphi) & \cos(\varphi-120) \\ \cos(\varphi-120) & \cos(\varphi+120) & \cos(\varphi) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{vmatrix}; \qquad (10.13)$$

$$\begin{vmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{vmatrix} = \frac{2}{3K} \begin{vmatrix} \cos(\varphi) & \cos(\varphi+120) & \cos(\varphi-120) \\ \cos(\varphi-120) & \cos(\varphi) & \cos(\varphi+120) \\ \cos(\varphi+120) & \cos(\varphi-120) & \cos(\varphi) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{vmatrix}; \qquad (10.14)$$

в которых все коэффициенты выражены через два параметра: общий коэффициент K трансформации и угол поворота φ

$$k_c = 2K\cdot\cos(\varphi)/3; \quad k_a = 2K\cdot\cos(\varphi-120)/3; \quad k_b = 2K\cdot\cos(\varphi+120)/3. \qquad (10.15)$$

Выражения для токов получаются такими же, но при замене u на i и перемещении K из числителя в знаменатель или наоборот. Здесь надо обратить особое внимание на определение понятия «общий коэффициент трансформации». Его КВАДРАТ определяется выражениями (10.7), (10.8), а сам он получается как плюс корень квадратный. Видно, что общепринятые формулы (10.13), (10.14) полностью удовлетворяют всем выведенным соотношениям (10.1)... (10.12), включая условие оптимальности (10.10), (10.12), кроме того, они выглядят симметрично и красиво. Мы используем ее. Пока не доказана единственность этой общепринятой формы записи.

Если формулы (10.13), (10.14) общеизвестны и приняты автором пособия, то возникает вопрос, нужен ли был этот раздел 10.1? Этот раздел позволил:

1) проверить правильность «общепринятых формул»;

2) показать оптимальность общепринятой формы записи;

3) показать, что полная мощность (8.20) сохраняется при передаче через трансформатор (рис. 22 а) и искажается при несимметрии витков.

К сожалению, общепринятые формулы поддерживают ошибочную точку зрения обыденного сознания о том, что возможен поворот фазы. Нет никакого поворота! Есть только перераспределение! Это было ранее показано рисунком (рис. 7), а угол в формулах (10.13), (10.14) – красивая и удобная форма записи, справедливая даже для несинусоидальных сигналов.

Автору не известно, как были получены формулы (10.13), (10.14), может, как в этом разделе анализом работы реального перераспределительного трансформатора (рис. 22 а), может проекцией осей на повернутые оси, как это критикуется в следующем разделе, главное, что результаты совпали! Это нельзя сказать об «общепринятом преобразовании» следующего раздела. Именно поэтому, и был необходим раздел 10.1.

10.2. Трехфазно-двухфазные преобразования

Можно, но сложно производить трехфазный анализ в трехпроводных сетях при наличии связей (8.1). Каждое действие надо производить с оглядкой на эти формулы. Это общая проблема анализа работы трехпроводных электрических аппаратов, и известно решение этой проблемы: переход к эквивалентному двухфазному анализу. В нашем случае требуется энергетическая эквивалентность. Получается, что делается логическое допущение о возможности такой эквивалентности. Это принимается аксиоматически. Если не принять эту аксиому, то можно не читать вторую часть.

С перехода от трехфазных осей к двухфазным начинается учебный анализ обобщенной машины переменного тока [54, 59]. В учебниках преобразования выполнены проекцией симметричных трехфазных осей на ортогональные двухфазные без оглядок на законность этой операции. Когда же баланс (активных!) мощностей не сошелся в 1.5 раза все авторы взяли и ввели такую же поправку, вместо поиска ошибки! Вот как выглядит уравнение электромагнитного момента у Парка-Горева (в нем потокосцепления и токи по продольной и поперечным осям, $P_{\text{п}}$ – число пар полюсов) [54 – стр.57, 59 – стр. 146]

$$M_{\text{эл.м}} = 1.5 \cdot P_{\text{п}} \cdot (\psi_{\text{d}} \cdot i_{\text{q}} - \psi_{\text{q}} \cdot i_{\text{d}}). \qquad (10.16)$$

Автор пособия считает, что корни столь массовой ошибки лежат в психологии первого восприятия человеком переменного тока в курсе ТОЭ по рис. 5 с его осями и поворотами вектора синусоидального сигнала, с подсознательным принятием эквивалентности этого поворота и сдвига во времени сигнала любой формы (рис. 7 а). Закрепляет это восприятие простой факт, что включение трехфазной машины переменного тока в двухфазную сеть снижает ее (габаритную) мощность примерно в 1.5 раза. Люди не обращают внимания на то, что сравнивать мощность трехфазной машины надо с мощностью двухфазной машины, спроектированной как двухфазная, а не с мощностью двухфазного включения трехфазной машины. После формирования двух противоположных вариантов обыденного сознания, каждый из двух электриков с противоположным сознанием поймет фразу из [54 – стр.41]: «Поскольку мощность инвариантна, то ввиду того, что мощность двухфазной машины в 1.5 раза меньше мощности трехфазной машины, выражение (1-56) имеет такой же вид, как и (1-55), но с множителем 1.5», – поймет в свою пользу! Как тут еще раз не вспомнить слова академика Арцимовича в предисловии к первой части. Люди на практике убеждаются, что при двухфазном включении мощность машины падает, и теория это же говорит! Поражает не ошибка авторов классического уравнения (они тоже люди), а столь длительное ее необнаружение! Однако продолжим правильное доказательство.

Допускаем, что энергетически эквивалентное преобразование делает фазоперераспределительный трансформатор, например, вида (рис. 22 б) на двух 4-х обмоточных однофазных трансформаторах напряжения $ТН_x$ и $ТН_y$. Это очень важное допущение! Написать уравнения для схемы (рис. 22 б) проще, если считать нижнюю двухфазную обмотку первичной, а верхнюю трехфазную – вторичной, то есть, если рассмотреть режим преобразования двухфазного напряжения в трехфазное. Число витков первичных обмоток проще принять единичным W=1, тогда вторичные витки будут численно совпадать с коэффициентом трансформации. В предыдущей схеме (рис. 22 а) оптимальное для трансформатора преобразование описывалось только двумя коэффициентами (10.13), (10.14), схема (рис. 22 б) пока описывается шестью коэффициентами трансформации:

$$u_A = K_{ax} \cdot u_x + K_{ay} \cdot u_y;$$
$$u_B = K_{bx} \cdot u_x + K_{by} \cdot u_y; \quad (10.17)$$
$$u_C = K_{cx} \cdot u_x + K_{cy} \cdot u_y;$$

$$i_x = K_{ax} \cdot i_A + K_{bx} \cdot i_B + K_{cx} \cdot i_C; \quad (10.18)$$
$$i_y = K_{ay} \cdot i_A + K_{by} \cdot i_B + K_{cy} \cdot i_C.$$

Требуется наложение дополнительных связей для ограничения числа коэффициентов до двух. Надо пояснить, что перераспределительные трансформаторы (рис. 22) применяются здесь как МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ и оптимизация выполняется для упрощения использования этого аппарата, а не уменьшения трансформатора, хотя законы гармонии мира решают эти задачи одновременно (10.10), (10.12). Баланс (активных) мощностей в схеме (рис. 22 б) выполняется ВСЕГДА, потому что в ней применены реальные идеальные трансформаторы, описываемые реальными законами ТОЭ, и мы навсегда застрахованы от любой ошибки, включая упомянутый коэффициент 1.5 вместо 1.0 у Парка и Горева. Баланс полных мощностей (8.20) в общем случае не соблюдается, поэтому надо наложить такие связи на коэффициенты трансформации, чтобы этот баланс соблюдался. Формы первичных и вторичных сигналов, их несимметрия в анализе не участвуют.

Потребуем, чтобы нуль точки трехфазных обмоток и нуль трехфазной системы напряжений совпадали, тогда из (10.17) сразу следуют два уравнения связи

$$K_{ax} + K_{bx} + K_{cx} = 0; \qquad K_{ay} + K_{by} + K_{cy} = 0. \tag{10.19}$$

Для баланса полных мощностей должна обеспечиваться пропорциоальность сумм квадратов мгновенных значений первичных и вторичных сигналов. Уравнение (10.20) получается сразу из (10.17), а (10.21) получается из (10.18) после замен произведений типа $i_A \cdot i_B$ на только квадратичные члены (8.5) и сокращений, используя уже полученные связи (10.19):

$$u_A^2 + u_B^2 + u_C^2 = 2 \cdot u_x \cdot u_y \cdot (K_{ax} \cdot K_{ay} + K_{bx} \cdot K_{by} + K_{cx} \cdot K_{cy}) + $$

$$+ u_x^2 \cdot (K_{ax}^2 + K_{bx}^2 + K_{cx}^2) + u_y^2 \cdot (K_{ay}^2 + K_{by}^2 + K_{cy}^2); \qquad (10.20)$$

$$i_x^2 + i_y^2 = i_A^2 \cdot (-K_{bx} \cdot K_{cx} - K_{by} \cdot K_{cy}) + \qquad 21)$$

$$+ i_B^2 \cdot (-K_{cx} \cdot K_{ax} - K_{cy} \cdot K_{ay}) +$$

$$+ i_C^2 \cdot (-K_{ax} \cdot K_{bx} - K_{ay} \cdot K_{by}).$$

Из (10.20) сразу следует уравнение связи (10.22), а оставшиеся в уравнениях (10.20), (10.21) коэффициенты должны быть равны между собой и определять обобщенный коэффициент трансформации (10.23 а,г). Если попытаться преобразовать все полученные связи, то можно получить еще много вариаций. Наиболее интересны из них (10.23 д...ж).

$$K_{ax} \cdot K_{ay} + K_{bx} \cdot K_{by} + K_{cx} \cdot K_{cy} = 0; \tag{10.22}$$

$$K_{ax}^2 + K_{bx}^2 + K_{cx}^2 = K_{ay}^2 + K_{by}^2 + K_{cy}^2 = \qquad (а) \quad (10.23)$$

$$= 2 \cdot K_{ax}^2 + K_{bx} \cdot K_{cx} + 2 \cdot K_{ay}^2 + K_{by} \cdot K_{cy} = \qquad (б)$$

$$= 2 \cdot K_{bx}^2 + K_{cx} \cdot K_{ax} + 2 \cdot K_{by}^2 + K_{cy} \cdot K_{ay} = \qquad (в)$$

$$= 2 \cdot K_{cx}^2 + K_{ax} \cdot K_{bx} + 2 \cdot K_{cy}^2 + K_{ay} \cdot K_{by} = \qquad (г)$$

$$= 3 \cdot (K_{ax}^2 + K_{ay}^2)/2 = \qquad (д)$$

$$= 3 \cdot (K_{bx}^2 + K_{by}^2)/2 = \qquad (е)$$

$$= 3 \cdot (K_{cx}^2 + Kcy^2)/2. \qquad (ж)$$

Часть полученных связей избыточна, так как теоретически достаточно четырех связей для уменьшения числа коэффициентов с шести до двух, но все уравнения связей (10.19), (10.22), (10.23) должны выполняться! Поиск общего решения весьма затруднителен, но, глядя на (10.13), (10.14), были предположены симметричные тригонометрические формы:

$$i_x = \sqrt{2/3}\cdot\{\, i_A\cdot\cos(\varphi) + i_B\cdot\cos(\varphi-120) + i_C\cdot\cos(\varphi+120)\,\}/K; \quad (10.24)$$
$$i_y = \sqrt{2/3}\cdot\{\, i_A\cdot\sin(\varphi) + i_B\cdot\sin(\varphi-120) + i_C\cdot\sin(\varphi+120)\,\}/K;$$

$$u_A = \sqrt{2/3}\cdot\{\, u_x\cdot\cos(\varphi) + u_y\cdot\sin(\varphi)\,\}/K;$$
$$u_B = \sqrt{2/3}\cdot\{\, u_x\cdot\cos(\varphi-120) + u_y\cdot\sin(\varphi-120)\,\}/K; \quad (10.25)$$
$$u_C = \sqrt{2/3}\cdot\{\, u_x\cdot\cos(\varphi+120) + u_y\cdot\sin(\varphi+120)\,\}/K;$$

$$u_x = \sqrt{2/3}\cdot K\cdot\{\, u_A\cdot\cos(\varphi) + u_B\cdot\cos(\varphi-120) + u_C\cdot\cos(\varphi+120)\,\}; \quad (10.26)$$
$$u_y = \sqrt{2/3}\cdot K\cdot\{\, u_A\cdot\sin(\varphi) + u_B\cdot\sin(\varphi-120) + u_C\cdot\sin(\varphi+120)\,\};$$

$$i_A = \sqrt{2/3}\cdot K\cdot\{\, i_x\cdot\cos(\varphi) + i_y\cdot\sin(\varphi)\,\};$$
$$i_B = \sqrt{2/3}\cdot K\cdot\{\, i_x\cdot\cos(\varphi-120) + i_y\cdot\sin(\varphi-120)\,\}; \quad (10.27)$$
$$i_C = \sqrt{2/3}\cdot K\cdot\{\, i_x\cdot\cos(\varphi+120) + i_y\cdot\sin(\varphi+120)\,\}.$$

Видно, что нулевые балансы коэффициентов (10.19) и (10.22) выполняются. Для проверки связей (10.23) проще принять K=1 и убедиться, что все результаты получаются единичными, например, для (10.23 а, д)

$$2\cdot\{\cos^2(\varphi) + \cos^2(\varphi - 120) + \cos^2(\varphi + 120)\}/3 = 1; \quad (10.28)$$
$$2\cdot 3\cdot\{\cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi)\}/(2\cdot 3) = 1.$$

К сожалению, не доказана единственность полученных формул, что, однако, не потребуется при их применении. Эти формулы отличаются от известных [54, 59] в $\sqrt{2/3}$ раз. Соответственно, в известном уравнении Парка - Горева (10.16) во столько раз возрастут токи и потокосцепления, их произведение возрастет в 1.5 раза и коэффициент 1.5, введенный для сохранения баланса активных мощностей, будет равен 1.

Приведенное доказательство имеет гораздо большие последствия, чем коррекция коэффициента. Формулы получены для ПРОИЗВОЛЬНЫХ ФОРМ и НЕСИММЕТРИЙ сигналов на обоих сторонах трансформатора! А при «классическом подходе» почти те же формулы получены для полной симметрии и синусоидальности этих сигналов. К сожалению, автор пособия не смог найти давно мелькнувшую перед его глазами публикацию, где отмечалось возникновение очень больших трудностей линейного преобразования при косоугольных осях. Эти преобразования везде называются «линейными», поэтому приведенные в пособии преобразования автор называет «трансформаторными». Математики имеют право делать любые линейные косоугольные преобразования, но почему электрики их приняли без оглядки? Математики не думают о законах сохранения при преобразованиях. Приведенные преобразования сохраняют не только активную, но и ПОЛНУЮ мощность в форме (8.20).

10.3. Полная мощность двухфазной сети

По умолчанию в предыдущем разделе полная мощность определялась по формуле (10.29), что выглядит вполне симметрично с формулой (8.20). Однако, если сравнить два рисунка (рис. 22), то можно обратить внимание на то, что в обоих случаях электроснабжение осуществляется по трем проводам, только в двухфазном случае появился нулевой (земляной) провод, ток которого $i_x + i_y$ не принимает участия в балансе

$$S_S^2 = (U_x^2 + U_y^2)\cdot(I_x^2 + I_y^2) = U_S^2\cdot I_S^2\ . \qquad (10.29)$$

В трехпроводной сети нет нулевого провода. Но сети без нуля – самый распространенный на практике случай. Нет двухфазных сетей без нулевого провода, а ток в нем может превышать фазные токи. Учет тока нулевого провода сразу нарушит так красиво полученный баланс полных мощностей (10.29) и сделает невозможным все дальнейшие выкладки.

Спасти ситуацию может внимательное рассмотрение рисунка (рис. 22 б). Токи i_a, i_b, i_c, i_x, i_y проходят по обмоткам трансформатора и подводящим проводам. То есть они определяют полную мощность трансформатора. В трехфазной трехпроводной сети эти токи определяют и полную мощность подводящих проводов (кабеля), что специально рассматривалось в главе 8. В двухфазной трехпроводной сети появляется нулевой провод и полная мощность кабеля должна рассчитываться иначе. Таким образом, балансируемая полная мощность может рассматриваться только с точки зрения загрузки ТРАНСФОРМАТОРА и только! То, что мы имели в трехфазной трехпроводной сети, было просто приятным исключением, приятным совпадением мощностей кабеля и трансформатора!

Такое только трансформаторное определение позволяет распространить формулу полной мощности (8.20) и на 4-х проводные трехфазные сети с нулевым проводом. Однако, это не даст возможности распространить полученные ниже выводы трехфазного баланса и на 4-х проводные сети, так как уравнения связи (8.1) слишком глубоко задействованы в доказательствах. Но идеи могут быть использованы для получения расширенных формул.

При желании можно перенести это определение полной мощности (10.29) и на двухфазные провода. Тогда в качестве нулевого провода должна использоваться земля с ее минимальным сопротивлением, как это показано на (рис. 22 б). Аналогично можно рассматривать и четырехпроводные сети. Все это остается за пределами рассмотрения.

10.4. Двухфазно-двухфазные преобразования

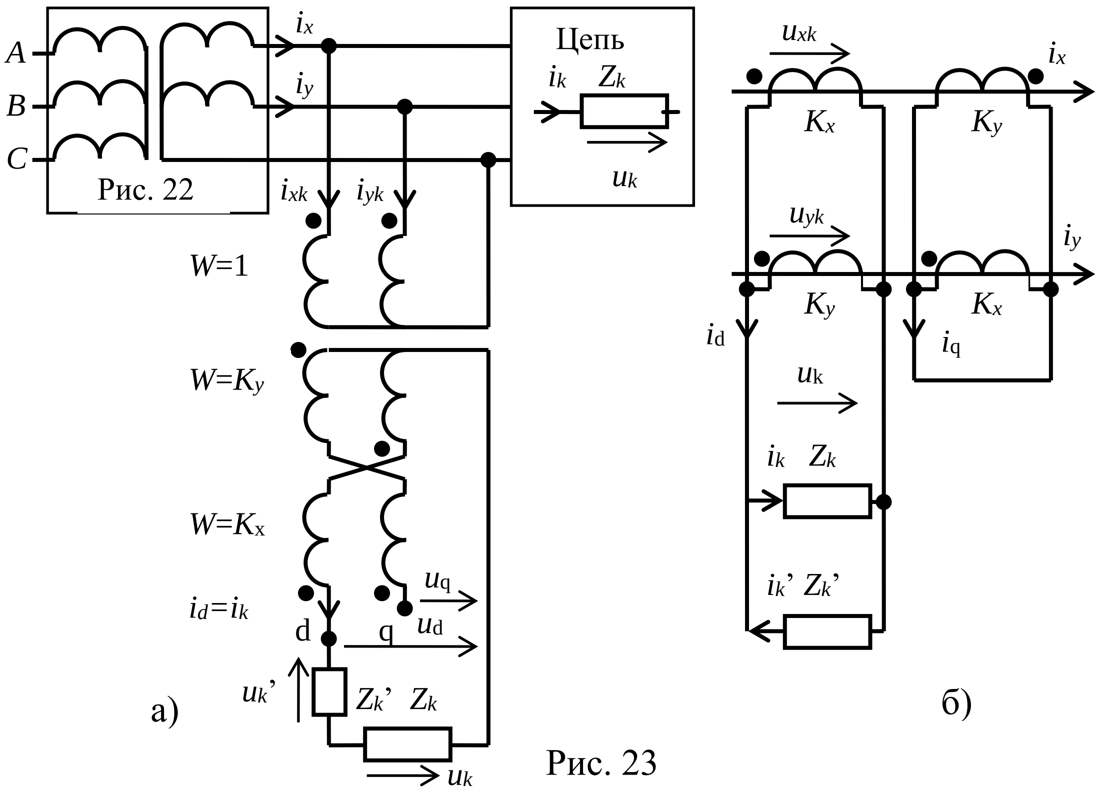


Рис. 23

В главе 9 k-й элемент цепи удалось энергетически эквивалентно привести ко входу питания и наоборот с помощью трансформаторов напряжения и тока (рис. 21) и вывести формулы энергетического баланса. Аналогичный прием применен и в этой главе для трехфазных цепей. Такое приведение возможно с помощью трехфазно-трехфазного трансформатора (рис. 22 а), когда приводимый элемент цепи подключается к линейному напряжению *a*–*b* [25, 26], и с помощью трехфазно – двухфазного трансформатора (рис. 22 б). Такое приведение позволяет получить все необходимые формулы и приятно тем, что осуществляет связь непосредственно с трехфазной сетью.

Дальнейшие выводы значительно упрощаются, если преобразовать трехфазную сеть в двухфазную, а затем осуществлять двухфазно – двухфазное приведение элемента цепи (рис. 23) и получить формулу двухфазного баланса [28].

По аналогии со схемой (рис. 22 а) на схеме (рис. 23 а) число витков первичной обмотки W=1, а числа витков вторичных обмоток определяют коэффициенты трансформации. Схема полностью определена только двумя коэффициентами. Это свойство, а также показанные направления включения обмоток, определены после перебора вариантов и выбора такого, который обеспечивает баланс первичной и вторичной полных мощностей на сторонах x, y и d, q. Схема описывается системами уравнений с определителем $\Delta = +(K_x^2 + K_y^2)$

$$u_d = K_{xu} \cdot u_x + K_{yu} \cdot u_y = K_u \cdot (\cos(\varphi) \cdot u_x + \sin(\varphi) \cdot u_y); \quad (10.30)$$
$$u_q = -K_{yu} \cdot u_x + K_{xu} \cdot u_y = K_u \cdot (-\sin(\varphi) \cdot u_x + \cos(\varphi) \cdot u_y); \quad .$$

$$u_x = (K_{xu} \cdot u_d - K_{yu} \cdot u_q)/\Delta = (\cos(\varphi) \cdot u_d - \sin(\varphi) \cdot u_q)/K_u; \quad (10.31)$$
$$u_y = (K_{yu} \cdot u_d + K_{xu} \cdot u_q)/\Delta = (\sin(\varphi) \cdot u_d + \cos(\varphi) \cdot u_q)/K_u; \quad .$$

$$i_x = K_{xu} \cdot i_d - K_{yu} \cdot i_q = K_u \cdot (\cos(\varphi) \cdot i_d - \sin(\varphi) \cdot i_q); \quad (10.32)$$
$$i_y = K_{yu} \cdot i_d + K_{xu} \cdot i_q = K_u \cdot (\sin(\varphi) \cdot i_d + \cos(\varphi) \cdot i_q); \quad .$$

$$i_d = (K_{xu} \cdot i_x + K_{yu} \cdot i_y)/\Delta = (\cos(\varphi) \cdot i_x + \sin(\varphi) \cdot i_y)/K ; \quad (10.33)$$
$$i_q = (-K_{yu} \cdot i_x + K_{xu} \cdot i_y)/\Delta = (-\sin \varphi \cdot i_x + \cos(\varphi) \cdot i_y)/K, \quad .$$

где $K_u = \sqrt{\Delta}$.

В токовом варианте схемы (рис. 23 б) удобнее принять единичным W=1 числа витков вторичных обмоток, тогда показанные на рисунке коэффициенты определяют числа витков первичных обмоток. Значение определителя сохраняется. Схема описывается такими же уравнениями (10.30). (10.33), но с обменом местами токов и напряжений. Поэтому приводится только первое уравнение (10.34)

$$i_d = K_{xi} \cdot i_x + K_{yi} \cdot i_y = K_i \cdot (\cos(\varphi) \cdot i_x + \sin(\varphi) \cdot i_y); \quad (10.34)$$
$$i_q = -K_{yi} \cdot i_x + K_{xi} \cdot i_y = K_i \cdot (-\sin(\varphi) \cdot i_x + \cos(\varphi) \cdot i_y). \quad .$$

11. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРТОГОНАЛИЗАЦИЯ И СКАЛЯРНАЯ ЧАСТЬ МНОГОФАЗНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА

11.1. Пространственная ортогонализация временных ортов в многофазных сетях

Перепишем формулы полных мощностей однофазной (1.18), двухфазной (10.29) и трехфазной (8.20) сетей и предположим наличие в сети двух форм сигналов 1 и 2. Если допустить, что 1 – синусоида, а 2 – косинусоида, то общность не будет нарушена.

$$S_S^2 = U_S^2 \cdot I_S^2 = \qquad (а) \qquad (11.1)$$
$$= (U_{S1}^2 + U_{S2}^2)(I_{S1}^2 + I_{S2}^2); \qquad (б) \qquad .$$

$$S_S^2 = (U_x^2 + U_y^2)(I_x^2 + I_y^2) = \qquad (а) \qquad (11.2)$$
$$= (U_{x1}^2 + U_{x2}^2 + U_{y1}^2 + U_{y2}^2)(I_{x1}^2 + I_{x2}^2 + I_{y1}^2 + I_{y2}^2); \qquad (б) \qquad .$$

$$S_S^2 = (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) = \qquad (а) \qquad (11.3)$$
$$= (U_{A1}^2+U_{A2}^2+U_{B1}^2+U_{B2}^2+U_{C1}^2+U_{C2}^2)(I_{A1}^2+I_{A2}^2+I_{B1}^2+I_{B2}^2+I_{C1}^2+I_{C2}^2). \qquad (б) \qquad .$$

Чем дольше размышлять над вариантами (б) записи этих формул, тем больше будет пониматься их качественное различие. Действительно, в формулу (11.1 б) в квадратуру входят члены с разными ортогональными на периоде (во времени) формами (ортами) 1 и 2 сигналов. Это строго соответствует концепции Фризе и ортогонализации Грама-Шмидта. Эти формы могут быть выделены, например, по заданным эталонам описанными в главе 7 аппаратными средствами. В формулах (11.2 б), (11.3 б) в квадратуре находятся одни и те же формы, но в разных фазах! Если аппаратными средствами выделить из какого-то элемента синусоиду, то этого еще мало для дальнейшего анализа, надо еще знать, какой фазе принадлежит эта синусоида. Таким образом, к ВРЕМЕННОЙ ортогонализации сигналов добавляется ПРОСТРАНСТВЕННАЯ! Это отмечено автором во всех публикациях, начиная с 1990 года [24, 25, 26].

Если элемент трехпроводной сети включен на линейное напряжение u_{AB} и в нем выделена синусоида, то какая-то ее часть должна принадлежать фазе A, а какая-то – фазе В. Если научиться разделять сигналы одной формы в пространстве, то можно произвести их записи в форме процедуры Грама-Шмидта, но это уже не будет их процедурой. Процедура предполагает не только треугольную форму записи, но и алгоритм получения следующего орта.

Если сюда добавить метод выделения пространственно ортогонального сигнала (хвоста – см. ниже), то это будет уже развитием процедуры Грама-Шмидта, но не она сама.

После разложения всех сигналов цепи надо подобрать соответствующую систему гиперкомплексных чисел (или размерностей), чтобы записать сетевые сигналы и сигналы элемента в комплексной форме и записать формулу элементной ответственности в форме (4.12). Такая запись автоматически обеспечит элементный баланс по всей цепи. Останется только доказывать его справедливость (всю оставшуюся жизнь), так как, наверняка, будут предложены другие комплексные числа и при полном балансе из-за (4.12) раскладка по элементам будет другой.

Системы кватернионов и октав – первые гиперкомплексные числа, которые «с очевидностью» должны быть применены для указанных целей [25, 26]. Однако эта «очевидность» оказалась тупиковой. Нельзя слепо идти за математикой, надо создавать ее под реальные процессы в цепях. В параграфе 4.4 уже отмечена особенность взаимодействий только двух ортогональных форм сигналов $U_1{\cdot}I_2 - U_2{\cdot}I_1$ в однофазной цепи и там нет взаимодействий для большего числа сигналов, например, под систему кватернионов (4.14).

Опять «очевидно», что в многофазных цепях одинаковые формы сигналов в разных фазах должны как-то взаимодействовать между собой. Первое, что приходит на ум, это в векторном балансе «очевидно» должен быть скалярный член суммы активных мощностей (В.1)

$$P_S = (u_A,i_A) + (u_B,i_B) + (u_C,i_C). \qquad (11.4)$$

«Очевидно» должен быть векторный член суммы «реактивных» мощностей (В.1)

$$Y_S = U_{A1}{\cdot}I_{A2} - U_A2{\cdot}I_{A1} + U_B1{\cdot}I_{B2} - U_{B2}{\cdot}I_{B1} + U_{C1}{\cdot}I_{C2} - U_{C2}{\cdot}I_{C1}. \qquad (11.5)$$

Весь мир измеряет трехфазную реактивную мощность тремя варметрами, значит «очевидно» в балансе должен быть скалярный член

$$Q_S = \{\, (u_{BC},i_A) + (u_{CA},i_B) + (u_{AB},i_C)\,\}/\sqrt{3}\,. \qquad (11.6)$$

Много раз отмечалось, что никакая система мнимых единиц не может быть первичной. Первичным является формула баланса типа (4.16) для однофазной цепи, под который создается эта система. Таким образом, сейчас стоит задача предложить формулу энергетического баланса для многофазной цепи, а потом под нее разработать систему комплексных чисел. Пока что имеются три формулы этого будущего баланса, но все они предложены с нехорошим словом «очевидно». Хотелось бы идти одним методом и получать формулы, а не писать заранее ответы. В данном пособии предлагается перенести метод главы 9 на многофазные цепи. Этот метод начинается с анализа взаимодействий одноименных сигналов, напряжений с напряжениями (u_S,u_k) и т.д. Это другое мировоззрение энергетического баланса, когда в нем до предела не участвуют мощности [27, 28].

Это также противоречит концепции Фризе, который начал анализ с взаимодействий разноименных сигналов напряжения с током (u_S,i_S). Видимо возможно доказательство и по пути Фризе, но у автора пособия «ничего не вышло». «Не вышло» не является доказательством невозможности, но пусть читатели попробуют пройти путем Фризе.

11.2. Элемент цепи и входные напряжения

Пусть в трехфазной цепи имеется элемент с сигналами u_k, i_k. Выполним его «трансформаторное приведение» ко входу схемой (рис. 22 а). Пусть элемент подключен к зажимам a и b на вторичной стороне действительного трансформатора. Подбором коэффициентов трансформации можно добиться минимальной невязки напряжений u_{ab} и u_k. Это получится гораздо ближе, чем в главе 9 для однофазной цепи. Там можно было менять только один коэффициент, влияющий на амплитуду напряжения сети. Здесь мы имеем два коэффициента и возможность перераспределения между фазами. Поэтому невязка u'_k в общем случае будет меньше. Но после указанной компенсации неожиданно около элемента с напряжением почти u_{ab} появляется сбоку новый вывод с напряжением u_c. Он без тока, но напряжение есть! Назовем его «трехфазный хвост». Можно было бы принять более деликатный термин «придаток» или еще что-то, но автор имеет право на термин и называет это новое простым русским словом «хвост». Двухполюсный элемент стал трехполюсным! Когда суть явления стала ясна, дальнейшие выкладки проведем для двухфазной сети питания (рис. 23 а).

На входе трансформатора напряжения сети u_x и u_y, на выходе u_d и u_q. Элемент цепи Z_k с напряжением u_k и током i_k подключен к напряжению u_d, при этом в общем случае после компенсации остается напряжение невязки u'_k на элементе невязки Z'_k. Ток элемента без потерь передается в двухфазную сеть в виде токов i_{xk} и i_{yk}, которые сливаясь с токами оставшейся цепи образуют фазные токи i_x и i_y. Невязка напряжения это разность напряжения элемента и напряжения u_d трансформатора:

$$u'_k = u_k - u_d = u_k - K_{xu}\cdot u_x - K_{yu}\cdot u_y. \qquad (11.7)$$

Невязка должна быть ортогональна всем напряжениям сети в уравнении (11.7). Это ее свойство и позволяет найти оба коэффициента трансформации в уравнении после скалярного умножения его на u_x и u_y (11.8):

$$(u'_k,u_x) = (u_x,u_k) - K_{xu}\cdot U_x^2 - K_{yu}\cdot(u_x,u_y) = 0; \qquad (11.8)$$

$$(u'_k,u_y) = (u_y,u_k) - K_{xu}\cdot(u_x,u_y) - K_{yu}\cdot U_y^2 = 0; \qquad .$$

$$K_{xu} = \frac{U_y^2(u_x,u_k)-(u_x,u_y)(u_y,u_k)}{U_x^2U_y^2-(u_x,u_y)^2} = \frac{[u_x,u_y][u_k,u_y]}{[u_x,u_y]^2} = \frac{[u_k,u_y]}{[u_x,u_y]}; \quad (а) \qquad (11.9)$$

$$K_{yu} = \frac{U_x^2(u_y,u_k)-(u_x,u_y)(u_x,u_k)}{U_x^2U_y^2-(u_x,u_y)^2} = \frac{[u_y,u_x][u_k,u_x]}{[u_x,u_y]^2} = \frac{[u_k,u_x]}{[u_y,u_x]}; \quad (б) \qquad .$$

Операция векторного деления уже рассмотрена в параграфе (9.1). Все дальнейшее имеет смысл только при не нуле векторного квадрата $[u_x,u_y]^2$, то есть, когда нет линейной зависимости между напряжениями u_x, u_y для математика или при двухфазности напряжений для электрика.

Нахождение коэффициентов трансформаторного приведение в схеме (рис. 23 а) позволяет найти по формуле (10.32) при $i_d = i_k$, $i_q = 0$ приведенные к сети токи i_{xk} и i_{yk} (11.10) на одной стороне трансформатора и по формуле (10.30) – «двухфазный хвост» u_q (11.11) на другой стороне. Две формулы являются началами двух подходов к расчету значения относительной ответственности S_{Sk}^2, которые должны закончиться одним результатом. Но главное, что эти формулы уже превратили однофазный элемент цепи в двухфазный на первичной стороне (11.10) или вторичной стороне (11.11) трансформатора напряжения (рис. 23 а).

$$i_{xk} = K_{xu}\cdot i_k\,; \qquad i_{yk} = K_{yu}\cdot i_k\,; \qquad (11.10)$$

$$u_q = -K_{yu}\cdot u_x + K_{xu}\cdot u_y\,. \qquad (11.11)$$

11.3. Элемент цепи и входные токи

Взаимное приведение токов сети i_x и i_y и тока i_k элемента Z_k производится схемой (рис. 23 б). Ток невязки приведения i'_k (11.12) протекает через элемент невязки Z'_k. Коэффициенты трансформации K_{xi}, K_{yi} (11.13) отличаются от найденных в (11.7)…(11.9), но находятся таким же методом.

$$i'_k = i_k - K_{xi} \cdot i_x - K_{yi} \cdot i_y \,; \qquad (11.12)$$

$$K_{xi} = \frac{[i_k, i_y]}{[i_x, i_y]} \,; \qquad K_{yi} = \frac{[i_k, i_x]}{[i_y, i_x]}. \qquad (11.13)$$

Решения (11.13) возможны, когда знаменатель отличен от нуля. Со стороны сети многофазность приведенного элемента проявляется двумя напряжениями u_{xk} и u_{yk} (11.14) на левых трансформаторах тока (рис. 23 б). На закороченных правых трансформаторах напряжение равно нулю. Они создают «двухфазный токовый хвост» с током i_q (11.15) на стороне нагрузки. Надо сказать, что такое трехфазное приведение довольно непривычно выглядит, но холостой ход трансформатора напряжения – это обрыв, а тока – замыкание. Главное, что другим способом (рис. 23 б) удалось преобразовать однофазный элемент в энергетически эквивалентный трехфазный.

$$u_{xk} = K_{xi} \cdot u_k \,; \qquad u_{yk} = K_{yi} \cdot u_k \,; \qquad (11.14)$$

$$i_q = -K_{yi} \cdot i_x + K_{xi} \cdot i_y \,. \qquad (11.15)$$

Теперь, когда первые два двухфазных хвоста у одного элемента (двухполюсника) рассчитаны (11.11), (11.15), требуются пояснения для их субъективного восприятия. Самое главное, надо воспринять их как объективную природную реальность, как одни из элементных сигналов, а не экзотическую выдумку автора пособия. К элементным сигналам относятся, прежде всего, его напряжение u_k и ток i_k. Далее к ним относятся невообразимое множество преобразований этих сигналов, мгновенная мощность $u_k \cdot i_k$, первая гармоника и т.д. Это принимается бесспорно. Но не может человек быть вне общества, не может элемент быть сам по себе, кроме тривиального случая $u_k = 0$, $i_k = 0$. Он должен получить от чего-то эти сигналы, значит он находится в сети или в цепи. А это «чего-то» должно само иметь источник питания с сигналами u_S, i_S, что и позволило написать уравнения (3.12), (3.13), (3.14) для цепи в курсе ТОЭ. В параграфе 3.2 и других уже сказано, что все элементные сигналы рассматривать в одном цепном базисе (3.17), а не сами по себе (3.18). Все элементные сигналы должны иметь относительный, а не абсолютный характер. Однако есть и абсолютные элементные сигналы, но тогда не надо пытаться через них написать все возможные уравнения цепных балансов. Есть приятные исключения из этого правила (баланс активных мощностей). С реактивными уже сложнее, даже в записи (3.18) в элементных сигналах неявно присутствуют сетевые: общая для всех сетевая частота! Теперь источник питания стал многофазным. Если читатель уже признал относительный характер балансируемых элементных сигналов, то он должен признать, что качественное изменение сетевых должно повлиять и на появление нового качества в балансируемых элементных сигналах. Таким новым качеством стали многофазные хвосты. Не признавший их может не пытаться создать теорию балансируемых энергетических составляющих для многофазной цепи.

11.4. Пространственная и временная ортогонализация сигналов в многофазных цепях

В однофазных цепях разделение сигналов по минимальному количеству временных ортов производилась по процедуре Грама-Шмидта в любом порядке, и это не меняло конечный результат. Но изложение получалось методологически стройным, если в первом шаге были сетевые сигналы, как в (4.50). Здесь важным являлось значение определителя Грама D_2 (4.51). Он был не нулем при различии форм сигналов напряжения и тока сети. Невязка тока, в конечном итоге, определила реактивную составляющую тока. Разный порядок ортогонализации получается и в многофазных цепях, но тут увеличивается число сигналов, участвующих в ортогонализации и появляется новое качество.

После нахождения двухфазных хвостов можно провести ортогонализацию Грама-Шмидта. При напряженческом подходе

$$
\begin{aligned}
&u_x = u_x\,; && \text{(а)}\\
&u_y = u_{y1} + u_{y2}\,; && \text{(б)}\\
&i_x = i_{x1} + i_{x2} + i_{x3}\,; && \text{(в)} \quad (11.16)\\
&i_y = i_{y1} + i_{y2} + i_y3 + i_{y4}\,; && \text{(г)}\\
&u_k = u_{k1} + u_{k2} + u_{k3} + u_{k4} + u_{k5}\,; && \text{(д)}\\
&u_q = u_{q1} + u_{q2}\,; && \text{(е)}\\
&i_k = i_{k1} + i_{k2} + i_{k3} + i_{k4} + i_{k5} + i_{k6}\,. && \text{(ж)}
\end{aligned}
$$

Здесь составляющие просто пронумерованы без акцентов, кто активный, кто и в какой степени пассивный. «Двухфазный хвост» u_q получается комбинацией напряжений u_x и u_y (11.11), поэтому имеет только две составляющие. Первый шаг ортогонализации возможен только при не нулевом определителе Грама D_{2u}

$$D_{2u} = \begin{vmatrix} (u_x,u_x) & (u_x,u_y) \\ (u_x,u_y) & u_y,u_y) \end{vmatrix} = U_x^2 \cdot U_y^2 - (u_x,u_y)^2 = [u_x,u_y]^2. \qquad (11.17)$$

Трансформаторными преобразованиями (10.30)... (10.33) можно преобразовать запись (11.16) к более симметричному виду с сохранением значения определителя

$$u_x = u_{x1} + u_{x2}\ ; \qquad (а)$$
$$u_y = u_{y1} + u_{y2}\ ; \qquad (б)$$
$$i_x = i_{x1} + i_{x2} + i_{x3} + i_{x4}\ ; \qquad (в) \qquad (11.18)$$
$$i_y = i_{y1} + i_{y2} + i_{y3} + i^{y4}\ ; \qquad (г)$$
$$u_k = u_{k1} + u_{k2} + u_{k3} + u_{k4} + u_{k5} + u_{k6}\ ; \qquad (д)$$
$$u_q = u_{q1} + u_{q2}\ ; \qquad (е)$$
$$i_k = i_{k1} + i_{k2} + i_{k3} + i_{k4} + i_{k5} + i_{k6}\ . \qquad (ж)$$

При токовом подходе получается похожая по записи форма, но с другими сигналами (при тех же обозначениях) и другим определителем

$$i_x = i_{x1} + i_{x2}\ ; \qquad (а)$$
$$i_y = i_{y1} + i_{y2}\ ; \qquad (б)$$
$$u_x = u_{x1} + u_{x2} + u_{x3} + u_{x4}\ ; \qquad (в) \qquad (11.19)$$
$$u_y = u_{y1} + u_{y2} + u_{y3} + u_{y4}\ ; \qquad (г)$$
$$u_k = u_{k1} + u_{k2} + u_{k3} + u_{k4} + u_{k5} + u_{k6}\ ; \qquad (д)$$
$$i_k = i_{k1} + i_{k2} + i_{k3} + i_{k4} + i_{k5} + i_{k6}\ ; \qquad (е)$$
$$i_q = i_{q1} + i_{q2}\ ; \qquad (ж)$$

$$D_{2i} = \begin{vmatrix} (i_x,i_x) & (i_x,i_y) \\ (i_x,i_y) & i_y,i_y) \end{vmatrix} = I_x^2 \cdot I_y^2 - (i_x,i_y)^2 = [i_x,i_y]^2. \qquad (11.20)$$

Сейчас время обратить внимание на качественную разницу первого шага ортогонализации в однофазной сети с определителем D_2 (4.7), двухфазной от напряжений с D_{2u} (11.17), двухфазной от токов с D_{2i} (11.20). В однофазной сети второй функциональный орт определялся невязкой форм напряжения и тока сети и говорил о неоптимальности энергопотребления по Физе. Определитель D был равен квадрату пассивной мощности и при совпадении форм сетевых сигналов становился нулевым. При предлагаемом подходе к многофазным сетям на первом шаге определяются невязки либо между фазными напряжениями (11.17), либо между фазными токами (11.20). Наличие невязок или не нулевые определители говорят о многофазности питания либо напряжениями, либо токами. Если определители равны нулю, то питание – однофазное, но по двум проводам, не считая земли! При этом независимо друг от друга возможны многофазность или однофазность только по напряжениям и то же, но только по токам. Всего получается четыре варианта сочетаний. Именно многофазность предоставляет в наше распоряжение два первых функциональных орта, по этим ортам будут разлагаться все сигналы цепи и определяться ответственность элементов на полную мощность всей цепи. Это даже в самом начале не шаг Фризе!

Отход от Фризе сделан и на практике, когда реактивную мощность определяют тремя варметрами по формуле (11.6). В этой формуле также присутствует субъективный момент выбора знака реактивной мощности, он выражается в выборе направления обхода напряжений: можно было бы (u_{BA},i_C) +… и т.д. К этой формуле мы еще вернемся.

11.5. Скалярная составляющая формулы участия элемента в энергетическом балансе

В однофазной сети были аксиоматически признаны формулы энергетического баланса параллельно (2.4), (9.4 а) и последовательно (9.4 б) подключенных к сети электроприемников. Тоже аксиоматически следует принять подобные формулы и для двухфазной сети

$$S_{Suk}^2 = U_S^2 \cdot \{ (i_x,i_{xk}) + (i_y,i_{yk}) \}; \qquad (а) \qquad (11.21)$$
$$S_{Sik}^2 = I_S^2 \cdot \{ (u_x,u_{xk}) + (u_y,u_{yk}) \}. \qquad (б) \qquad .$$

Здесь $U_{Suk}^2 = U_x^2 + U_y^2$, $I_S^2 = I_x^2 + I_y^2$. В однофазной цепи оба результата совпали, здесь для осторожности они пока обозначены разными буквами. Подстановка формул (11.10), (11.14) дает окончательные результаты, коэффициенты трансформации в которых рассчитываются по формулам (11.9), (11.13).

$$S_{Suk}^2 = U_S^2 \cdot \{ K_{xu} \cdot (i_x,i_k) + K_{yu} \cdot (i_y,i_k) \}; \qquad (а) \qquad (11.22)$$
$$S_{Sik}^2 = I_S^2 \cdot \{ K_{xi} \cdot (u_x,u_k) + K_{yi} \cdot (u_y,u_k) \}. \qquad (б) \qquad .$$

Для проверки была взята трехфазная цепь с пятью элементами (рис. 24), все сигналы которой разложены по четырем ортам. Сетевые сигналы описаны выражениями (11.23), а элементные – занесены в таблицу 11. Полная мощность сети $S_S^2 = U_S^2 \cdot I_S^2 = 386 \cdot 550 = 212300$. По формулам

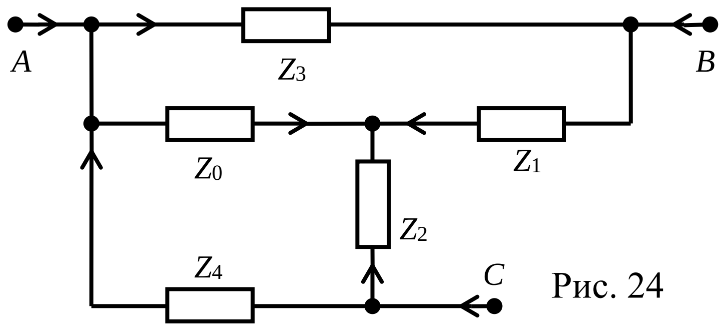


Рис. 24

(10.24), (10.26) при K=1 и φ=0 сетевые сигналы приведены к двухфазным (11.24). Далее по формулам (11.9), (11.13), (11.22) заполняется таблица 11. Результаты расчетов величин K_x, K_y не важны для анализа, но их можно найти в параграфе 15.3 в таблице 14. В двух правых колонках находятся еще не поясненные величины и на них пока не надо смотреть.

$$U_A^2 = 145;\quad U_B^2 = 105;\quad U_C^2 = 136;\quad U_S^2 = 386;$$

$$I_A^2 = 290;\quad I_B^2 = 186;\quad I_C^2 = 74;\quad I_S^2 = 550;$$

$$U_A = 10\ –5\ \ 4\ \ 2;\qquad I_A = 6\ \ 2\ \ 15\ –5;$$

$$U_B = –8\ –3\ \ 4\ –4;\qquad I_B = –5\ –8\ \ –9\ \ 4; \tag{11.23}$$

$$U_C = –2\ \ 8\ –8\ \ 2;\qquad I_C = –1\ \ 6\ \ –6\ \ 1;$$

$$U_x = 12.25\ –6.12\ \ 4.9\ \ 2.45;\qquad I_x = 7.35\ \ 2.45\ \ 18.37\ \ –6.12; \tag{11.24}$$

$$U_y = 4.24\ \ 7.78\ \ –8.49\ \ 4.24;\qquad I_y = 2.83\ \ 9.9\ \ 2.12\ \ –2.12.$$

Таблица 11

	U_k	I_k	S_{Suk}^2	S_{Sik}^2	S_{Suik}^2	S_{Sk}^2
Z_0	11 -7 5 1	3 -2 4 3	26242	32335	28422	28652
Z_1	-7 -5 5 -5	-4 -5 -2 1	31368	39504	34278	35959
Z_2	-1 6 -7 1	1 7 -2 -4	15730	52572	28907	28744
Z_3	18 -2 0 6	1 3 7 -3	91096	53811	77760	75662
Z_4	-12 13 -12 0	-2 -1 -4 5	47864	34078	42933	43283
	Сумма		212300	212300	212300	212300

Из таблицы следует, что обе формулы (11.22) сходятся к одному правильному балансу, но значения S_{Suk}^2 и S_{Sik}^2 отдельных элементов расходятся. Более того! Формулы дают разные результаты даже для 2-х ортных цепей (расчеты не приводятся).

Расчеты выполнены на ЭВМ, проверить их на калькуляторе сложно. Все это относиться и к дальнейшему, поэтому надо или доверять написанному, или взять у автора программу расчетов, или составить самому программу.

Последнее не сложно, так как все формулы просты для программирования, но громоздки. Исходные данные (11.23) и таблица 11 являются примером компактной энергетически эквивалентной записи электрических сигналов любой цепи.

Полезное отступление. Исторически формула (11.22 а) для S_{Suk}^2 была получена автором раньше, чем (11.22 б), потому что схема приведения трансформаторами напряжения (рис. 23 а) выглядит естественно для обыденного сознания. Формула выведена вполне логично, баланс по всей цепи обеспечивается. Напряжение невязки u' (рис. 23 а) скомпенсировано по двум координатам, для двухортных цепей – полностью! Для второй координаты в однофазной цепи (рис. 21 а) потребовалось введение сомнительного комплексного трансформатора даже для двухортных цепей. Это также согласуется с обыденным сознанием электрика: трехфазная сеть во всех отношениях лучше однофазной. Формула была переписана в трехфазном исполнении и оставалось дополнить ее только членом активного баланса напряжения невязки, даже был придуман термин: «Активное расширение формулы (11.22 а)». Планировалось завершение теории, но... Формула активного расширения получилась громоздкой, а красота – один из критериев истины в сложных случаях. Но, главное, напряжение и ток входили в формулу несимметрично, как и в (11.22 а). В голове начали рождаться шальные мысли о несимметрии не только в микромире, но и в электротехнике – напряжение и ток есть несимметричные сигналы! И только убежденность в симметрии мира электротехники навела на возможность токовых вариантов приведения (рис. 21 б, 23 б). Однофазный токовый вариант давал тот же результат, а трехфазный дал второе «частное» решение проблемы S_{Sik}^2 (табл. 11).

11.6. Общее решение на основе двух частных

Нахождение общего решения в виде линейной комбинации частных решений – обыденный прием в математике и ТОЭ

$$S_{Suik}^2 = D_u \cdot S_{Suk}^2 + D_i \cdot S_{Sik}^2; \qquad (а) \qquad (11.25)$$
$$D_u + D_i = 1. \qquad (б)$$

Осталось выбрать критерии и найти неопределенные коэффициенты D_u, D_i долевого участия в формуле. Четких критериев автор не смог предложить.

Единственным критерием выбрана простота. Формулы (11.26) написаны интуитивно. Запись U_S^4 означает $(U_S^2)^2$, I_S^4 – $(I_S^2)^2$.

$$D_u = \frac{\dfrac{[u_x,u_y]^2}{U_S^4}}{\dfrac{[u_x,u_y]^2}{U_S^4}+\dfrac{[i_x,i_y]^2}{I_S^4}}; \qquad D_i = \frac{\dfrac{[i_x,i_y]^2}{I_S^4}}{\dfrac{[u_x,u_y]^2}{U_S^4}+\dfrac{[i_x,i_y]^2}{I_S^4}}. \qquad (11.26)$$

Видно, что баланс (11.25 б) выполняется, все слагаемые в знаменателе формулы (11.26) – безразмерные, в формуле (11.25 а) сигналы напряжения и тока стали симметричны между собой. Применение формул (11.25), (11.26) позволяет красиво обходить ситуации «неполной многофазности цепи», когда, например, только $[u_x,u_y]^2 = 0$ и цепь по напряжениям ведет себя как однофазная, а по токам – как многофазная. В этом случае возникают проблемы с определением K_{xu}, K_{yu} (11.9) из-за нуля в знаменателе, но D_u по формуле (11.26) получается нулем того же порядка, а D_i =1 и в формуле (11.25 а) остается только член S_{Sik}^2. Формула (11.26) не будет иметь решения только для дважды однофазных по многофазному питанию цепей, когда $[u_x,u_y] = 0$ и $[i_x,i_y] = 0$. Для рассматриваемого примера (11.24) D_u = 0.642, D_i = 0.358, результаты расчета S_{Suik}^2 по формуле (11.25) помещены в таблицу 11.

Для практических расчетов удобны варианты формул (11.26)

$$D_{ui} = [u_x,u_y]\cdot I_S^4 + [i_x,i_y]\cdot U_S^4 = \qquad (а) \quad (11.27)$$
$$= \{\, U_x^2\cdot U_y^2 - (u_x,u_y)^2 \,\}\cdot I_S^4 + \{\, I_x^2\cdot I_y^2 - (i_x,i_y)^2 \,\}\cdot U_S^4\ ; \qquad .$$

$$D_u = [u_x,u_y]^2\cdot I_S^4/D_{ui}\ ; \quad D_i = [i_x,i_y]^2\cdot U_S^4/D_{ui}. \qquad (б) \qquad .$$

Отступление. Автор надеется, что предложенный им метод будет поддержан другими исследователями и ими будут получены другие формулы многофазных балансов. Прежде всего надо начать с выбора формулы полной мощности трехпроводной сети. Что может стать критерием правильности этой формулы? Хотелось бы, чтобы формулы напряженческого и токового подходов дали одинаковые результаты! Гармоничная формула должна быть во всем гармонична! Тогда не нужны будут долевые коэффициенты (11.26).

11.7. Трехфазные варианты решения

Для преобразования полученных двухфазных формул в трехфазные надо воспользоваться формулами обратного перехода (10.25), (10.27), формулами трехпроводных связей (8.1)... (8.8) и проявить искусство алгебраиста. Прежде всего следует обратить внимание на векторное произведение $[u_A,u_B]$ и его квадрат, так как оно эквивалентно важному произведению $[u_x,u_y]$ ($[u_x,u_y] = -\sqrt{3}\cdot[u_A,u_B]$) и т.д. Вот некоторые результаты.

Формулы (11.22) красивее получаются в записи через линейные сигналы

$$S_{Suk}{}^2 = -\frac{U_S^2}{3[u_A,u_B]}\begin{pmatrix} +[u_{BC},u_k][i_A,i_k]+ \\ +[u_{CA},u_k][i_B,i_k]+ \\ +[u_{AB},u_k][i_C,i_k]. \end{pmatrix}; \qquad \text{(а) (11.28)}$$

$$S_{Sik}{}^2 = -\frac{I_S^2}{3[i_A,i_B]}\begin{pmatrix} +[i_{BC},i_k][u_A,u_k]+ \\ +[i_{CA},i_k][u_B,u_k]+ \\ +[i_{AB},i_k][u_C,u_k]. \end{pmatrix}. \qquad \text{(б)} \quad .$$

Здесь через []/[] даны коэффициенты в эстетичном виде. После подстановки в формулу (11.25 а), раскрытия коэффициентов и алгебраического преобразование получается самая красивая формула скалярной части трехфазного баланса [28]

$$S_{Suik}{}^2 = \frac{1}{\dfrac{[i_A,i_B]^2}{I_S^4}+\dfrac{[u_A,u_B]^2}{U_S^4}}\cdot\begin{pmatrix} +(u_A,u_k)(i_A,i_k)\left(1-\dfrac{U_A^2}{U_S^2}-\dfrac{I_A^2}{I_S^2}\right)+ \\ +(u_B,u_k)(i_B,i_k)\left(1-\dfrac{U_B^2}{U_S^2}-\dfrac{I_B^2}{I_S^2}\right)+ \\ +(u_C,u_k)(i_C,i_k)\left(1-\dfrac{U_C^2}{U_S^2}-\dfrac{I_C^2}{I_S^2}\right) \end{pmatrix}. \qquad (11.29)$$

В двухортных цепях, какими являются линейные несимметричные цепи при несимметричном, но синусоидальном питании, невязка трансформаторного преобразования (11.7), (11.12) отсутствует и формула (11.29) является ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ФОРМУЛОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО

БАЛАНСА к формуле полной мощности (8.20) для важного практического случая. Замечательно, что в этой формуле вообще нет ни одного сигнала мощности, есть только взаимодействия одноименных сигналов! ЭТО КОНЕЧНАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ РЕАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ!!!

11.8. Частные случаи

Однофазная нагрузка

Требуется определить участие фазы A с сигналами $u_k = u_A$, $i_k = i_A$ в полной мощности. Ток и напряжение такого элемента цепи уже приведены ко входам питания, поэтому невязки приведения отсутствуют и все нижние формулы являются точными формулами баланса для любой цепи. После подстановки значений сигналов в формулы (11.28) и преобразований получаются две формулы

$$S_{SuA}^2 = (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)\cdot I_A^2\,; \qquad \text{(а)} \qquad (11.30)$$
$$S_{SiA}^2 = U_A^2\cdot(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2). \qquad \text{(б)} \qquad .$$

Формула для (а) выглядит настолько естественно, что у автора пособия не было даже тени сомнения в ее общей справедливости. По этой формуле долгие годы проверялись все варианты его теорий, они давали сходимость к этой формуле, но формулы были несимметричными относительно напряжений и токов. И баланс по фазам с очевидностью сходится

$$S_{SuA}^2 + S_{SuB}^2 + S_{SuC}^2 = U_S^2\cdot(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) = U_S^2\cdot I_S^2 = S_S^2\,. \qquad (11.31)$$

Теперь получена еще одна точная формула (11.30 б), она она выглядит неестественно, но тоже дает очевидный баланс (11.31) и другое значение ответственности фазы A. Например, для сигналов (11.23) $S_{SuA}^2 = 386\cdot 290 = 111940$, $S_{SiA}^2 = 145\cdot 550 = 79750$. Точной формулой является (11.25 а), которая для рассматриваемого случая приобретет вид

$$S_{Sui}^2 = D_u\cdot U_S^2\cdot I_A^2 + D_i\cdot U_A^2\cdot I_S^2\,. \qquad (11.32)$$

Для рассматриваемого примера D_u =0.642, D_i =0.358 и S_{SuiA}^2 = 102569. Сравнение «очевидной» и простой формулы (11.30 а) с очень сложной (11.32) показывает, как бывает опасно начать строить свою теорию с «очевидного» положения.

Симметричные варианты

Симметрия в рамках создаваемой энергетической теории для цепей с сигналами произвольной формы понимается иначе, чем это понимается обыденным сознанием и преподносится в курсе ТОЭ. Под симметрией обычно понимают тождественность форм T-периодических фазных сигналов при сдвигах их на $T/3$ и $T/4$ соответственно для 3-х и 2-х фазных сетей. Из тождественности форм следует и равенство интегральных показателей U^2, I^2, P. В рамках создаваемой теории требуется только равенство интегральных показателей, без оговорок на формы. Таким образом, требования новой теории к симметрии – менее сильное. Понятие сдвига отсутствует во всей предлагаемой теории.

При симметрии напряжений равны их действующие значения $U_A = U_B = U_C = U$. Тогда важное значение $[u_A,u_B]^2$

$$[u_A,u_B]^2 = (1/4)\cdot(3\cdot U)\cdot(U)\cdot(U)\cdot(U) = (3/4)\cdot U^4\ . \qquad (11.33)$$

При симметрии $U_S^2 = 3\cdot U^2$, $U_S^4 = 9\cdot U^4$, $[u_A,u_B]^2/U_S^4 = 1/12$, $U_A^2/U_S^2 = 1/3$ и т.д. Можно рассмотреть случай полной симметрии сетевых токов и напряжений, тогда формула (11.29) запишется

$$S_{Suik}^2 = 2\cdot\{\, (u_A,u_k)(i_A,i_k) + (u_B,u_k)(i_B,i_k) + (u_C,u_k)(i_C,i_k)\,\}. \qquad (11.34)$$

В завершении главы надо еще раз указать, что все предложенные в формулы обеспечивают полный баланс ответственностей (табл. 11) элементов к полной мощности (8.20). Дальше будут рассматриваться векторные члены этих формул, но они будут иметь нулевые балансы по цепи и только справедливо перераспределять ответственность.

12. ВЕКТОРНАЯ ЧАСТЬ МНОГОФАЗНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА

12.1. Балансирование невязок векторными произведениями

Балансировать оставшиеся сигналы невязок (рис. 23) предлагается их векторными произведениями (12.1), как это было сделано в главе 9 в формулах (9.12), но с коэффициентами долевого участия (11.26):

$$S_{Sk}^2 = S_{Suik}^2 + D_u\cdot\{\ [u_x,u'_k][i_x,i_k] + [u_y,u'_k][i_y,i_k]\ \} + \quad .$$
$$+ D_i\cdot\{\ [u_x,u_k][i_x,i'_k] + [u_y,u_k][i_y,i'_k]\ \}. \qquad (12.1)$$

Как показано далее, полученные результаты не входят в противоречие с известными законами сохранения и просто здравым смыслом. Но у автора нет абсолютной уверенности в единственной правильности выбранного пути, ему не с чем сравнивать. По крайней мере, предложенная четкость действий соблюдается. Решение (12.1) – один из критических моментов многофазного раздела предлагаемой теории [28]. Только векторные произведения создают член активного баланса $P_S\cdot P_k$, без которого вряд ли будет принята любая теория. Дальнейшее – просто алгебраические преобразования.

После подстановки в формулу (12.1) значений невязок (11.7), (11.12) и преобразований с учетом таких соотношений, как $[u_x,u_x] = 0$, $[u_x,u_y] = –[u_y,u_x]$, $D_u + D_i = 1$, получается окончательная интегральная формула энергетического баланса в двухфазной цепи (12.2). Результаты расчета S_{Sk}^2 в цепи (рис. 24) также помещены в таблицу 11.

$$S_{Sk}^2 = S_{Suik}^2 + \qquad \text{(а)} \quad (12.2)$$
$$+ D_u\cdot\{\ K_{xu}\cdot[u_x,u_y][i_y,i_k] + K_{yu}\cdot[u_y,u_x][i_x,i_k]\ \} + \qquad \text{(б)} \quad .$$
$$+ D_i\cdot\ \{\ K_{xi}\cdot[i_x,i_y][u_y,u_k] + K_{yi}\cdot[i_y,i_x][u_x,u_k]\ \} + \qquad \text{(в)} \quad .$$
$$+ \qquad [u_x,u_k][i_x,i_k] + [u_y,u_k][i_y,i_k]. \qquad \text{(г)} \quad .$$

В этой формуле коэффициенты K_x, K_y представляют собой скаляры. Они рассчитываются отдельно по формулам (11.9), (11.13), но не могут быть упрощены алгебраическими сокращениями, как это не правильно сделано в (12.3 а). Автор еще не выработал правила действий с введенными им векторными парами, но неверность (12.3 а) была подтверждена расчетами на ЭВМ. Видимо в формуле строже будет запись Ex{[]·[]} (12.3 б) в ранее упомянутом понимании экстракции как одного скаляра, чем []·[], которое, строго говоря, является комплексом. В дальнейшем приставка «Ex» перед векторной парой []·[] опускается, а сама пара представляет собой число (5.8).

$$K_x\cdot[u_x,u_y][i_y,i_k] = \frac{[u_k,u_y]}{[u_x,u_y]}\cdot[\mathrm{u}_x,u_y][i_y,i_k] = [u_k,u_y][i_y,i_k]\ ; \qquad (а)\quad (12.3)$$

– сокращаем.

$$K_x\cdot[u_x,u_y][i_y,i_k] = \mathrm{Ex}\frac{[u_k,u_y]}{[u_x,u_y]}\cdot\mathrm{Ex}\{[u_x,u_y][i_y,i_k]\}. \qquad (б)$$

Несомненный интерес представляет последний член (12.2 г), так как именно он после раскрытия дает член балансирования активной мощности

$$[u_x,u_k][i_x,i_k] + [u_y,u_k][i_y,i_k] = \qquad (12.4)$$
$$= \{\ (u_x,i_x) + (u_y,i_y)\ \}\cdot(u_k,i_k) - (u_x,i_k)(u_k,i_x) - (u_y,i_k)(u_k,i_y) =$$
$$= PS\cdot P_k - (u_x,i_k)(u_k,i_x) - (u_y,i_k)(u_k,i_y).$$

Появление последнего члена балансирования активной мощности позволяет автору поставить точку и заявить, что им ПОЛУЧЕНА ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОРМУЛА (11.9), (11.13), (11.25), (11.26), (11.29), (12.1), (12.2) ответственности k-го элемента произвольной цепи за полную мощность трехпроводной трехфазной (8.20) или двухфазной (10.29) сети питания при произвольных, но периодических, формах всех сигналов. Автор заявляет, что формула отвечает трем сформулированным им же принципам ответственности, реализуемости и справедливости. К сожалению, автору пособия НЕ УДАЛОСЬ ПРЕОБРАЗОВАТЬ ДВУХФАЗНЫЙ ВАРИАНТ ФОРМУЛЫ (12.2) К КРАСИВОМУ ТРЕХФАЗНОМУ, подобному (11.29). Однако, науке известны подобные примеры. Так нет красивой трехфазной формулы, эквивалентной весьма эстетичной формуле Парка-Горева (10.16) (простим им ошибку в коэффициенте и оценим красоту).

В формуле (12.2) можно раскрыть все векторные пары, тогда она приобретает вид

$$S_{Sk}^2 = K_1\cdot(u_x,u_k)(i_x,i_k) + \ldots + K_{14}\cdot(u_y,i_k)(i_y,u_k) + P_S\cdot P_k\ ; \quad (а)$$

$$D_{ui}\cdot S_{Sk}^2 == U_S^2\cdot I_S^2\cdot\{\quad (u_x,u_k)(i_x,i_k)\cdot\{\ U_S^2\cdot I_y^2 \quad + \quad U_y^2\cdot I_S^2\ \} \quad + \qquad (12.5)$$
$$+ (u_y,u_k)(i_y,i_k)\cdot\{\ U_S^2\cdot I_x^2 \quad + \quad U_x^2\cdot I_S^2\ \} \quad -$$
$$-\ \{\ (u_x,u_k)(i_y,i_k) + (u_y,u_k)(i_x,i_k)\}\cdot\{U_S^2\cdot(i_x,i_y) + \quad (u_x,u_y)\cdot I_S^2\}\} + \quad (б)$$

$$
\begin{aligned}
&+ U_S^4\cdot\{\ -(i_x,i_k)(i_x,u_k)\cdot\{I_y^2\cdot(u_y,i_y) + (i_x,i_y)(u_x,i_y)\} + \\
&\qquad + (i_y,i_k)(i_x,u_k)\cdot\{I_x^2\cdot(u_x,i_y) + (i_x,i_y)(u_y,i_y)\} + \\
&\qquad - (i_y,i_k)(i_y,u_k)\cdot\{I_x^2\cdot(u_x,i_x) + (i_x,i_y)(u_y,i_x)\} + \\
&\qquad + (i_x,i_k)(i_y,u_k)\cdot\{I_y^2\cdot(u_y,i_x) + (i_x,i_y)(u_x,i_x)\}\} + \\
&+ I_S^4\cdot\{-(u_x,u_k)(u_x,i_k)\cdot\{U_y^2\cdot(u_y,i_y) + (u_x,u_y)(u_y,i_x)\} + \\
&\qquad + (u_y,u_k)(u_x,i_k)\cdot\{U_x^2\cdot(u_y,i_x) + (u_x,u_y)(u_y,i_y)\} + \\
&\qquad - (u_y,u_k)(u_y,i_k)\cdot\{U_x^2\cdot(u_x,i_x) + (u_x,u_y)(u_x,i_y)\} + \\
&\qquad + (u_x,u_k)(u_y,i_k)\cdot\{U_y^2\cdot(u_x,i_y) + (u_x,u_y)(u_x,i_x)\}\} + \\
&+ D_{ui}\cdot\{\ -(u_x,i_k)(i_x,u_k) - (u_y,i_k)(i_y,u_k) + P_S\cdot P_k\ \}.
\end{aligned}
\qquad (12.5)
$$

Коэффициенты K_1 ... K_{14} определяются только сетевыми сигналами. Всего возможно 16 сочетаний четырех сигналов в (12.5), но отсутствуют два сочетания $(u_x,i_k)(i_y,u_k)$, $(u_y,i_k)(i_x,u_k)$.

Формула (12.5 б) САМАЯ УДОБНАЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ, в ней все ясно, что на что умножать и с чем складывать. К ней еще относятся формула (11.27 а) для коэффициента D_{ui} и формулы (10.24), (10.26) перевода трехфазных сигналов в двухфазные.

Но такая форма записи вызывает внутренний протест у человека, смотрящего на нее. У него возникает вопрос: «А нельзя ли было попроще?» Следующие формулы будут смотреться проще, так как векторные пары []·[], безобидные на вид коэффициенты K_{xu}, D_u и хвосты u_q делают запись компактнее, например, (12.2), (12.9), но с той же «расчетной мощью», что и формула (12.5 б).

12.2. Формулы с двухфазными хвостами и взаимодействиями одноименных сигналов

Людям нравятся также формулы через элементные сигналы (11.18), (11.19). В элементных сигналах новыми являются двухфазные хвосты u_q, i_q, которые рассчитываются опять через эти коэффициенты приведения (11.11), (11.15). Кроме того, по «хвостатым» формулам будет строиться новая система комплексных чисел.

Коэффициенты трансформации определяют хвосты напряжения u_q (10.30) и тока i_q (10.34) и входят в формулы интегрального баланса. Теперь надо исключить эти коэффициенты из формул баланса, заменив их хвостами. Выполним это подробно для члена $K_{xu}\cdot U_S^2$ в формуле (11.22 а)

$$K_{xu}\cdot(U_x^2 + U_y^2) = (K_{xu}\cdot u_x,u_x) + (K_{xu}\cdot u_x,u_x) = \qquad \text{(а)} \quad (12.6)$$
$$= (K_{xu}\cdot u_x + K_{yu}\cdot u_y,u_x) + (-K_{yu}\cdot u_x + K_{xu}\cdot u_y,u_y) - \qquad \text{(б)}$$
$$- (K_{yu}\cdot u_y,u_x) + (K_{yu}\cdot u_x,u_y) = \qquad \text{(в)}$$
$$= (u_d,u_x) + (u_q,u_y) = (u_x,u_k) + (u_y,u_q). \qquad \text{(г)}$$

Требуется пояснить, что в преобразование (г) использовано тождество $(u_d,u_x) = (u_k,u_x)$, которое следует из формул (11.7), (11.8). Три остальных тождества без выводов:

$$K_{yu}\cdot U_S^2 = (u_y,u_k) - (u_x,u_q); \qquad \text{(а)} \quad (12.7)$$
$$K_{xi}\cdot I_S^2 = (i_x,i_k) + (i_y,i_q); \qquad \text{(б)}$$
$$K_{yi}\cdot I_S^2 = (i_y,i_k) - (i_x,i_q). \qquad \text{(в)}$$

Преобразования (12.8) получаются еще проще, если помнить, что $[u_x,u_x] = 0$.

$$K_{xu}\cdot[u_x,u_y] = [u_x,-K_{yu}\cdot u_x + K_{xu}\cdot u_y] = +[u_x,u_q];$$

$$K_{xu}\cdot[u_x,u_y] = [u_x,u_q]; \quad K_{yu}\cdot[u_y,u_x] = -[u_y,u_q]; \qquad \text{(а)} \quad (12.8)$$
$$K_{xi}\cdot[i_x,i_y] = [i_x,i_q]; \quad K_{yi}\cdot[i_y,i_x] = -[i_y,i_q]. \qquad \text{(б)}$$

После подстановки всего полученного в окончательную формулу интегрального баланса ответственностей (12.2) с учетом (11.25 б) получаем еще один окончательный вариант ее записи в «хвостатой» форме

$$S_{Sk}^2 = (u_x,u_k)(i_x,i_k) + [u_x,u_k][i_x,i_k] +$$
$$+ (u_y,u_k)(i_y,i_k) + [u_y,u_k][i_y,i_k] + \qquad \text{(а)} \quad (12.9)$$

$$D_u\cdot\{+ (u_y,u_q)(i_x,i_k) - [u_y,u_q][i_x,i_k] -$$
$$- (u_x,u_q)(i_y,i_k) + [u_x,u_q][i_y,i_k]\} +$$
$$D_i\cdot\{+ (u_x,u_k)(i_y,i_q) - [u_x,u_k][i_y,i_q] -$$
$$- (u_y,u_k)(i_x,i_q) + [u_y,u_k][i_x,i_q]\}. \qquad \text{(б)}$$
$$\text{(А)} \qquad\qquad \text{(Б)}$$

По мнению автора это – самая красивая форма записи окончательной формулы энергетического баланса в двухфазной цепи. Ее часть (А – левый столбец) тождественна (11.25 а), (11.29) и отвечает за сходимость баланса к (8.20) по всей цепи. Часть (Б – правый столбец) отвечает за баланс невязок (рис. 23) и справедливо перераспределяет баланс при нулевом собственном балансе. Часть (а – верхние строки) совпадают по форме записи с (4.25 б) для однофазной цепи. В части (б – нижние строки) не привычно расставлены знаки, но почему с непривычными хвостатыми сигналами должны быть привычные действия?

12.3. Формулы с трехфазными хвостами и взаимодействиями одноименных сигналов

Многофазное представление элемента цепи при двухфазном питании сводится к нахождению его q-хвостов напряжения и тока. Уже упоминалось, что при трехфазном питании элемент подключается к вторичному напряжению u_{ab} трансформатора (рис. 22 а), а трехфазным хвостом станет напряжение u_c (или соответствующий ток при не показанных трансформаторах тока). Возникают терминологические проблемы: q-хвост звучит благозвучно, а оси d и q общеприняты в двухфазной обобщенной машине переменного тока; c-хвост звучит плохо, есть проблемы с неотличимостью написаний большой C и маленькой c. Красиво звучит z-хвост, да и x, y, z – общепринятое обозначение вторичных трехфазных напряжений. Но в электрических машинах и в пособии оси x и y заняты для обозначений в двухфазной сети. Поскольку буква z при этом остается не занятой, то принимается решение обозначить трехфазные сигналы хвостов u_z и i_z. При этом элемент подключен между двух из трех фаз x и y, напряжение на нем $u_{xy} = u_k$, но мы используем только обозначение u_k и нет путаницы в обозначениях x, y. Из слов «элемент с напряжением u_k и хвостом u_q» следует, что речь идет о двухфазном подходе. Из слов «элемент с напряжением u_k и хвостом u_z» следует, что речь идет о трехфазном подходе.

Если проанализировать вышеописанный вариант подключения элемента, пройдя логический путь вывода формул (11.7) ... (11.15), то получатся выражения

$$u_z = \frac{1}{3[u_A, u_B]}\{\,[u_A,u_k]\cdot u_A + [u_B,u_k]\cdot u_B + [u_C,u_k]\cdot u_C\,\}; \quad (а) \qquad (12.10)$$

$$i_z = \frac{1}{3[i_A, i_B]}\{\,[i_A,i_k]\cdot i_A + [i_B,i_k]\cdot i_B + [i_C,i_k]\cdot i_C\,\}; \quad (б) \qquad .$$

$$u_z = K_{au}\cdot u_A + K_{bu}\cdot u_B + K_{cu}\cdot u_C\,; \qquad i_z = K_{ai}\cdot i_A + K_{b}i\cdot i_B + K_{ci}\cdot i_C\,; \quad (а) \qquad (12.11)$$

$$K_{au} = [u_A,u_k]/\{3\cdot[u_A,u_B]\}; \qquad K_{ai} = [i_A,i_k]/\{3\cdot[i_A,i_B]\}. \quad (б) \qquad .$$

Продолжая дальше, можно получить все формулы, но можно воспользоваться готовыми результатами. В формулу (12.9) надо подставить обратные выражения для u_x, u_y, u_q, i_q. Например, в формулы (10.24), (10.26) можно подставить угол φ = 90

$$u_x = u_{BC} / \sqrt{2}\,; \quad u_y = \sqrt{1.5} \cdot u_A\,; \quad i_x = i_{BC} / \sqrt{2}\,; \quad i_y = \sqrt{1.5} \cdot i_A\,; \quad \text{(а)} \quad (12.12)$$

$$u_q = \sqrt{3} \cdot u_z\,; \qquad i_q = \sqrt{3} \cdot i_z\,. \qquad \text{(б)}$$

После этого надо воспользоваться формулами связей трехпроводной сети (8.1) ... (8.8) и преобразовать формулу к наиболее красивому виду. Вот один из результатов алгебраических преобразований

$$\begin{aligned} S_{Sk}^2 = {} & (u_A,u_k)(i_A,i_k) + [u_A,u_k][i_A,i_k] + \\ & + (u_B,u_k)(i_B,i_k) + [u_B,u_k][i_B,i_k] + \qquad \text{(а)} \quad (12.13) \\ & + (u_C,u_k)(i_C,i_k) + [u_C,u_k][i_C,i_k] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_u \cdot \{ & - (u_{BC},u_z)(i_A,i_k) + [u_{BC},u_z][i_A,i_k] - \\ & - (u_{CA},u_z)(i_B,i_k) + [u_{CA},u_z][i_B,i_k] - \\ & - (u_{AB},u_z)(i_C,i_k) + [u_{AB},u_z][i_C,i_k] \} + \\ D_i \cdot \{ & + (u_{BC},u_k)(i_A,i_z) - [u_{BC},u_k][i_A,i_z] - \\ & + (u_{CA},u_k)(i_B,i_z) - [u_{CA},u_k][i_B,i_z] - \\ & + (u_{AB},u_k)(i_C,i_z) - [u_{AB},u_k][i_C,i_z] \}. \qquad \text{(б)} \\ & \qquad \text{(А)} \qquad\qquad\qquad \text{(Б)} \end{aligned}$$

Надо помнить, что красивые формулы (12.9), (12.13) применяются только вместе со сложными формулами для хвостов и коэффициентов долевого участия, что снижает их эстетичность. Однако, нравятся же людям формулы через коэффициенты ряда Фурье, и они не думают о громоздкости формул получения этих коэффициентов. Дело в том, что коэффициенты ряда Фурье воспринимаются людьми как элементные сигналы, нечто присутствующее рядом с элементом, как в школьных задачках: «Дано...» Откуда взялось это «Дано» человека уже не интересует. Если выработать в себе такое же отношение к хвостам, то формулы (12.9), (12.13) станут красивыми.

13. АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

13.1. Применение индукционных счетчиков

Раскрытие любых полученных формул приведет к появлению множества скалярных произведений (u_x,u_x), (u_x,u_y)… (u_k,i_k) (12.5). Эти произведения проще всего измеряются индукционными счетчиками как описано в параграфе 6.5. Только счетчиков потребуется гораздо больше. Лучше всего пользоваться двухфазными сетевыми сигналами, которые проще получить из трехфазных по формулам (12.12). Далее полученные показания за любой интервал времени подставляются в приведенные формулы. Можно описанными методами получить трехфазные формулы, но это только еще увеличит требуемое число счетчиков.

То есть предлагаемая теория отвечает «принципу реализуемости». Сложно? Но это объективная сложность! Надо еще раз напомнить, что красивая короткая формула реактивной мощности через преобразования Гильберта – не реализуема, а в представлении Фурье – бесконечное число членов.

13.2. Применение интегральных модулей

Поскольку предложение реализуемо, но достаточно сложно, то возможны много вариантов реализации на интегральных операционных усилителях и множителях. Вопрос стоит о наиболее простой реализации. Сетевые сигналы предварительно обрабатываются схемой типа (рис. 25), которая позволят получить все варианты скалярных взаимодействий, их сумм или разностей. Мгновенные произведения усредняются апериодическими звеньями с постоянной времени *T*. Схема позволяет получить любой набор взаимодействий, конкретная выборка из них определяется последующими решениями. Ниже приводится один из возможных вариантов технического решения.

Формулу (12.1) удобнее переписать в виде

$$
\begin{aligned}
S_{Sk}^2 = D_u\cdot\{\, U_S^2\cdot\{K_{xu}\cdot(i_x,i_k) + K_{yu}\cdot(i_y,i_k)\,\} + {}& && \text{(а)}\\
+ [u_x,u'_k][i_x,i_k] + [u_y,u'_k][i_y,i_k]\}+ {}& &&\\
+ D_i\cdot\{I_S^2\cdot\{\, K_{xi}\cdot(u_x,u_k) + K_{yi}\cdot(u_y,u_k)\,\} + {}& && \text{(б)} \qquad (13.1)\\
+ [u_x,u_k][i_x,i'_k] + [u_y,u_k][i_y,i'_k]\} = {}& &&\\
= D_u\cdot S_{Suqk}^2 + D_i\cdot S_{Siqk}^2\,. & && \text{(в)}
\end{aligned}
$$

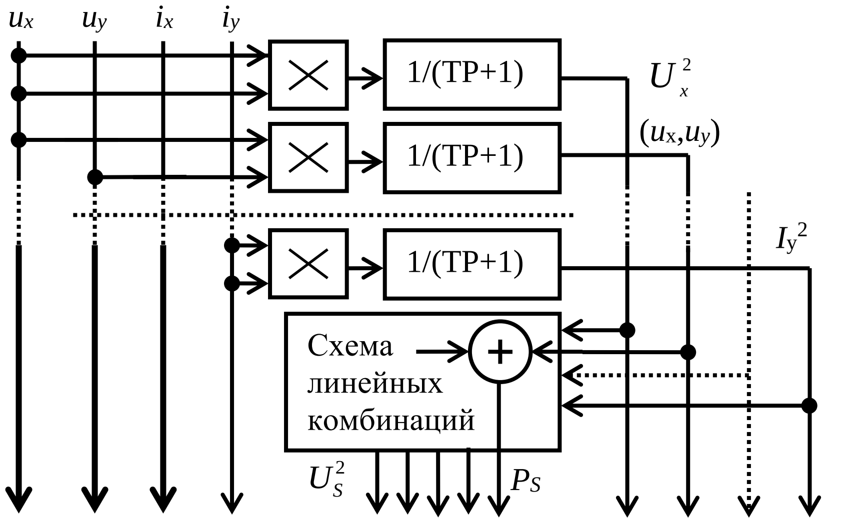


Рис. 25

Здесь приходиться вводить длинные индексы $\boldsymbol{S_{Suqk}}^{\mathbf{2}}$ – **участие *k*-го элемента в квадрате полной мощности сети при напряженческом подходе с учетом хвоста**. Более короткое обозначение S_{Suk}^2 – уже занято для бесхвостого учета. Каждый баланс S_{Suqk}^2 и S_{Siqk}^2 по всем элементам цепи сходится к S_S^2, но их значения различаются для каждого элемента в отдельности.

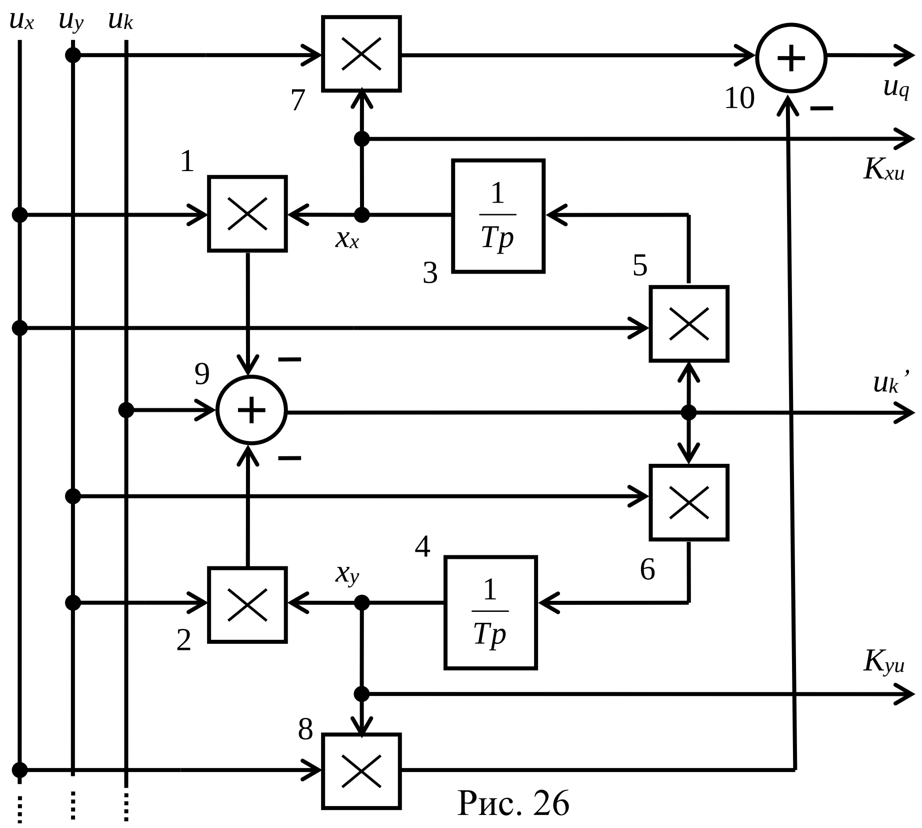


Рис. 26

Проще рассмотреть только одну ветвь, например, напряженческую (13.1 а). Для реализации этой формулы весьма полезна схема (рис. 26) По своей внутренней сути эта схема является двухфазным продолжением уже известной схемы (рис. 11 б) для однофазной сети, «медленно изменяющийся сигнал *x*», которой теперь будет двумя медленно изменяющимися коэффициентами K_{xu}, K_{yu} (рис. 26). Схема (рис. 11 б) выделяет невязку тока $i_п$, схема (рис. 26) выделяет невязку u'_k (11.7). Сигналы K_{xu} и K_{yu} в соответствии с уравнением (11.11) формируют сигнал двухфазного хвоста u_q.

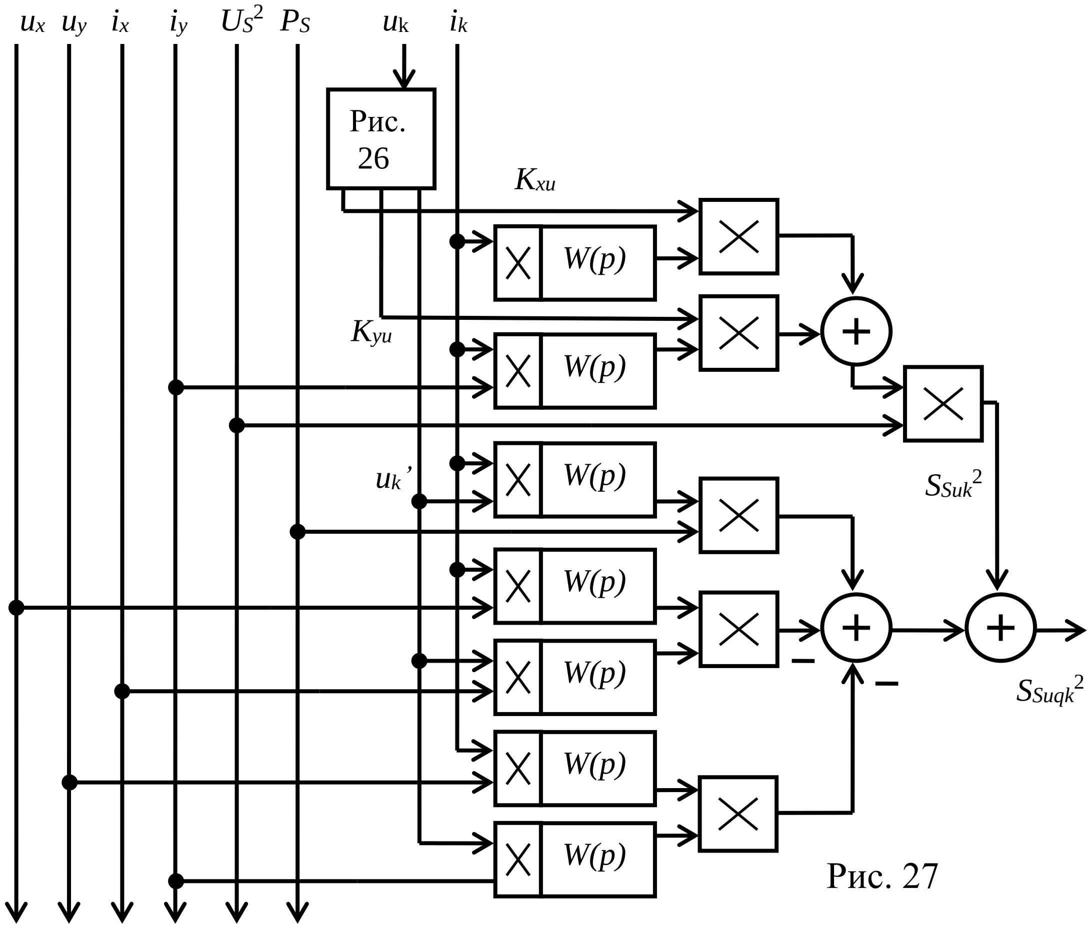


Рис. 27

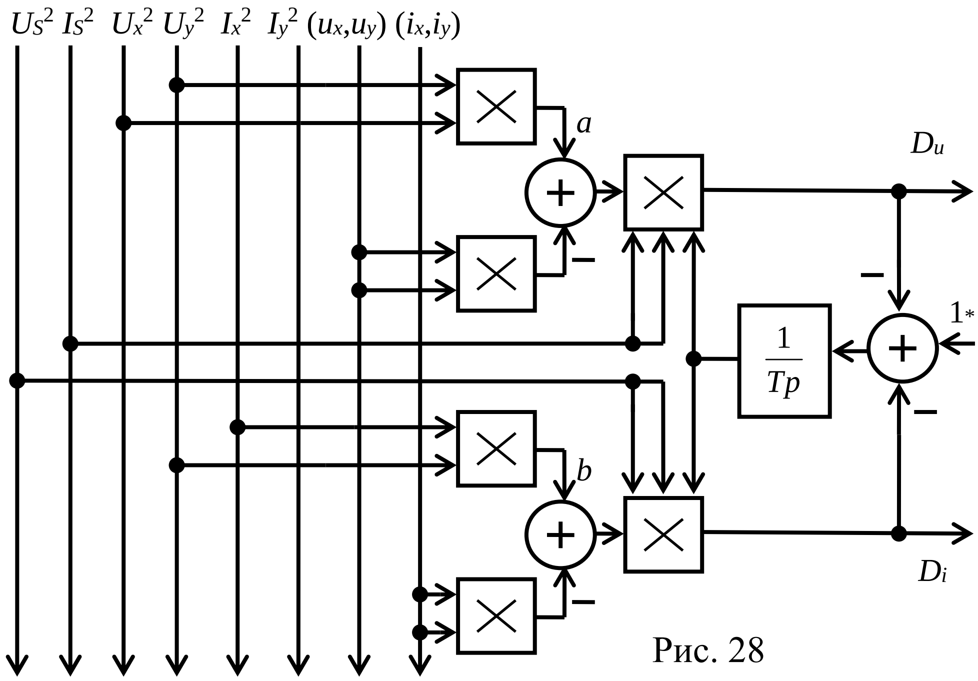


Рис. 28

Схема (рис. 27) выполняет операции точно в соответствии с формулой (13.1 а) без долевого коэффициента и с векторными парами, преобразованными к скалярным по формуле (4.23). Пара интегральных элементов из множителя и апериодического звена на (рис. 25) обозначена на (рис. 27) упрощенно одним элементом.

Коэффициенты долевого участия определяются с помощью схемы (рис. 28). Левая половина схемы формирует на выходах сумматоров сигналы $a = [u_x,u_y]^2$, $b = [i_x,i_y]^2$ в соответствии с уравнениями (11.17), (11.20). Эти сигналы поступают на четырехвходовые множители (можно применить по два двухвходовых) вместе с парами сигналов U_S^2, I_S^2. Можно считать, что поступают сигналы $a \cdot I_S^4$, $b \cdot U_S^4$. Справа на схему подается электрический сигнал 1*, условно принятый за единицу. Обратная связь правой половины схемы поддерживает сумму сигналов $D_u + D_i = 1$, что соответствует (11.25 б). Из-за множителей D_u пропорционально $I_S^4 \cdot [u_x,u_y]^2$, а D_i пропорционально $U_S^4 \cdot [i_x,i_y]^2$. Поэтому выход D_u соответствует формуле (13.2), а это эквивалентно требуемой формуле (11.26).

$$D_u = \frac{I_S^4[u_x,u_y]^2}{I_S^4[u_x,u_y]^2 + U_S^4[i_x,i_y]^2}. \tag{13.2}$$

Поменяв местами сигналы токов и напряжений в схемах (рис. 26, 27) можно измерять все необходимые сигналы токовой ветви предлагаемой теории. После определения долевых коэффициентов можно найти энергетические составляющие по формуле (13.1 в).

13.3. «Давайте договоримся!»

Когда все энергетические теории начали подходить к своему логическому тупику, на всех конференциях уже начало формироваться мнение, что пора кончать разработки, а надо сесть за стол и «договориться», как определять реактивную мощность. Все чаще звучала фраза: «Реактивная мощность – это коллективный договор!» Если бы дело дошло до этого, то большинством голосов была бы принята формула через преобразования Гильберта.

Научные проблемы не решаются голосованием, но в коллективном договоре есть и свои практические плюсы. Мы живем в «напряженческом» мире, поэтому можно договориться и субъективно принять формулы только напряженческой ветви теории без сложных коэффициентов долевого участия. Баланс по цепи будет сходиться, формулы и схемы реализации упростятся. Даже участие одной фазы в трехфазном балансе будет просто и понятно в виде S_{SaA}^2 в формуле (11.30 а), а не как («О ужас!») в виде формулы (11.32) с долевыми коэффициентами. Энергосистема сможет навести порядок со своими потребителями, немножко будет нарушен «принцип справедливости», но только самую малость при почти симметричных режимах реальных сетей.

Если где-то возникнет большая несимметрия, то вопрос с такими потребителями будет решаться индивидуально и техническими средствами симметрирования, а не экономическими по данной теории. Все это будет лучше существующего положения дел.

14. КОМПЛЕКСНЫЙ БАЛАНС ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ОДНОИМЕННЫХ СИГНАЛОВ

В главе 4 в формуле (4.20) ответственность сперва была записана через ортогональные составляющие, потом через скалярные и векторные пары. Это позволило ввести в главе 5 комплексные размерности. Здесь мы уже получили обе пары, теперь надо найти формы записи через ортогональные составляющие и сформулировать правила для новых многофазных комплексных размерностей. Не ясно, будет ли это иметь какое-то практическое значение. Но также не ясно, что дали для практики мощные спектральные методы, применяемые в ТОЭ. Они являются научным средством доказательства каких-то полезных интегральных соотношений. Но сейчас все полезные для практики интегральные соотношения уже получены и аппаратно реализованы. Единственная польза в показе методологической завершенности новой теории, которая должна дать одинаковые результаты при всех подходах. Комплексный баланс ортогональных составляющих развивает новые тождества квадратов (4.15), (4.16), формулу раскрытия векторной пары (5.8 б) и систему комплексных размерностей (табл. 8, 9).

14.1. Баланс через взаимодействия одноименных ортогональные составляющие

Для упрощения записей ограничимся двумя фазами и преимущественно напряженческой ветвью. Токовая ветвь будет симметричной по форме. Комплекс напряжения элемента с q-хвостом обозначен $\dot{U}_{kq}$ с составляющими $\dot{U}_k$ и $\dot{U}_q$, а комплекс тока $\dot{I}_k$ при напряженческом подходе не имеет хвоста.

В комплексной записи (14.1) для напряженческой ответственности с хвостом $S_{Suqk}{}^2$ исходной является форма (14.1 в). Она перенесена из итоговой формулы (12.9) при $D_u = 1$ и $D_i = 0$, то есть для напряженческого подхода. Далее ее удобнее преобразовать к виду (14.1 г) прежде, чем расписать через ортогональные составляющие в форме (д) для четырех форм сигналов. Для наглядности **выделены хвостовые сигналы**. Формы (14.1 а, б) показывают исходную комплексную форму записи:

$$S_{Suqk}{}^{2} = \mathrm{Ex}\{ (\dot{U}_S \cdot \dot{U}_{kq})\cdot(\dot{I}_S \cdot \dot{I}_k) \}= \qquad (а) \qquad (14.1)$$

$$= \mathrm{Ex}\{ ((\dot{U}_x + \dot{U}_y)\cdot(\dot{U}_k + \dot{U}_q)) \cdot ((\dot{I}_x + \dot{I}_y)\cdot \dot{I}_k) \} = \qquad (б)$$

$$\begin{aligned}
&= (u_x,u_k)\cdot(i_x,i_k) + (u_y,u_k)\cdot(i_y,i_k) + \\
&+ [u_x,u_k]\cdot[i_x,i_k] + [u_y,u_k]\cdot[i_y,i_k] - \qquad (в)\\
&- (u_x,\boldsymbol{u_q})\cdot(i_y,i_k) + (u_y,\boldsymbol{u_q})\cdot(i_x,i_k) + \\
&+ [u_x,\boldsymbol{u_q}]\cdot[i_y,i_k] - [u_y,\boldsymbol{u_q}]\cdot[i_x,i_k] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \{ (u_x,u_k) + (u_x,\boldsymbol{u_q}) \}\cdot(i_x,i_k) + \\
&+ \{ (u_y,u_k) - (u_x,\boldsymbol{u_q}) \}\cdot(i_y,i_k) + \qquad (г)\\
&+ \{ [u_x,u_k] - [u_y,\boldsymbol{u_q}] \}\cdot[i_x,i_k] + \\
&+ \{ [u_y,u_k] + [u_x,\boldsymbol{u_q}] \}\cdot[i_y,i_k] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (U_{x1}\cdot U_1 + U_{x2}\cdot U_2 + U_{x3}\cdot U_3 + U_{x4}\cdot U_4 + \\
&\qquad + U_{y1}\cdot \boldsymbol{U_{q1}} + U_{y2}\cdot \boldsymbol{U_{q2}} + U_{y3}\cdot \boldsymbol{U_{q3}} + U_{y4}\cdot \boldsymbol{U_{q4}})\cdot \qquad (д)\\
&\qquad\qquad \cdot(I_{x1}\cdot I_1 + I_{x2}\cdot I_2 + I_{x3}\cdot I_3 + I_{x4}\cdot I_4) + \\
&+ (+U_{y1}\cdot U_1 + U_{y2}\cdot U_2 + U_{y3}\cdot U_3 + U_{y4}\cdot U_4 - \\
&\qquad -U_{y1}\cdot \boldsymbol{U_{q1}} - U_{y2}\cdot \boldsymbol{U_{q2}} - U_{y3}\cdot \boldsymbol{U_{q3}} - U_{y4}\cdot \mathbf{U_{q4}})\cdot \\
&\qquad\qquad \cdot(I_{y1}\cdot I_1 + I_{y2}\cdot I_2 + I_{y3}\cdot I_3 + I_{y4}\cdot I_4)+
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&+ (U_{x1}\cdot U_2 - U_{x2}\cdot U_1 - U_{y1}\cdot \boldsymbol{U_{q2}} + U_{y2}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(I_{x1}\cdot I_2 - I_{x2}\cdot I_1) + \\
&+ (U_{x1}\cdot U_3 - U_{x3}\cdot U_1 - U_{y1}\cdot \boldsymbol{U_{q3}} + U_{y3}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(I_{x1}\cdot I_3 - I_{x3}\cdot I_1) + \\
&+ (U_{x1}\cdot U_4 - U_{x4}\cdot U_1 - U_{y1}\cdot \boldsymbol{U_{q4}} + U_{y4}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(I_{x1}\cdot I_4 - I_{x4}\cdot I_1) + \\
&+ (U_{x2}\cdot U_3 - U_{x3}\cdot U_2 - U_{y2}\cdot \boldsymbol{U_{q3}} + U_{y3}\cdot \boldsymbol{U_{q2}})\cdot(I_{x2}\cdot I_3 - I_{x3}\cdot I_2) + \\
&+ (U_{x2}\cdot U_4 - U_{x4}\cdot U_2 - U_{y2}\cdot \boldsymbol{U_{q4}} + U_{y4}\cdot \boldsymbol{U_{q2}})\cdot(I_{x2}\cdot I_4 - I_{x4}\cdot I_2) + \\
&+ (U_{x3}\cdot U_4 - U_{x4}\cdot U_3 - U_{y3}\cdot \boldsymbol{U_{q4}} + U_{y4}\cdot \boldsymbol{U_{q3}})\cdot(I_{x3}\cdot I_4 - I_{x4}\cdot I_3) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&+ (U_{y1}\cdot U_2 - U_{y2}\cdot U_1 + U_{x1}\cdot \boldsymbol{U_{q2}} - U_{x2}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(I_{y1}\cdot I_2 - I_{y2}\cdot I_1) + \\
&+ (U_{y1}\cdot U_3 - U_{y3}\cdot U_1 + U_{x1}\cdot \boldsymbol{U_{q3}} - U_{x3}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(I_{y1}\cdot I_3 - I_{y3}\cdot I_1) + \\
&+ (U_{y1}\cdot U_4 - U_{y4}\cdot U_1 + U_{x1}\cdot \boldsymbol{U_{q4}} - U_{x4}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(I_{y1}\cdot I_4 - I_{y4}\cdot I_1) + \\
&+ (U_{y2}\cdot U_3 - U_{y3}\cdot U_2 + U_{x2}\cdot \boldsymbol{U_{q3}} - U_{x3}\cdot \boldsymbol{U_{q2}})\cdot(I_{y2}\cdot I_3 - I_{y3}\cdot I_2) + \\
&+ (U_{y2}\cdot U_4 - U_{y4}\cdot U_2 + U_{x2}\cdot \boldsymbol{U_{q4}} - U_{x4}\cdot \boldsymbol{U_{q2}})\cdot(I_{y2}\cdot I_4 - I_{y4}\cdot I_2) + \\
&+ (U_{y3}\cdot U_4 - U_{y4}\cdot U_3 + U_{x3}\cdot \boldsymbol{U_{q4}} - U_{x4}\cdot \boldsymbol{U_{q3}})\cdot(I_{y3}\cdot I_4 - I_{y4}\cdot I_3) .
\end{aligned}$$

Полезно иметь перед глазами токовый подход, хотя бы в укороченном виде (14.2). Особенно полезна группировка (в).

$$S_{Siqk}{}^2 \quad = \mathrm{Ex}\{\ (\dot U_S \cdot \dot U_k)\cdot(\dot I_S \cdot \dot I_{kq})\ \}= \qquad (а) \qquad (14.2)$$

$$= \ \mathrm{Ex}\{\ (\ (\dot U_x\ +\ \dot U_y)\cdot \dot U_k)\ \cdot\ ((\dot I_x\ + \dot I_y\ )\cdot(\dot I_k\ +\ \dot I_q))\ \}\ = \qquad (б)$$

$$\begin{aligned}
&= \ (u_x,u_k)\cdot(i_x,i_k) + (u_y,u_k)\cdot(i_y,i_k) + \\
&+ \ [u_x,u_k]\cdot[i_x,i_k] + [u_y,u_k]\cdot[i_y,i_k] + \qquad (в)\\
&+ \ (u_x,u_k)\cdot(i_y,\boldsymbol{i_q}) - (u_y,u_k)\cdot(i_x,\boldsymbol{i_q}) - \\
&- \ [u_x,u_k]\cdot[i_y,\boldsymbol{i_q}] + [u_y,u_k]\cdot[i_x,\boldsymbol{i_q}]\ .
\end{aligned}$$

14.2. Двухфазные комплексные размерности и их одноименные взаимодействия

Запишем комплексные размерности буквами по аналогии с формулами (5.3), (5.4) и таблицами 8 и 9, но внесем коррективы в размеры букв. По аналогии с системой октав размерности при сигналах фазы x и сигналах элемента u_k, i_k будем обозначать малыми буквами, а фазы y и хвоста u_q – большими. Второе противоречит таблицам 8, 9, где большими буквами обозначались размерности первых произведений, что было удобно. Но сейчас не хватает «степеней свободы» для идентификации разных качеств.

Парные взаимодействия одноименных сигналов в комплексной форме должны иметь вид

$$\dot U_S \cdot \dot U_{kq}\ = (\dot U_x\ +\ \dot U_y)\cdot(\dot U_k\ +\ \dot U_q) = \ (а) \quad (14.3)$$

$$\begin{aligned}
&= (U_{x1}\cdot v_1+U_{x2}\cdot v_2+U_{x3}\cdot v_3+U_{x4}\cdot v_4\ \ +\ \ U_{y1}\cdot V_1+U_{y2}\cdot V_2+U_{y3}\cdot V_3+U_{y4}\cdot V_4\ )\cdot \\
&\ \cdot(\ U_1\ \cdot v_1+U_2\ \cdot v_2\ +U_3\ \cdot v_3+U_4\ \cdot v_4\ \ +\ \ \boldsymbol{U_{q1}}\cdot V_1+\boldsymbol{U_{q2}}\cdot V_2+\boldsymbol{U_{q3}}\cdot V_3+\boldsymbol{U_{q4}}\cdot V_4\ ) = \qquad (б)
\end{aligned}$$

$$=(+U_{x1}\cdot U_1+U_{x2}\cdot U_2+U_{x3}\cdot U_3+U_{x4}\cdot U_4\ \ +\ \ U_{y1}\cdot \boldsymbol{U_{q1}}+U_{y2}\cdot \boldsymbol{U_{q2}}+U_{y3}\cdot \boldsymbol{U_{q3}}+U_{y4}\cdot \boldsymbol{U_{q4}})\cdot(\ v^2\ ) + (в)$$

$$
\begin{aligned}
&+(+U_{x1}\cdot U_2-U_{x2}\cdot U_1 && -U_{y1}\cdot \boldsymbol{U_{q2}}+U_{y2}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(v_{12})+\\
&+(+U_{x1}\cdot U_3-U_{x3}\cdot U_1 && -U_{y1}\cdot \boldsymbol{U_{q3}}+U_{y3}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(v_{13})+\\
&+(+U_{x1}\cdot U_4-U_{x4}\cdot U_1 && -U_{y1}\cdot \boldsymbol{U_{q4}}+U_{y4}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(v_{14})+\\
&+(+U_{x2}\cdot U_3-U_{x3}\cdot U_2 && -U_{y2}\cdot \boldsymbol{U_{q3}}+U_{y3}\cdot \boldsymbol{U_{q2}})\cdot(v_{23})+\\
&+(+U_{x2}\cdot U_4-U_{x4}\cdot U_2 && -U_{y2}\cdot \boldsymbol{U_{q4}}+U_{y4}\cdot \boldsymbol{U_{q2}})\cdot(v_{24})+\\
&+(+U_{x3}\cdot U_4-U_{x4}\cdot U_3 && -U_{y3}\cdot \boldsymbol{U_{q4}}+U_{y4}\cdot \boldsymbol{U_{q3}})\cdot(v_{34})+\\
&+(-U_{y1}\cdot U_1-U_{y2}\cdot U_2-U_{y3}\cdot U_3-U_{y4}\cdot U_4 \ + && U_{x1}\cdot \boldsymbol{U_{q1}}+U_{x2}\cdot \boldsymbol{U_{q2}}+U_{x3}\cdot \boldsymbol{U_{q3}}+U_{x4}\cdot \boldsymbol{U_{q4}})\cdot(V^2)+\\
&+(+U_{y1}\cdot U_2-U_{y2}\cdot U_1 && +U_{x1}\cdot \boldsymbol{U_{q2}}-U_{x2}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(V_{12})+\\
&+(+U_{y1}\cdot U_3-U_{y3}\cdot U_1 && +U_{x1}\cdot \boldsymbol{U_{q3}}-U_{x3}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(V_{13})+\\
&+(+U_{y1}\cdot U_4-U_{y4}\cdot U_1 && +U_{x1}\cdot \boldsymbol{U_{q4}}-U_{x4}\cdot \boldsymbol{U_{q1}})\cdot(V_{14})+\\
&+(+U_{y2}\cdot U_3-U_{y3}\cdot U_2 && +U_{x2}\cdot \boldsymbol{U_{q3}}-U_{x3}\cdot \boldsymbol{U_{q2}})\cdot(V_{23})+\\
&+(+U_{y2}\cdot U_4-U_{y4}\cdot U_2 && +U_{x2}\cdot \boldsymbol{U_{q4}}-U_{x4}\cdot \boldsymbol{U_{q2}})\cdot(V_{24})+\\
&+(+U_{y3}\cdot U_4-U_{y4}\cdot U_3 && +U_{x3}\cdot \boldsymbol{U_{q4}}-U_{x4}\cdot \boldsymbol{U_{q3}})\cdot(V_{34}).
\end{aligned}
$$

$$
\dot{I}_S\cdot\dot{I}_{kq} = (\dot{I}_x+\dot{I}_y)\cdot(\dot{I}_k+\dot{I}_q) = \quad \text{(а)} \qquad (14.4)
$$

$$
\begin{aligned}
&= (I_{x1}\cdot a_1+I_{x2}\cdot a_2+I_{x3}\cdot a_3+I_{x4}\cdot a_4 \ + \ I_{y1}\cdot A_1+I_{y2}\cdot A_2+I_{y3}\cdot A_3+I_{y4}\cdot A_4)\cdot\\
&\cdot(I_1\cdot a_1+I_2\cdot a_2+I_3\cdot a_3+I_4\cdot a_4 \ + \ \boldsymbol{I_{q1}}\cdot A_1+\boldsymbol{I_{q2}}\cdot A_2+\boldsymbol{I_{q3}}\cdot A_3+\boldsymbol{I_{q4}}\cdot A_4) = \qquad \text{(б)}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&=(+I_{x1}\cdot I_1+I_{x2}\cdot I_2+I_{x3}\cdot I_3+I_{x4}\cdot I_4 \ + && I_{y1}\cdot\boldsymbol{I_{q1}}+I_{y2}\cdot\boldsymbol{I_{q2}}+I_{y3}\cdot\boldsymbol{I_{q3}}+I_{y4}\cdot\boldsymbol{I_{q4}})\cdot(a^2)+ \qquad \text{(в)}\\
&+(+I_{x1}\cdot I_2-I_{x2}\cdot I_1 && -I_{y1}\cdot\boldsymbol{I_{q2}}+I_{y2}\cdot\boldsymbol{I_{q1}})\cdot(a_{12})+\\
&+(+I_{x1}\cdot I_3-I_{x3}\cdot I_1 && -I_{y1}\cdot\boldsymbol{I_{q3}}+I_{y3}\cdot\boldsymbol{I_{q1}})\cdot(a_{13})+\\
&+(+I_{x1}\cdot I_4-I_{x4}\cdot I_1 && -I_{y1}\cdot\boldsymbol{I_{q4}}+I_{y4}\cdot\boldsymbol{I_{q1}})\cdot(a_{14})+\\
&+(+I_{x2}\cdot I_3-I_{x3}\cdot I_2 && -I_{y2}\cdot\boldsymbol{I_{q3}}+I_{y3}\cdot\boldsymbol{I_{q2}})\cdot(a_{23})+\\
&+(+I_{x2}\cdot I_4-I_{x4}\cdot I_2 && -I_{y2}\cdot\boldsymbol{I_{q4}}+I_{y4}\cdot\boldsymbol{I_{q2}})\cdot(a_{24})+\\
&+(+I_{x3}\cdot I_4-I_{x4}\cdot I_3 && -I_{y3}\cdot\boldsymbol{I_{q4}}+I_{y4}\cdot\boldsymbol{I_{q3}})\cdot(a_{34})+\\
&+(-I_{y1}\cdot I_1-I_{y2}\cdot I_2-I_{y3}\cdot I_3-I_{y4}\cdot I_4 \ + && I_{x1}\cdot\boldsymbol{I_{q1}}+I_{x2}\cdot\boldsymbol{I_{q2}}+I_{x3}\cdot\boldsymbol{I_{q3}}+I_{x4}\cdot\boldsymbol{I_{q4}})\cdot(A^2)+
\end{aligned}
$$

$+(+I_{y1}\cdot I_2-I_{y2}\cdot I_1 \qquad +I_{x1}\cdot\boldsymbol{I_{q2}}-I_{x2}\cdot\boldsymbol{I_{q1}})\cdot(A_{12})+$
$+(+I_{y1}\cdot I_3-I_{y3}\cdot I_1 \qquad +I_{x1}\cdot\boldsymbol{I_{q3}}-I_{x3}\cdot\boldsymbol{I_{q1}})\cdot(A_{13})+$
$+(+I_{y1}\cdot I_4-I_{y4}\cdot I_1 \qquad +I_{x1}\cdot\boldsymbol{I_{q4}}-I_{x4}\cdot\boldsymbol{I_{q1}})\cdot(A_{14})+$
$+(+I_{y2}\cdot I_3-I_{y3}\cdot I_2 \qquad +I_{x2}\cdot\boldsymbol{I_{q3}}-I_{x3}\cdot\boldsymbol{I_{q2}})\cdot(A_{23})+$
$+(+I_{y2}\cdot I_4-I_{y4}\cdot I_2 \qquad +I_{x2}\cdot\boldsymbol{I_{q4}}-I_{x4}\cdot\boldsymbol{I_{q2}})\cdot(A_{24})+$
$+(+I_{y3}\cdot I_4-I_{y4}\cdot I_3 \qquad +I_{x3}\cdot\boldsymbol{I_{q4}}-I_{x4}\cdot\boldsymbol{I_{q3}})\cdot(A_{34}).$

Далее осуществляется произведение комплексных пар (14.3) на (14.4) и экстракция членов с результатом s^2. При этом произведение двух хвостов недопустимо, всегда в произведении участвует один хвост, поэтому они и выделены. Экстракция произведения с напряженческим хвостом должна дать формулу (14.1 д), с токовым – (14.2 в). По итогам этих действий заполняются таблицы 12 и 13.

Все действия описанного процесса написания формул и составления таблиц – взаимосвязанные. Они методом проб и ошибок повторяются много раз до получения полного взаимно однозначного соответствия.

Таблица 12

1-й\2-й	v_1	v_2	a_1	a_2	V_1	V_2	A_1	A_2
v_1	v^2	v_{12}			V^2	V_{12}		
v_2	$-v_{12}$	v^2			$-V_{12}$	V^2		
a_1			$\underline{a}^2$	a_{12}			A^2	A_{12}
a_2			$-a_{12}$	a^2			$-A_{12}$	A^2
V_1	$-V^2$	V_{12}			v^2	$-v_{12}$		
V_2	$-V_{12}$	$-V^2$			v_{12}	v_2		
A_1			$-A^2$	A_{12}			a^2	$-a_{12}$
A_2			$-A_{12}$	$-A^2$			a_{12}	a^2

Свободные ячейки в таблицах оставлены для будущих произведений разноименных сигналов.

Таблица 13

1-й\2-й	a^2	A^2	a_{12}	a_{13}	A_{12}	A_{13}
v^2	s^2					
V^2		s^2				
v_{12}			s^2			
v_{13}				s^2		
V_{12}					s^2	
V_{13}						s^2

14.3. Логическое завершение

На этом предлагаемая теория балансируемых составляющих ответственностей к формуле (8.20) произвольной цепи с трехпроводным питанием завершена.

Завершение удалось осуществить только через взаимодействия одноименных сигналов. Это самый естественный подход к решению проблемы, он нигде не вступил в конфликт с природными явлениями, но он противоречит общепринятому мировоззрению, что баланс надо рассчитывать через взаимодействия разноименных сигналов или через мощности. Это противоестественный социальный заказ на разработку теории. Далее будут предприняты попытки его выполнения. Вместо логики часто будет применяться «метод перебора вариантов». Автор считает это следствием противоестественности заказа. А сейчас надо подвести черту под завершенной логической частью:

«————————————————————————————————»

15. ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЙ БАЛАНС РАЗНОИМЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

В однофазной цепи интегральная формула энергетического баланса (4.25 в) была переписана через взаимодействия одноименных сигналов (4.25 б) и разноименных (4.25 а). На последнюю форму имеется «социальный заказ», так как формула представляет взаимодействие мощностей. Похожая ситуация сложилась в цепи с трехпроводным питанием. Имеется формула энергетического баланса (12.5) только через скалярные произведения почти всех сочетаний сигналов. В этой формуле 15 членов и это вызывает психологический протест. Аналогичная однофазная формула (4.25 в) имела 3 члена, и это тоже вызывало протест, поэтому преимущество отдано формулам из двух членов (4.25 а, б), хотя векторная пара при расчетах превращается в два члена (4.23). То есть все «экономные» формы записи не уменьшают «расчетную мощность» (количество математических операций), она сохраняется. Создается чувство, что формулами (4.25 в), (12.5) можно было бы закончить данное пособие в мире роботов, но людям хочется какого-то красивого представления. Красота используется как критерий истины и автором пособия. Это уже «психологический заказ», упомянутый «социальный» является его частным случаем. Психология свойственна человеку вообще, он любит красоту, а социальный заказ возник на данном этапе развития общества. Автор пособия надеется, что со временем люди придут к соглашению, что полная мощность балансируется в цепи через взаимодействия одноименных сигналов, тогда будут признаны формулы (4.25 б), (12.9), (12.13) и не нужны будут дальнейшие.

15.1. Разноименные сигналы в извращенном векторном произведении и гиперболический баланс четырех членов

За исходную возьмем формулу (14.1 в) в варианте с напряженческим хвостом (15.1 а, б). Затем перепишем первые две строчки формулы к варианту взаимодействия разноименных сигналов (15.1 г), как этот переход был сделан в (4.25). Во-вторых, двух строчках (15.1 б) «не удачно расставлены знаки» и подобное преобразование не получается. Однако при этих знаках подобный переход получается, если прибегнуть к извращенному векторному произведению (5.11 а, б), что и сделано во вторых строчках (15.1 г):

$$S_{Suqk}^2 = \mathrm{Ex}\{\,(\dot{U}_S\cdot\dot{U}_{kq})\cdot(\dot{I}_S\cdot\dot{I}_k)\,\} = \quad \text{(а)} \qquad (15.1)$$

$$\begin{aligned}
&= (u_x,u_k)\cdot(i_x,i_k) + (u_y,u_k)\cdot(i_y,i_k) + \\
&+ [u_x,u_k]\cdot[i_x,i_k] + [u_y,u_k]\cdot[i_y,i_k] - \qquad \text{(б)}\\
&- (u_x,u_q)\cdot(i_y,i_k) + (u_y,u_q)\cdot(i_x,i_k) + \\
&+ [u_x,u_q]\cdot[i_y,i_k] - [u_y,u_q]\cdot[i_x,i_k] =
\end{aligned}$$

$$= \mathrm{Ex}\{\,(\dot{U}_S\cdot\dot{I}_S)\cdot(\dot{U}_{kq}\cdot\dot{I}_k)\,\} = \quad \text{(в)}$$

$$= \{ (u_x,i_x) + (u_y,i_y) \}\cdot(u_k,i_k) + \qquad (г)$$
$$+ \{ [u_x,i_x] + [u_y,i_y] \}\cdot[u_k,i_k] -$$
$$- \{ (u_y,i_x) - (u_x,i_y) \}\cdot(u_q,i_k) +$$
$$+ \{ [[u_y,i_x]] - [[u_x,i_y]] \}\cdot[[u_{q,ik}]].$$

Аналогично можно получить формулу токового подхода, а затем через долевые коэффициенты и общую формулу энергетического баланса в «извращенной» форме

$$\boxed{\begin{array}{l} S_{Sk}^2 = P_S\cdot P_k + Q_S\cdot Q_k - X_S\cdot X_k + Y_S\cdot Y_k = \\ =\{ (u_x,i_x) + (u_y,i_y) \}\cdot\{ D_u\cdot(u_k,i_k) + D_i\cdot(u_k,i_k) \} + \\ +\{ [u_x,i_x] + [u_y,i_y] \}\cdot\{ D_u\cdot[u_k,i_k] + D_i\cdot[u_k,i_k] \} - \\ -\{ (u_x,i_y) - (u_y,i_x) \}\cdot\{ -D_u\cdot(u_q,i_k) + D_i\cdot(u_k,i_q) \} + \\ +\{[[u_x,i_y]]-[[u_y,i_x]]\}\cdot\{-D_u\cdot[[u_q,i_k]]+D_i\cdot[[u_k,i_q]]\}. \end{array}} \begin{array}{l} (a) \quad (15.2) \\ (P) \\ (Q) \\ (X) \\ (Y) \end{array}$$
$$(s) \qquad\qquad\qquad (k)$$

Нумерация строк и столбцов здесь выполнена под универсальную формулу энергетического баланса (4.11). Можно проверить, что баланс каждого правого k-го члена сходится к левому s-му члену.

Запись обычных активных и реактивных мощностей в столь необычной форме с коэффициентами долевого участия имеет все права на достоверность. В защиту выступает полная симметрия записей в (15.2), а красота в подобных сложных случаях может выступить критерием истины. Теперь трудно будет опровергнуть утверждение, что экзотические коэффициенты долевого участия ВСЕГДА ПРИСУТСТВОВАЛИ В ОБЩЕИЗВЕСТНЫХ БАЛАНСАХ мощностей, но их не замечали из-за единичной суммы этих коэффициентов (11.25 б). Действительно, в строчках (P, Q) формулы (15.2) эти коэффициенты стоят перед одинаковыми сомножителями, после вынесения их в скобках остается ($D_u + D_i$) = 1. Так было всегда, но об этом никто не догадывался! Коэффициенты дали о себе знать в строках (X, Y), где и сомножители разные, и находится их разность, а не сумма.

Из-за извращенного векторного произведения появился новый скалярный член $-X_S\cdot X_k$ со знаком минус в квадратичном балансе. В принципе, в математике известен квадратичный баланс с минусами. Он называется гиперболическим в отличии от привычного для электриков, который называется тригонометрическим. Дело в том, что модуль извращенного (гиперболического) векторного произведения из (5.11)

$$[[x,y]]^2 = X^2 \cdot Y^2 + (x,y)^2 \qquad (15.3)$$

всегда больше произведения модулей. Это качественное отличие от неравенства Шварца (1.1), с которого Фризе начал строить свою «тригонометрическую» концепцию. Далее следует вспомнить, что разность квадратов гиперболических синуса и косинуса равна 1 и станет ясно происхождение слов «гиперболический квадратичный баланс».

В трехфазном варианте формула примет вид (15.4) через z-хвосты. Корень из 3 в последних двух строках введен для выполнение баланса s-х k-х частей. В реальных расчетах этот корень можно сократить.

$$\begin{aligned}
& S_{Sk}^2 = P_S \cdot P_k + Q_S \cdot Q_k - X_S \cdot X_k + Y_S \cdot Y_k = && \text{(а)} \qquad (15.4)\\
& = \{ (u_A,i_A) + (u_B,i_B) + (u_C,i_C)\} \cdot \{ D_u \cdot (u_k,i_k) + D_i \cdot (u_k,i_k) \} + && (P)\\
& + \{ [u_A,i_A] + [u_B,i_B] + [u_C,i_C]\} \cdot \{ D_u \cdot [u_k,i_k] + D_i \cdot [u_k,i_k] \} - && (Q)\\
& - \frac{(u_{BC},i_A)+(u_{CA},i_B)+(u_{AB},i_C)}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{3}\,\{ -D_u \cdot (u_z,i_k) + D_i \cdot (u_k,i_z) \} + && (X)\\
& + \frac{[[u_{BC},i_A]]+[[u_{CA},i_B]]+[[u_{AB},i_C]]}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{3}\,\{ -D_u \cdot [[u_z,i_k]] + D_i \cdot [[u_k,i_z]] \}. && (Y)\\
& \qquad\qquad (s) \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad (k)
\end{aligned}$$

В этой формуле сразу бросается в глаза член X_S (строка X, столбец s), он совпадает с «классическим» определением реактивной мощности в трехфазной сети (11.6). Через уравнения трехпроводных связей можно получить еще два варианта формулы под два варметра

$$\begin{aligned}
X_S &= \sqrt{3}\,\{(u_{BC},i_A) - (u_A,i_{BC})\}/2 = && \text{(а)} \qquad (15.5)\\
&= \sqrt{3}\,\{(u_A,i_B) - (u_B,i_A)\} = && \text{(б)} \qquad .\\
&= (u_x,i_y) - (u_y,i_x). && \text{(в)} \qquad .
\end{aligned}$$

Радость автора в том, что он строго последовательно, а не из принятых в учебниках «очевидных» соображений ортогональности линейного и фазного сигналов, доказал принятое определение реактивной мощности (11.6), (15.5) оказалась преждевременной. Квадрат этого члена входит в общий квадратичный баланс со знаком минус! И в дальнейшем не удалось получить общепринятое определение (11.6).

15.2. Результаты четырех балансов и кто же создает квадратичные члены

Найдем балансы всех четырех членов формулы (15.2) или, что то же самое, квадраты ее s-х множителей:

$$
\begin{aligned}
S_S^2 &= P_S^2 + Q_S^2 - X_S^2 + Y_S^2 = && \text{(a)} \\
&= (u_x,i_x)^2 + (u_y,i_y) + 2\cdot(u_x,i_x)(u_y,i_y) + && (P) \quad (15.6)\\
&+ U_x^2\cdot I_x^2 - (u_x,i_x)^2 + U_y^2\cdot I_y^2 - (u_y,i_y)^2 + && (Q) \\
&+ 2\cdot(u_x,u_y)(i_x,i_y) - 2\cdot(u_x,i_y)(u_y,i_x) - && \\
&- (u_x,i_y)^2 - (u_y,i_x)^2 + 2\cdot(u_x,i_y)(u_y,i_x) + && (X) \\
&+ U_x^2\cdot I_y^2 + (u_x,i_y)^2 + U_y^2\cdot I_x^2 + (u_y,i_x)^2 - && (Y) \\
&- 2\cdot(u_x,u_y)(i_x,i_y) - 2\cdot(u_x,i_x)(u_y,i_y) = && \\
&= (U_x^2 + U_y^2)\cdot(I_x^2 + I_y^2). && (S)
\end{aligned}
$$

Здесь интересно проследить, что с чем сокращается в строках (P) … (Y) прежде, чем получается результат (S). Видно, что только члены векторных пар (Q) и (Y) дают нужные члены квадратов действующих значений типа $U_x^2\cdot I_x^2$, а члены скалярных пар, включая строку (P) активного баланса, полностью сокращаются. Так что никакая смена знаков не приведет к появлению составляющих типа $U_x^2\cdot I_x^2$ в строках (P) и (X). Опять получается, что активная мощность участвует только в справедливом перераспределении ответственностей между элементами, а затем сокращается в общем элементном балансе! А все альтернативные теории начинали с баланса активной мощности. Баланс при взаимодействиях разноименных сигналов (мощностей) создается только векторными парами. Очередной парадокс!

Этот парадокс есть и в однофазных сетях. Действительно, если есть единственный элемент с $u_k = u_S$, $i_k = i_S$, то по формуле (4.25 а) и формуле раскрытия векторного квадрата (4.24)

$$
\begin{aligned}
S_{Sk}^2 &= S_S^2 = (u_S,i_S)(u_S,i_S) + \{ [u_S,i_S][u_S,i_S] \} = && (15.7)\\
&= P_S^2 + \{ Q_S^2 \} = P_S^2 + \{ U_S^2\cdot I_S^2 - P_S^2 \} = U_S^2\cdot I_S^2. &&
\end{aligned}
$$

Становится жутковато от мысли о чисто активном сопротивлении, подключенном к однофазной сети, у которого нулевая пассивная (реактивная) мощность, но все же она создает квадратичные члены полной мощности, а активная мощность сокращается. Жуткий парадокс! Такое же происходит и в многофазной сети (15.6).

Но все это парадоксы общепринятого мировоззрения на энергетический баланс взаимодействий разноименных сигналов (мощностей) в цепи. При мировоззрении, что балансируются взаимодействия одноименных сигналов, нет никаких парадоксов. Так для рассматриваемого однофазного случая по формуле (4.25 б)

$$S_{Sk}^2 = S_S^2 = (u_S,u_S)(i_S,i_S) + \{ [u_S,u_S][i_S,i_S] \} = \tag{15.8}$$
$$= U_S^2 \cdot I_S^2 + \{ 0 \cdot 0 \} = U_S^2 \cdot I_S^2.$$

15.3. Формулы для расчетов под универсальную формулу энергетического баланса мощностей

Полученные интегральные формулы написаны в форме, удобной для понимания их сути и критического анализа, но не для расчетов. Все реальные цепи трехфазные, но проще сетевые сигналы привести к двухфазным, оставив цепные неизменными. Это сделано при переходе от сигналов (11.23) к сигналам (11.24). Модель такого перехода: трехфазная сеть питания схемой (рис. 22 б) преобразуется к двухфазной и тут же такой же перевернутой схемой обратно в трехфазную, к которой и подключена цепь. Теперь все балансирование будет осуществляться к этой промежуточной двухфазной сети. Результаты совпадают с формулами трехфазного баланса, по которым сложнее считать.

Расчеты проще всего вести по формулам с взаимодействиями одноименных сигналов (11.22), (11.25), (11.26), (12.2), что уже проделано в таблице 11. Но при этом получается только общая ответственность элементов, но нет раскладки на ответственности за передачу активной мощности и т.д.

Сложности при расчетах по формуле (15.2) возникают только со строчками (Q) и (Y). Распишем их через скалярные произведения, используя формулы для пар векторного (4.23) и извращенного векторного (5.11 а, б) произведений.

$$Q_S \cdot Q_k = (u_x,u_k)(i_x,i_k) - (u_x,i_k)(i_x,u_k) + \tag{15.9}$$
$$+ (u_y,u_k)(i_y,i_k) - (u_y,i_k)(i_y,u_k);$$

$$Y_S \cdot Y_k = -D_u \cdot \{ +(u_x,u_q)(i_y,i_k) + (u_x,i_k)(i_y,u_q) - \tag{15.10}$$
$$- (u_y,u_q)(i_x,i_k) - (u_y,i_k)(i_x,u_q) \} +$$
$$+ D_i \cdot \{ + (u_x,u_k)(i_y,i_q) + (u_x,i_q)(i_y,u_k) -$$
$$- (u_y,u_k)(i_x,i_q) - (u_y,i_q)(i_x,u_k) \}.$$

Теперь имеются формулы для интегральных расчетов значений $P_S{\cdot}P_k$ (15.2 P), – $X_S{\cdot}X_k$ (15.2 X) и $Q_S{\cdot}Q_k$ (15.9), $Y_S{\cdot}Y_k$ (15.10).

Может возникнуть интерес к расчетам сомножителей. Проще это получается со скалярными парами, где у каждого сомножителя получается свой объективный знак

$$P_S = (u_x,i_x) + (u_y,i_y); \qquad P_k = (u_k,i_k); \tag{15.11}$$

$$X_S = (u_x,i_y) - (u_y,i_x); \qquad X_k = -D_u{\cdot}(u_q,i_k) + D_i{\cdot}(u_k,i_q). \tag{15.12}$$

С векторными парами предлагается поступить также, как получена формула (4.39) для однофазной цепи. По формуле (15.6) рассчитываются сперва значения Q_S^2, Y_S^2, а затем – плюс корни квадратные из них Q_S, Y_S. Субъективно может быть принят и знак минус. По формулам (15.9), (15.10) рассчитываются значения $Q_S{\cdot}Q_k$ и $Y_S{\cdot}Y_k$. Теперь значения Q_k, Y_k определяются по формулам

$$Q_k = (Q_S{\cdot}Q_k)/Q_S; \qquad Y_k = (Y_S{\cdot}Y_k)/Y_S\,. \tag{15.13}$$

Пример расчета схемы (рис. 24) с данными (11.23), (11.24) и таблица 11 приведен в таблицах 14 и 15. Последняя суммарная строчка в таблице 14 дает значения P_S, Q_S, X_S, Y_S. Значения D_u =0.642, D_i =0.358 рассчитаны ранее.

Таблица 14

	K_{xu} K_{xi}	K_{yu} K_{yi}	U_q I_q				P_k	Q_k	X_k	Y_k
Z_0	0.92 0.23	-0.12 -0.27	5.46 2.63	6.43 2.91	-7.23 5.46	4.23 -2.14	70	11.3	20.24	40.3
Z_1	-0.3 -0.8	-0.83 -0.52	8.92 3.58	-7.43 0.49	6.62 9.34	0.77 -3	38	44.5	19.32	55.22
Z_2	-0.3 -0.15	0.58 0.79	-8.4 -6.21	1.23 -3.4	-0.31 -14.8	-2.7 5.14	51	-5.8	26.4	70.1
Z_3	1.22 0.33	0.71 0.19	-3.46 -0.46	13.9 2.8	-13.9 -2.78	3.46 0.46	-6	157	40.53	118.2
Z_4	-1.22 -0.26	0.71 -0.08	-13.9 -0.14	-5.2 -2.38	6.9 0.95	-6.93 0.05	59	70.4	4.38	36.6
			Сумма				212	277.4	110.8	320.4

Таблица 15

	Ps·Pk	$Q_s \cdot Q_k$	$-X_s \cdot X_k$	$Y_s \cdot Y_k$	$Ys \cdot Yk – Xs \cdot Xk$	Сумма
Z_0	14840	3141.99	-2243.98	12913.71	10669.73	28651.73
Z_1	8056	12350.98	-2141.68	17694.12	15552.44	35959.42
Z_2	10812	-1609.99	-2924.02	22466.38	19542.36	28744.37
Z_3	-1272	43563.92	-4492.33	37861.99	33369.66	75661.58
Z_4	12508	19518.96	-485.99	11741.76	11255.77	43282.73
Сумма	44944	76966	-12288	102678	90389.96	212300

15.4. Балансы ортогональных составляющих и подход к комплексным размерностям

Для векторного (5.12) и извращенного векторного (5.11) уже предложены две симметричные формы записи через ортогональные составляющие. В таблицах 12, 13 начато формирование правил действий с комплексными размерностями для двухфазных цепей. На основе изложенного переписана форма (15.1 г) с напряженческим хвостом

$$S_{Suqk}{}^2 \quad = \mathrm{Ex}\Big\{ (\dot{U}_S \cdot \dot{I}_S)\cdot(\dot{U}_{kq} \cdot \dot{I}_k) \Big\} = \qquad (а) \quad (15.14)$$

$$= \mathrm{Ex}\Big\{\{(U_{x1}\cdot v_1 + U_{x2}\cdot v_2 + U_{x3}\cdot v_3 + U_{x4}\cdot v_4 + U_{y1}\cdot V_1 + U_{y2}\cdot V_2 + U_{y3}\cdot V_3 + U_{y4}\cdot V_4)\cdot \quad .$$

$$\cdot(I_{x1}\cdot a_1 + I_{x2}\cdot a_2 + I_{x3}\cdot a_3 + I_{x4}\cdot a_4 + I_{y1}\cdot A_1 + I_{y2}\cdot A_2 + I_{y3}\cdot A_3 + I_{y4}\cdot A_4)\}\cdot \quad .$$

$$\cdot\{(U_1\cdot v_1 + U_2\cdot v_2 + U_3\cdot v_3 + U_4\cdot v_4 + U_{q1}\cdot V_1 + U_{q2}\cdot V_2 + U_{q3}\cdot V_3 + U_{q4}\cdot V_4)\cdot \quad .$$

$$\cdot(I_1\cdot a_1 + I_2\cdot a_2 + I_3\cdot a_3 + I_4\cdot a_4 \}\Big\} = \qquad (б) \quad .$$

$$= \Big\{ \{ \quad (u_x,i_x) \quad + \quad (u_y,i_y) \quad \}\cdot(u_k,i_k) \quad + \qquad (в) \quad .$$

$$+ (\ U_{x1}\cdot I_{x1} – U_{x1}\cdot I_{x1} \quad + \quad U_{y1}\cdot I_{y1} – U_{y1}\cdot I_{y1} \ )\cdot(U_1\cdot I_1) + \qquad (г) \quad .$$

$$+ (\ U_{x1}\cdot I_{x1} – U_{x2}\cdot I_{x1} \quad + \quad U_{y1}\cdot I_{y2} – U_{y2}\cdot I_{y1} \ )\cdot(U_1\cdot I_2) + \quad .$$

$$+ (\ U_{x1}\cdot I_{x1} – U_{x3}\cdot I_{x1} \quad + \quad U_{y1}\cdot I_{y3} – U_{y3}\cdot I_{y1} \ )\cdot(U_1\cdot I_3) + \quad .$$

$$+ (\ U_{x2}\cdot I_{x1} – U_{x4}\cdot I_{x1} \quad + \quad U_{y2}\cdot I_{y4} – U_{y4}\cdot I_{y2} \ )\cdot(U_2\cdot I_4) + \quad .$$

$$+ (\ U_{x2}\cdot I_{x1} – U_{x1}\cdot I_{x2} \quad + \quad U_{y2}\cdot I_{y1} – U_{y1}\cdot I_{y2} \ )\cdot(U_2\cdot I_1) + \quad .$$

$$+ (\ U_{x2}\cdot I_{x2} – U_{x2}\cdot I_{x2} \quad + \quad U_{y2}\cdot I_{y2} – U_{y2}\cdot I_{y2} \ )\cdot(U_2\cdot I_2) + \quad .$$

$$+ (\ U_{x2}\cdot I_{x3} – U_{x3}\cdot I_{x2} \quad + \quad U_{y2}\cdot I_{y3} – U_{y3}\cdot I_{y2} \ )\cdot(U_2\cdot I_3) + \quad .$$

$$+ (\ U_{x2}\cdot I_{x4} – U_{x4}\cdot I_{x2} \quad + \quad U_{y2}\cdot I_{y4} – U_{y4}\cdot I_{y2} \ )\cdot(U_2\cdot I_4) + \quad .$$

$$+ (U_{x3}\cdot I_{x1} - U_{x1}\cdot I_{x3} \quad + \quad U_{y3}\cdot I_{y1} - U_{y1}\cdot I_{y3})\cdot(U_3\cdot I_1) + \quad .$$
$$+ (U_{x3}\cdot I_{x2} - U_{x2}\cdot I_{x3} \quad + \quad U_{y3}\cdot I_{y2} - U_{y2}\cdot I_{y3})\cdot(U_3\cdot I_2) + \quad .$$
$$+ (U_{x3}\cdot I_{x3} - U_{x3}\cdot I_{x3} \quad + \quad U_{y3}\cdot I_{y3} - U_{y3}\cdot I_{y3})\cdot(U_3\cdot I_3) + \quad .$$
$$+ (U_{x3}\cdot I_{x4} - U_{x4}\cdot I_{x3} \quad + \quad U_{y3}\cdot I_{y4} - U_{y4}\cdot I_{y3})\cdot(U_3\cdot I_4) + \quad .$$

$$+ (U_{x4}\cdot I_{x1} - U_{x1}\cdot I_{x4} \quad + \quad U_{y4}\cdot I_{y1} - U_{y1}\cdot I_{y4})\cdot(U_4\cdot I_1) + \quad .$$
$$+ (U_{x4}\cdot I_{x1} - U_{x2}\cdot I_{x4} \quad + \quad U_{y4}\cdot I_{y2} - U_{y2}\cdot I_{y4})\cdot(U_4\cdot I_2) + \quad .$$
$$+ (U_{x4}\cdot I_{x1} - U_{x3}\cdot I_{x4} \quad + \quad U_{y4}\cdot I_{y3} - U_{y3}\cdot I_{y4})\cdot(U_4\cdot I_3) + \quad .$$
$$+ (U_{x4}\cdot I_{x1} - U_{x4}\cdot I_{x4} \quad + \quad U_{y4}\cdot I_{y4} - U_{y4}\cdot I_{y4})\cdot(U_4\cdot I_4) + \quad .$$

$$- \{ (u_y,i_x) - (u_x,i_y) \} \qquad \cdot(u_q,i_k) \quad + \qquad \text{(д)} \quad .$$

$$+ (U_{y1}\cdot I_{x1} + U_{y1}\cdot I_{x1} \quad - \quad U_{x1}\cdot I_{y1} - U_{x1}\cdot I_{y1})\cdot(U_{q1}\cdot I_1) + \qquad \text{(е)} \quad .$$
$$+ (U_{y1}\cdot I_{x2} + U_{y2}\cdot I_{x1} \quad - \quad U_{x1}\cdot I_{y2} - U_{x2}\cdot I_{y1})\cdot(U_{q1}\cdot I_2) + \quad .$$
$$+ (U_{y1}\cdot I_{x3} + U_{y3}\cdot I_{x1} \quad - \quad U_{x1}\cdot I_{y3} - U_{x3}\cdot I_{y1})\cdot(U_{q1}\cdot I_3) + \quad .$$
$$+ (U_{y1}\cdot I_{x4} + U_{y4}\cdot I_{x1} \quad - \quad U_{x1}\cdot I_{y4} - U_{x4}\cdot I_{y1})\cdot(U_{q1}\cdot I_4) + \quad .$$

$$+ (U_{y2}\cdot I_{x1} + U_{y1}\cdot I_{x2} \quad - \quad U_{x2}\cdot I_{y1} - U_{x1}\cdot I_{y2})\cdot(U_{q2}\cdot I_1) + \quad .$$
$$+ (U_{y2}\cdot I_{x2} + U_{y2}\cdot I_{x2} \quad - \quad U_{x2}\cdot I_{y2} - U_{x2}\cdot I_{y2})\cdot(U_{q2}\cdot I_2) + \quad .$$
$$+ (U_{y2}\cdot I_{x3} + U_{y3}\cdot I_{x2} \quad - \quad U_{x2}\cdot I_{y3} - U_{x3}\cdot I_{y2})\cdot(U_{q2}\cdot I_3) + \quad .$$
$$+ (U_{y2}\cdot I_{x4} + U_{y4}\cdot I_{x2} \quad - \quad U_{x2}\cdot I_{y4} - U_{x4}\cdot I_{y2})\cdot(U_{q2}\cdot I_4) + \quad .$$

$$+ (U_{y3}\cdot I_{x1} + U_{y1}\cdot I_{x3} \quad - \quad U_{x3}\cdot I_{y1} - U_{x1}\cdot I_{y3})\cdot(U_{q3}\cdot I_1) + \quad .$$
$$+ (U_{y3}\cdot I_{x2} + U_{y2}\cdot I_{x3} \quad - \quad U_{x3}\cdot I_{y2} - U_{x2}\cdot I_{y3})\cdot(U_{q3}\cdot I_2) + \quad .$$
$$+ (U_{y3}\cdot I_{x3} + U_{y3}\cdot I_{x3} \quad - \quad U_{x3}\cdot I_{y3} - U_{x3}\cdot I_{y3})\cdot(U_{q3}\cdot I_3) + \quad .$$
$$+ (U_{y3}\cdot I_{x4} + U_{y4}\cdot I_{x3} \quad - \quad U_{x3}\cdot I_{y4} - U_{x4}\cdot I_{y3})\cdot(U_{q3}\cdot I_4) + \quad .$$

$$+ (U_{y4}\cdot I_{x1} + U_{y1}\cdot I_{x4} \quad - \quad U_{x4}\cdot I_{y1} - U_{x1}\cdot I_{y4})\cdot(U_{q4}\cdot I_1) + \quad .$$
$$+ (U_{y4}\cdot I_{x2} + U_{y2}\cdot I_{x4} \quad - \quad U_{x4}\cdot I_{y2} - U_{x2}\cdot I_{y4})\cdot(U_{q4}\cdot I_2) + \quad .$$
$$+ (U_{y4}\cdot I_{x3} + U_{y3}\cdot I_{x4} \quad - \quad U_{x4}\cdot I_{y3} - U_{x3}\cdot I_{y4})\cdot(U_{q4}\cdot I_3) + \quad .$$
$$+ (U_{y4}\cdot I_{x4} + U_{y4}\cdot I_{x4} \quad - \quad U_{x4}\cdot I_{y4} - U_{x4}\cdot I_{y4})\cdot(U_{q4}\cdot I_4) + \quad .$$

Для сокращения записей скалярные формы (15.14 в, д) не расписаны через ортогональные составляющие, а в векторных формах (г, е) не расставлены комплексные размерности, которые должны были заполнить пустые клетки таблиц 12, 13. Возникают проблемы с членами (15.14 д, е). Например, член $U_{q1}{\cdot}I_1$ (одинаковые формы в разных фазах) УЧАСТВУЕТ ОДНОВРЕМЕННО В СКАЛЯРНОМ (д) И ВЕКТОРНОМ (е) БАЛАНСАХ. Из-за этого надо вводить новые правила, например, произведение мнимых единиц порождает две новые единицы или они появляются в произведениях второго порядка. Должно же быть какое-то действие, порождающее дисбаланс (15.3). Неплохо получается если отдельно написать таблицы умножения для скалярного произведения с пустыми клетками и отдельно для векторного произведения с пустыми клетками то есть будет четыре таблицы а не две.

Векторное взаимодействие одинаковых форм появилось еще в более простом соотношении (5.11). С него надо и начинать. Здесь требуется качественно новый подход к комплексным числам в условиях гиперболического, а не тригонометрического баланса. Нужны свежие идеи! А может, в этом нет практической необходимости? Однако правильность формулы (15.14) подтверждена расчетами на ЭВМ, все ее четыре члена совпали с данными таблиц 14, 15.

Опять на этом можно было бы закончить теорию многофазного баланса через взаимодействия разноименных сигналов, но слишком уж непривычен предлагаемый гиперболический баланс.

16. КОНСТРУКТОР ТЕОРИЙ БАЛАНСИРУЕМЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Если признать неудачным опыт 4-х членного баланса предыдущей главы и нет свежих идей для логического поиска других решений, надо попытаться подобрать «приемлемую» формулу из больше, чем 4-х членов. Для подбора надо иметь набор формул из всевозможных сочетаний сигналов и знать значения балансов этих формул по всей цепи. Тогда человек сможет набирать различные формулы из этого «конструктора». Но прежде следует найти законы для построения «кубиков» конструктора, надо научиться конструировать сам конструктор.

16.1. Балансы с хвостовыми сигналами

Сперва надо решить, через какие сетевые сигналы должен быть выражен баланс, фазные U_A, I_A ... или линейные U_{AB}, I_{AB} ... и т.д. Далее следует нарисовать простейшую цепь из трех элементов с выбранными сигналами. По сути это или звезда, или треугольник из трех сопротивлений. Можно также рассмотреть цепь из двух элементов, включенных на линейное напряжение. Тогда результаты будут под известную схему двух ваттметров с меньшим числом членов, но сами формулы получатся не эстетичные. Например, баланс члена (u_k,i_k) по всем элементам цепи получается по этой методике

$$\sum(u_k,i_k) = (u_A,i_A) + (u_B,i_B) + (u_C,i_C) = P_S \tag{16.1}$$

сходится к мощности сети. Если надо найти баланс с хвостовыми сигналами, то сперва по формулам (12.10), (12.11) надо найти хвосты для элементов выбранной схемы. Например, выбрана схема звезда, тогда для элемента в фазе A, помятуя, что $[u_A,u_A] = 0$, $[u_C,u_A] = [u_A,u_B]$ и т.д.,

$$u_z(A) = (u_C - u_B)/3 = -u_{BC}/3; \qquad i_z(A) = (i_C - i_B)/3 = -i_{BC}. \tag{16.2}$$

Формулы для остальных элементов проще написать по законам симметрии. Например, баланс члена (u_z,i_k)

$$\sum(u_z,i_k) = -\{ (u_{BC},i_A) + (u_{CA},i_B) + (u_{AB},i_C) \}/3 \tag{16.3}$$

с точностью до другого знака и коэффициента сходится к формуле общепринятой схемы измерения реактивной мощности (11.6).

Аналогичные действия производятся с двухфазными формулами. Хвосты для простейшей двухфазной цепи из двух элементов из формул (11.9), (11.11), (11.13), (11.15)

$$u_q(x) = u_y; \qquad u_q(y) = -u_x; \qquad i_q(x) = i_y; \qquad i_q(y) = -i_x. \tag{16.4}$$

Например, найдем балансы по всей цепи членов

$$\begin{aligned} \sum(u_q,i_k) &= (u_y,i_x) + (-u_x,i_y) = -(u_x,i_y) + (u_y,i_x); && \text{(а)} \\ \sum(u_k,i_q) &= (u_x,i_y) + (u_y,-i_x) = (u_x,i_y) - (u_y,i_x); && \text{(б)} \\ \sum(u_k,i_k) &= (u_x,i_x) + (u_y,i_y). && \text{(в)} \end{aligned} \tag{16.5}$$

16.2. Балансы с коэффициентами приведения

Для каждого из фазных сопротивлений полезно знать коэффициенты, вычисленные по формулам (12.11 б) и собранные в таблицу 16. Эти коэффициенты увеличены в 3 раза и обозначены маленькой буквой k.

$$k_{Au} = [u_A,u_k]/[u_A,u_B] = 3\cdot K_{bu}; \qquad k_{Cu} = [u_B,u_k]/[u_A,u_B]. \tag{16.6}$$

Аналогично для двухфазных коэффициентов (11.9)

$$K_{xu} = [u_y,u_k]/[u_y,u_x]; \qquad K_{yu} = [u_x,u_k]/[u_x,u_y] \tag{16.7}$$

коэффициенты для фазных сопротивлений собраны в таблицу 17. Таблицы для токовых получаются по правилам симметрии записи.

Таблица 16

	k_{Au}	k_{Bu}	k_{Cu}
u_k=u_A	0	-1	1
u_k=u_B	1	0	-1
u_k=u_C	-1	1	0

Таблица 17

	k_{xu}	k_{yu}
u_k=u_x	1	0
u_k=u_y	0	1

Теперь из формулы (12.11) в новых коэффициентах (16.6)

$$u_z = \{\ k_{Au}\cdot u_A + k_{Bu}\cdot u_B + k_{Cu}\cdot u_C\ \}/3 \qquad .$$

можно вычислить z-хвост элемента с $u_k = u_A$, что совпадет с формулой (16.2).

Теперь некоторые балансы для двухфазной цепи

$$\sum K_{xu}\cdot(i_x,i_k) = I_x^2\ ; \qquad (а)$$
$$\sum K_{xu}\cdot(i_y,i_k) = (i_x,i_y); \qquad (б)$$
$$\sum K_{xu}\cdot(u_x,i_k) = (u_x,i_x) = P_x\ ; \qquad (в) \qquad (16.8)$$
$$\sum K_{xu}\cdot(u_y,i_k) = (u_y,i_x); \qquad (г)$$
$$\sum K_{xu}\cdot(i_x,u_k) = (u_x,i_x) = P_x\ . \qquad (д)$$

Некоторые балансы для трехфазной цепи

$$\sum k_{Au}\cdot(u_A,i_k) = (u_A,i_B) - (u_A,i_C) = -P_B + P_C - (u_C,i_B) + (u_B,i_C); \ (а)$$
$$\sum k_{Au}\cdot(i_A,i_k)\ = (i_A,i_B) - (i_A,i_C) = -I_B^2 + I_C^2\ . \qquad (б) \qquad (16.9)$$

Во всех указанных балансах круглые скобки () можно заменить на квадратные [] и двойные квадратные [[]], тогда получатся соотношения для векторного и извращенного векторного произведений. Но соотношения (16.9) подвергнуты алгебраическим преобразованиям, которые могут различаться для скалярных и векторных произведений. Так в (16.9 б) вместо квадрата $(i_B,i_B) = I_B^2$ должен был получиться $[i_B,i_B] = 0$ нуль. Но при подробных преобразованиях

$$\sum k_{Au}\cdot[i_A,i_k] = [i_A,i_B] - [i_A,i_C] = -[i_B,i_B] + [i_C,i_C] - \qquad (а) \qquad (16.10)$$
$$- [i_C,i_B] + [i_B,i_C] = 2\cdot[i_B,i_C] \qquad (б)$$

часть (б) не равна нулю, если это векторные произведения, и равна нулю, если это скалярные произведения.

16.3. Инвариантность формул почленного баланса

При ортогонализации Грама-Шмидта сигналов однофазной цепи рассматривались четыре сигнала и строилась классическая треугольная форма этих действий (4.6), отмечалось, что линейными преобразованиями затем можно перейти к эквивалентной прямоугольной форме с любым числом членов (4.10). У читателей должен был возникнуть вопрос, почему в анализе (4.6) для любого элементы участвуют всегда только 4 формы сигналов, когда всего их в цепи с большим числом элементов может быть гораздо больше. Дело в том, что в балансе участвуют только 1-я и 2-я формы сетевых сигналов, а 3-я и 4-я формы сигналов элементов получаются совершенно разными для каждого элемента, но они одинакого не участвуют в энергетическом балансе, кроме активного. То есть нас не интересовало, какие формы 3 и 4, лишь бы они были не 1 и 2 (но помнить про активный баланс). После линейных преобразований к форме (4.10) эта предельная ясность объяснений исчезала, но суть оставалась. Она проявлялась в том, что принятые формулы энергетического баланса были инвариантными (не зависящими от обстоятельств), ачто это за обстоятельства – надо разобраться.

В двухфазной цепи в основном балансе (не считая активного)участвуют уже 4 формы (11.16), но все проблемы понятия сути однофазного инвариантных преобразований остаются и добавляются новые многофазные.

Самой понятной формулой инвариантного энергетического преобразования сигналов является формула баланса активной мощности или скалярного произведения (u_k, i_k). Понятно, что она не зависит ни от чего и результат для форм (4.6) , (4.10) будет одинаковым. Это сложный, но уже привычный для нас случай. Надо рассмотреть и другие.

Из-за инвариантности принятых еще в ТОЭ наших первых в жизни правильных действий, например, определения реактивной мощности через две составляющие разложения Грама-Шмидта $Q = (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1)$ (4.19), не возникали мысли, а почему мы так делаем. Для понимания надо выполнить разложение Грама-Шмидта сразу для всех элементов цепи. На элементах надо сперва проставить стрелки условно положительных направлений и учитывать знаки коэффициентов разложения с учетом этих стрелок. В формах (4.6), (4.10) будет добавлено по две строчки на каждый элемент цепи, а в форме (11.6) - по три с учетом хвоста. После этого каждому номеру будет соответствовать только одна строго определенная форма сигналов. С учетом принятых положительных направлений для любых коэффициентов будут выполняться законы Кирхгофа и теорема Телледжена для баланса любых псевдомощностей. Если выбрать произвольные 1-ю и 2-ю формы сигналов, то должны выполняться четыре баланса (и по вышеописанному, и по Телледжену) для однофазной цепи и их всевозможные комбинации 4

$$U_{S1}\cdot I_{S1} = \sum U_1 \cdot I_1\,; \qquad (а) \qquad .$$
$$U_S^2\cdot I_S^2 = \sum U_2 \cdot I_2\,; \qquad (б) \qquad (16.11)$$
$$U_{S1}\cdot I_{S1} + U_{S2}\cdot I_{S2} = \sum (U_1 \cdot I_1 + U_2\cdot I_2). \qquad (в) \qquad .$$
$$U_{S1}\cdot I_{S2} = \sum U_1 \cdot I_2; \qquad (а) \qquad .$$
$$U_{S2}\cdot I_{S1} = \sum U_2 \cdot I_1; \qquad (б) \qquad (16.12)$$
$$U_{S1}\cdot I_{S2} - U_{S2}\cdot I_{S1} = \sum (U_1 \cdot I_2 - U_2\cdot I_1). \qquad (в) \qquad .$$

Здесь и далее запись суммирования сигналов k–го элемента, например, $U_{1k}\cdot I_{1k}$ по всем элементам цепи упрощена до вида $U_1\cdot I_1$. Балансы (в) известны из курса ТОЭ. Балансы (а), (б) для студента новы, хотя ОНИ ЯВЛЯЮТСЯ ИСХОДНЫМИ при излагаемом подходе, а известные балансы (в) являются одними из возможных комбинаций. Так будет выполняться баланс и для странной комбинации $U_1\cdot I_1 + U_1\cdot I_2$, и для других возможных.

Для двухфазной цепи возможности гораздо больше, но приведены только два варианта и их комбинация

$$U_{x1}\cdot I_{x2} + U_{y1}\cdot I_{y2} = \sum U_1 \cdot I_2\,; \qquad (а) \qquad .$$
$$U_{x2}\cdot I_{x1} + U_{y2}\cdot I_{y1} = \sum U_2 \cdot I_1\,; \qquad (б) \qquad (16.13)$$
$$U_{x1}\cdot I_{x2} - U_{x2}\cdot I_{x1} + U_{y1}\cdot I_{y2} - U_{y2}\cdot I_{y1} = \sum (U_1\, I_2 - U_2\cdot I_1\,). \qquad (в) \qquad .$$

Формулы двухфазного приведения элемента к сети получены схемами (рис. 23). На схеме (рис. 23 а) слева вверху квадратиком показана схема (рис. 22 б), которая осуществляет преобразование от трехфазной сети к двухфазной. Это преобразование можно осуществить с другим перераспределением или «поворотом фаз», тогда все значение в (16.13) станут другими. Другие U_{x1}, I_{x2}, U_{y1}, I_{y2}, U_1, I_2, $U_{x1}\cdot I_{x2}$, сумма $U_1\cdot I_2$, то есть другим станет все уравнение баланса (16.13 а), хотя новые значения слева и справа будут равны. То же станет с балансом (б), но левые и правые значения в балансе (в) останутся прежними (инвариантными к «углу поворота»), хотя будут получены из других значений. Здесь будут употребляться термины угол и фаза в смысле коэффициентов перераспределения (10.30), но не сдвига и реального поворота. В этих терминах преобразования (16.13 в) можно назвать ФАЗОНЕЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ.

Далее этот термин можно распространить и на преобразования (16.11 в), (16.12 в) для однофазных цепей. Для последних сложно придумать реальные фазоповоротные действия двухфазных сетей, хотя на бумаге может быть применен однофазный комплексный трансформатор из главы 9. Свойство фазонечувствительности преобразований (в) проявилось и в совпадении результатов относительной (3.17) и абсолютной (3.18) ортогонализации сигналов. Там проявляется такая инвариантность преобразований (в), видна неинвариантность преобразований (а) т (б), но действия трудно сопоставить с каким-то поворотом.

После всего у читателей может возникнуть вопрос, зачем автор вводит сложный термин «фазонечувствительный», когда уже есть принятый термин «инвариантный»? Этот термин здесь вводится для классификации внутри инвариантных преобразований. Тогда требуется описание другого «класса» этих преобразований.

Пусть после полной ортогонализации Грама-Шмидта всех сигналов однофазной цепи произведены линейные преобразования и получено много ортов во всех сигналах, что описывается формой (4.10), у которой еще очень много строчек для всех элементных сигналов. Для простоты это могут быть члены бесконечных рядов Фурье, нечетные номера – синусные составляющие, четные – косинусные. Тогда «реактивным преобразованиям К.А.Круга» (4.41б) соответствует формула

$$Q_{\text{Кр}} = (U_{S1}\cdot I_{S2} - U_{S2}\cdot I_{S1}) + (U_{S3}\cdot I_{S4} - U_{S4}\cdot I_{S3}) + ...= \\ = \sum\{ (U_1\cdot I_2 - U_2\cdot I_1) + (U_3\cdot I_4 - U_4\cdot I_3) + ...\}, \qquad (16.14)$$

а похожим преобразованиям Лохова (4.16) формула

$$Q_S^2 = \sum\{ (U_{S1}\cdot I_{S2} - U_{S2}\cdot I_{S1})\cdot(U_1\cdot I_2 - U_2\cdot I_1) + \\ + (U_{S1}\cdot I_{S3} - U_{S3}\cdot I_{S1})\cdot(U_1\cdot I_3 - U_3\cdot I_1) + \\ + (U_{S2}\cdot I_{S3} - U_{S3}\cdot I_{S2})\cdot(U_2\cdot I_3 - U_3\cdot I_2) + ...\}. \qquad (16.15)$$

Выполняемость баланса (16.14) следует из формул (16.12), его фазонечувствительность – из фазонечувствительности каждого члена (16.12 в). Но, если при тех же сигналах произвести их новое разложение, например, в минимальную форму Грама-Шмидта, то сумма баланса сразу же станет другой. То есть форма (16.14) РАСКЛАДОЧУВСТВИТЕЛЬНА. Уже доказано, что форма (16.15) всегда имеет один и тот же скалярно выражаемый результат

$$Q_S^2 = \sum[u_S,i_S][u_k,i_k] = [u_S,i_S][u_S,i_S] = U_S^2 \cdot I_S^2 - P_S^2\,, \qquad (16.16)$$

Поэтому она фазонечувствительна и РАСКЛАДОНЕЧУВСТВИТЕЛЬНА. Да простят автора читатели за такие сложные термины, но трудно подобрать другие! Только формы обладающими обоими качествами можно называть ИНВАРИАНТНЫМИ. Только на инвариантных формах можно строить составляющие формулы универсального баланса (4.11), включая гиперболические члены (15.2 а), (15.4 а). Все известные автору инвариантные формы в конечном итоге могут быть выражены через скалярные произведения, но не доказано, что это правило.

В многофазных цепях в канал передачи многофазной энергии может быть включен произвольный фазоперераспределительный трансформатор. Его параметры не должны влиять на результаты, расчетные формулы всей ответственности элемента цепи и ее составляющих должны быть инвариантны к наличию такого трансформатора, это требование фазонечувствительности.

Если воспользоваться формулами двухфазно-двухфазных преобразований (10.30), (10.33), то получится только две возможные инвариант ные линейные комбинации сетевых энергетических сигналов до и после трансформатора

$$u_d,i_d + u_q,i_q = u_x,i_x + u_y,i_y = \text{const}; \ \text{(a)} \qquad (16.17)$$
$$u_d,i_q - u_q,i_d = u_x,i_y - u_y,i_x = \text{const}. \ \text{(б)} \qquad .$$

Здесь буквой q обозначен вывод обмотки трансформатора (рис. 23),который только в частном случае совпадает с рассматриваемыми в главе хвостами сигналов элемента цепи. Формула (16.17) понимается шире, чем написана, например, ее члены могут быть взяты во все три варианта скобок (), [], [[]], на места членов могут быть поставлены отдельные составляющие ортогонального разложения. Если теперь вспомнить формулы почленного баланса (16.5), то окажется, что фазонечувствительны только 6 вариантов балансируемых раздельно по всей двухфазной цепи членов (здесь Ia – вариант 1a римскими цифрами)

$$\begin{aligned}
&\text{Ia} = \{ (u_x,i_x) + (u_y,i_y) \}\cdot\{ (u_k,i_k) \};\\
&\text{Ib} = \{ [u_x,i_x] + [u_y,i_y] \}\cdot\{ [u_k,i_k] \};\\
&\text{Ic} = \{[[u_x,i_x]] + [[u_y,i_y]]\}\cdot\{ [[u_k,i_k]] \}; \qquad (16.18)\\
&\text{IIa} = \{ (u_y,i_x) - (u_x,i_y) \}\cdot\{D_u\cdot(u_q,i_k) - D_i\cdot(u_k,i_q) \};\\
&\text{IIb} = \{ [u_y,i_x] - [u_x,i_y] \}\cdot\{D_u\cdot[u_q,i_k] - D_i\cdot[u_k,i_q] \};\\
&\text{IIc} = \{[[u_y,i_x]] - [[u_x,i_y]]\}\cdot\{D_u\cdot[[u_q,i_k]] - D_i\cdot[[u_k,i_q]]\}.
\end{aligned}$$

Записи допускают более широкую формулировку: суммы правых сомножителей по всей цепи равны левым сомножителям. Это же верно отдельно для сомножителей долевых коэффициентов D_u, D_i. Формулу (15.2) можно переписать в нумерации (16.18)

$$S_{Sk}^2 = (15.2) = \mathrm{Ia} + \mathrm{Ib} - \mathrm{IIa} + \mathrm{IIc}. \qquad (16.19)$$

Аналогичные формулы могут быть получены для балансов одноименных сигналов типа (16.10).

16.4. Синтез формул балансируемых энергетических составляющих

Синтезируемая формула должна балансироваться к выбранной формуле полной мощности, совпадать по форме с генеральной формулой (4.11) и состоят из инвариантных членов. Здесь рассматривается только синтез формул на основании взаимодействий разноименных сигналов. Синтез должен касаться только второй части формулы (4.11) $-X_S{\cdot}X_k$ + ..., поскольку первую можно считать принятой внутри данного пособия. Критерием истины должна быть и красота, и сходимость к каким-то ранее принятым значениям. В данном случае считается, что формула баланса через одноименные взаимодействия (12.2), (12.9), (12.13) нами принята и результаты баланса должны совпадать с данными таблицы 15, где надо иначе разложить значения $-X_S{\cdot}X_k + Y_S{\cdot}Y_k$.

Казалось бы, что при такой постановке все возможности (16.18) уже выбраны формулами (15.2), (16.19) и нет уже свободы для перебора вариантов. Однако это не так. В параграфе 16.2 приведен малый перечень формул балансов членов, которые раскладонечувствительны, так как выражаются через скалярные произведения, но фазочувствительны. Но имеются возможности сочетания этих членов до получения фазонечувствительной (инвариантной) комбинации. После этого надо проверить, насколько баланс новой комбинации может быть полезен в формуле полной мощности. Это типичное построение здания из кубиков методом перебора. После получения из кубиков готовой формулы надо провести расчет конкретной схемы и сопоставить результаты с таблицей 15. При несовпадении продолжить перебор. Перебор надо обязательно вести в двухфазном и трехфазном вариантах, так как эстетика восприятия одинаковых по результатам формул сильно различается. Также работает любой алгебраист. Нужно иметь ЭВМ с программами расчета всех сигналов конкретной схемы, перераспределения сетевых сигналов трансформаторами, процедурой Грама-Шмидта с вариантами ортогонализации, начиная с u_x или u_y, или i_x, или и т.д. Это избавляет человека от рутинной работы.

При наличии ЭВМ с удобными программами можно на конкретном примере убедиться в балансируемости вариантов (а), (б) формул (16.11), (16.12), (16.13) и найти фазонечувствительные комбинации (в) быстрее их доказательства. Это не научно?! Однако такая программа сразу же отбросила бы вариант (16.14) как раскладочувствительный. И не были бы созданы в довоенные годы и существуют сейчас целые научные школы, признающие линейный баланс реактивных мощностей разных гармоник. Это было сделано научно, то есть без перебора вариантов на ЭВМ! Все предложенные в этой части формулы многофазного баланса не могли бы быть созданы без создания множества таблиц на ЭВМ, и всегда перебор опережал научную теорию!

16.5. Лучшая формула после перебора вариантов

Наиболее эстетичным оказался трехфазный вариант написания формулы (16.20) через коэффициенты (16.6) с балансом (16.21)

$$
\begin{aligned}
S_{Sk}^2 = {} & \{ P_A + P_B + P_C \}\cdot (u_k,i_k) + && \text{(а)} \\
& + \{ Q_A + Q_B + Q_C \}\cdot [u_k,I_k] + && \text{(б)} \qquad (16.20) \\
& + (P_C - P_B) \cdot\{ D_u\cdot(u_A,i_k)\cdot k_{Au} + D_i\cdot(i_A,u_k)\cdot k_{Ai} \} + \\
& + (P_A - P_C) \cdot\{ D_u\cdot(u_B,i_k)\cdot k_{Bu} + D_i\cdot(i_B,u_k)\cdot k_{Bi} \} + && \text{(в)} \\
& + (P_B - P_A) \cdot\{ D_u\cdot(u_C,i_k)\cdot k_{Cu} + D_i\cdot(i_C,u_k)\cdot k_{Ci} \} + \\
& + (Q_C - Q_B) \cdot\{ D_u\cdot[u_A,i_k]\cdot k_{Au} + D_i\cdot[i_A,u_k]\cdot k_{Ai} \} + \\
& + (Q_A - Q_C) \cdot\{ D_u\cdot[u_B,i_k]\cdot k_{Bu} + D_i\cdot[i_B,u_k]\cdot k_{Bi} \} + && \text{(г)} \\
& + (Q_B - Q_A) \cdot\{ D_u\cdot[u_C,i_k]\cdot k_{Cu} + D_i\cdot[i_C,u_k]\cdot k_{Ci} \} + \\
& + D_u\cdot(U_C^2 - U_B^2)\cdot(i_A,i_k)\cdot k_{Au} + D_i\cdot(I_C^2 - I_B^2)\cdot(u_A,u_k)\cdot k_{Ai} + \\
& + D_u\cdot(U_A^2 - U_C^2)\cdot(i_B,i_k)\cdot k_{Bu} + D_i\cdot(I_A^2 - I_C^2)\cdot(u_B,u_k)\cdot k_{Bi} + && \text{(д)} \\
& + D_u\cdot(U_B^2 - U_A^2)\cdot(i_C,i_k)\cdot k_{Cu} + D_i\cdot(I_B^2 - I_A^2)\cdot(u_C,u_k)\cdot k_{Ci} ;
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
S_S^2 = {} & (P_A + P_B + P_C)^2 + && \text{(а)} \\
& + (Q_A + Q_B + Q_C)^2 + && \text{(б)} \qquad (16.21) \\
& + (P_C - P_B)^2 + (P_A - P_C)^2 + (P_B - P_A)^2 + && \text{(в)} \\
& + (Q_C - Q_B)^2 + (Q_A - Q_C)^2 + (Q_B - Q_A)^2 + && \text{(г)} \\
& - (U_C^2 - U_B^2)(I_C^2 - I_B^2) - (U_A^2 - U_C^2)(I_A^2 - I_C^2) - (U_B^2 - U_A^2)(I_B^2 - I_A^2). && \text{(д)}
\end{aligned}
$$

Здесь $Q_A = [u_A,i_A]$ – более эстетичная форма записи векторного произведения. В общем балансе «выпадает из эстетики» член (д), так как он представляет собой член с взаимодействием одноименных сигналов. Формула (16.21) дает нам советы, что для уменьшения полной мощности надо уменьшать реактивную мощность (б), поддерживать симметрию активных и реактивных мощностей (в, г), а что делать с членом (д) – не совсем ясно.

Полностью эквивалентная ей двухфазная формула с коэффициентами (16.7) и балансом (16.23) имеет вид

$$
\begin{aligned}
S_{Sk}^2 = &\{ (u_x,i_x) + (u_y,i_y) \}\cdot(uk,i_k) + && \text{(а)}\\
+ &\{ [u_x,i_x] + [u_y,i_y] \}\cdot[u_k,i_k] + && \text{(б)} \quad (16.22)\\
+ &0.5\cdot\{(u_x,i_x)-(u_y,i_y)\}\cdot\{D_u\cdot\{(u_x,i_k)\cdot K_{xu}-(u_y,i_k)\cdot K_{yu}\} + D_i\cdot\{(i_x,u_k)\cdot K_{xi}-(i_y,u_k)\cdot K_{yi}\}\}+ && \text{(в)}\\
+ &0.5\cdot\{(u_x,i_y)+(u_y,i_x)\}\cdot\{D_u\cdot\{(u_y,i_k)\cdot K_{xu}+(u_x,i_k)\cdot K_{yu}\} + D_i\cdot\{(i_y,u_k)\cdot K_{xi}+(i_x,u_k)\cdot K_{yi}\}\}+ &&\\
+ &0.5\cdot\{[u_x,i_x]-[u_y,i_y]\}\cdot\{D_u\cdot\{[u_x,i_k]\cdot K_{xu}-[u_y,i_k]\cdot K_{yu}\} + D_i\cdot\{[i_x,u_k]\cdot K_{xi} -[i_y,u_k]\cdot K_{yi}\}\}+ && \text{(г)}\\
+ &0.5\cdot\{[u_x,i_y]+[u_y,i_x]\}\cdot\{D_u\cdot\{[u_y,i_k]\cdot K_{xu}+[u_x,i_k]\cdot K_{yu}\} + D_i\cdot\{[i_y,u_k]\cdot K_{xi}+[i_x,u_k]\cdot K_{yi}\}\}+ &&\\
+ &0.5\cdot D_u\cdot\{(U_x^2-U_y^2)\cdot\{-(i_x,i_k)\cdot K_{xu} +(i_y,i_k)\cdot K_{yu} \} +(u_x,u_y)\cdot\{-(i_y,i_k)\cdot K_{xu} -(i_x,i_k)\cdot K_{yu}\}\}+ && \text{(д)}\\
+ &0.5\cdot D_i \cdot\{ (I_x^2-I_y^2) \cdot\{-(u_x,u_k)\cdot K_{xi}+(u_y,u_k)\cdot K_{yi} \}+ (i_x,i_y) \cdot\{-(u_y,u_k)\cdot K_{xi}-(u_x,u_k)\cdot K_{yi}\}\};
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
S_S^2 = &(P_x + P_y)^2 + && \text{(а)}\\
&+ (Q_x + Q_y)^2 + && \text{(б)} \quad (16.23)\\
&+ 0.5\cdot\{(u_x,i_x) - (u_y,i_y)\}^2 + 0.5\cdot\{(u_x,i_y) + (u_y,i_x)\}^2 + && \text{(в)}\\
&+ 0.5\cdot\{[u_x,i_x] - [u_y,i_y]\}^2 + 0.5\cdot\{[u_x,i_y] + [u_y,i_x]\}^2 + && \text{(г)}\\
&-0.5\cdot(U_x^2 - U_y^2)\cdot(I_x^2 - I_y^2) - 2\cdot(u_x,u_y)\cdot(i_x,i_y). && \text{(д)}
\end{aligned}
$$

Трудно поверить, что формулы (16.21), (16.23) – одно и тоже по всем пяти членам. Поэтому и была дана рекомендация, что при переборе вариантов вести параллельно трех- и двухфазные ветви. В (16.23) интересно то, что каждый из левых и каждый из правых членов в (в), (г), (д) фазочувствителен, но каждая пара членов (в), (г), (д) фазонечувствительна.

Расчеты только для членов (в), (г), (д) по формуле (16.20) для напряженческого, токового и общего подходов даны в трех таблицах. Расчеты членов (а) и (б) сделаны ранее в таблице 15. Там же можно найти расчет члена $Y_S \cdot Y_k - X_S \cdot X_k$ для общего подходов, его значения полностью совпали с колонкой «Сумма» в таблице 20, а общую сумму 90390 можно найти во всех таблицах. Ради справедливого перераспределения значений этого члена и подбиралась формула.

Формула (16.20) при D_u=1, D_i=0. Таблица 18

	(в)	(г)	(д)	Сумма
Z_0	5378	4653	-2081	7950
Z_1	-3353	11198	3179	11023
Z_2	2728	3294	755	6776
Z_3	5544	42344	916	48804
Z_4	5192	16046	-5401	15837
Сумма	15488	77534	-2632	90390

Формула (16.20) при D_u=0, D_i=1. Таблица 19

	(в)	(г)	(д)	Сумма
Z_0	4734	9855	966	15555
Z_1	731	15708	7247	23686
Z_2	7555	15738	19176	42469
Z_3	-610	23988	-17726	5651
Z_4	3078	12244	-12294	3028
Сумма	15488	77534	-2632	90390

Формула (16.20). Таблица 20

	(в)	(г)	(д)	Сумма
Z_0	5148	6513	-991	10670
Z_1	-1893	12811	4634	15552
Z_2	4454	7745	7344	19542
Z_3	3343	35779	-5752	33370
Z_4	4436	14686	-7866	11256
Сумма	15488	77534	-2632	90390

16.6. Жертвуем формулой полной мощности ради красоты

Интересно проверить, как формула окончательного баланса (16.21) сойдется к принятой формуле полной мощности (8.20). Для преобразований надо напомнить только одно соотношение

$$P_A^2 + Q_A^2 = U_A^2 \cdot I_A^2 \qquad (16.24)$$

и далее для остальных фаз. Само преобразование:

$$\begin{aligned}
S_S^2 = {} & P_A^2 + P_B^2 + P_C^2 + 2\cdot\{P_A\cdot P_B + P_B\cdot P_C + P_C\cdot P_A\} + && \text{(а)}\\
& + Q_A^2 + Q_B^2 + Q_C^2 + 2\cdot\{Q_A\cdot Q_B + Q_B\cdot Q_C + Q_C\cdot Q_A\} + && \text{(б)}\\
& + 2\cdot\{P_A^2 + P_B^2 + P_C^2\} - 2\cdot\{P_A\cdot P_B + P_B\cdot P_C + P_C\cdot P_A\} + && \text{(в)}\\
& + 2\cdot\{Q_A^2 + Q_B^2 + Q_C^2\} - 2\cdot\{Q_A\cdot Q_B + Q_B\cdot Q_C + Q_C\cdot Q_A\} - && \text{(г) (16.25)}\\
& - (U_C^2 - U_B^2)(I_C^2 - I_B^2) - (U_A^2 - U_C^2)(I_A^2 - I_C^2) - (U_B^2 - U_A^2)(I_B^2 - I_A^2) = && \text{(д)}\\
& = 3\cdot\{U_A^2\cdot I_A^2 + U_B^2\cdot I_B^2 + U_C^2\cdot I_C^2\} + && \text{(а-г)}\\
& - 2\cdot\{U_A^2\cdot I_A^2 + U_B^2\cdot I_B^2 + U_C^2\cdot I_C^2\} + && \text{(д)}\\
& + U_A^2\cdot I_B^2 + U_B^2\cdot I_C^2 + U_C^2\cdot I_A^2 + U_A^2\cdot I_C^2 + U_B^2\cdot I_A^2 + U_C^2\cdot I_B^2 = &&\\
& = (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)\cdot(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2). &&
\end{aligned}$$

Тождественность формул (16.21) и (8.20) доказана. Но! В промежутке получена строчка (16.25 а-г) формулы (16.21) без члена (д), который уже доставил нам эстетические неприятности. Эта строчка совпадает с одним из определений полной мощности (8.32). Остается пожертвовать формулой полной мощности (8.20), вспомнить, что были проблемы с ее обоснованием и принять формулу (8.32). У последней формулы было меньше проблем с обоснованием. Она не является общепринятой, более того, автор не помнит чужих публикаций с ней, но формулы баланса к ней (16.20), (16.21) без строчки (д) выглядят прекрасно! Строчки (а) и (б) можно считать принятыми внутри пособия, строчки (в) и (г) требуют одинаковой загрузки фаз активной и реактивной мощностью, кто против этого выступит? Да и форма соответствует генеральной формуле (4.11) [53].

17. ОБОБЩЕННЫЙ КОМПЕНСАТОР В ТРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ

17.1. Три режима работы трехпроводного компенсатора

В главе 8 доказательства сводились к определениям оптимальных для трансформатора токов (от трансформатора), а потом невязок, которые можно скомпенсировать. Как это сделать, оставалось вне решения задачи. В этой главе задача решается от компенсатора, что и при каких технических ограничениях можно скомпенсировать (рис. 29) [55].

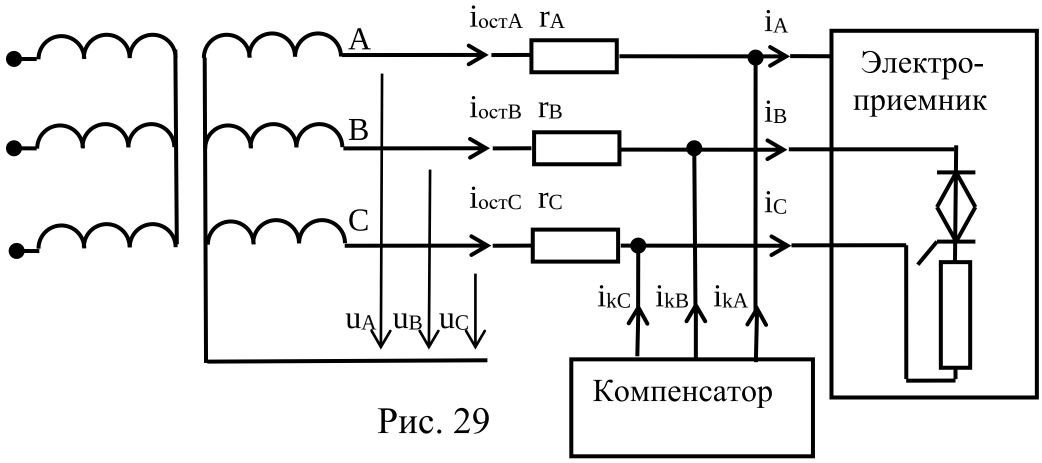


Рис. 29

Ограничимся случаем равных сетевых сопротивлений, когда полная мощность определяется формулой (8.20). Тогда решение задачи сведется к минимизации действующих значений остаточных после компенсации токов (17.1) или функционала (17.3). Связи типа (17.1), (17.2) называются конечными.

$$i_{\text{ост}A} = i_A - i_{kA}\ ; \qquad i_{\text{ост}B} = i_B - i_{kB}\ ; \qquad i_{\text{ост}C} = i_C - i_{kC}\ ; \tag{17.1}$$

$$i_A + i_B + i_C = 0; \qquad\qquad i_{kA} + i_{kB} + i_{kC} = 0; \tag{17.2}$$

$$J = \frac{1}{T}\int_0^T \{\, i_{\text{ост}A}^2 + i_{\text{ост}B}^2 + i_{\text{ост}C}^2 \,\}dt = \min. \tag{17.3}$$

Идеальный компенсатор не потребляет энергии за период и он может быть выполнен в трех энергетических вариантах, которым соответствуют разные дополнительные связи. Эти варианты пронумерованы римскими цифрами.

I. Внутри периода возможны накопление и возврат энергии (есть общий накопитель) и возможен обмен энергией между фазами, что выражается в одном интегральном уравнении изопериметрической связи (не считая вышеупомянутых конечных связей)

$$P_k = \frac{1}{T}\int_0^T \{u_A \cdot i_{kA} + u_B \cdot i_{kB} + u_C \cdot i_{kC}\}dt = 0. \qquad (17.4)$$

Вспомогательная функция при этом имеет вид (17.5) с одной неопределенной константой и одной неопределенной функцией времени /3], дифференцирование которой дает систему уравнений (17.6), а решение системы совместно с уравнениями конечных связей имеет вид (17.7).

$$F^* = (i_A - i_{kA})^2 + (i_B - i_{kB})^2 + (i_C - i_{kC})^2 + \qquad (17.5)$$
$$+ \lambda_1 \cdot (u_A \cdot i_{kA} + u_B \cdot i_{kB} + u_C \cdot i_{kC}) + \lambda_2(t) \cdot (i_{kA} + i_{kB} + i_{kC});$$

$$\frac{dF^*}{di_{kA}} = -2 \cdot (i_A - i_{kA}) + \lambda_1 \cdot u_A + \lambda_2(\mathrm{t}) = 0\ ;$$
$$\frac{dF^*}{di_{kB}} = -2 \cdot (i_B - i_{kB}) + \lambda_1 \cdot u_B + \lambda_2(\mathrm{t}) = 0\ ; \qquad (17.6)$$
$$\frac{dF^*}{di_{kC}} = -2 \cdot (i_C - i_{kC}) + \lambda_1 \cdot u_C + \lambda_2(\mathrm{t}) = 0\ ;$$

$$i_{\text{ост}A} = \lambda_1 \cdot u_A/2; \qquad i_{\text{ост}B} = \lambda_1 \cdot u_B/2; \qquad i_{\text{ост}C} = \lambda_1 \cdot u_C/2. \qquad (17.7)$$

Неопределенная функция получается нулевой. Подстановка вида решения (17.7) в уравнение общей мощности (8.9) дает неопределенную константу, значение остаточных токов, которые совпадают с ранее найденными активными токами (8.16 б) при равных сопротивлениях, что и ожидалось, и значение функционала (17.3) для первого варианта

$$\frac{\lambda_1}{2} = \frac{P}{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}; \qquad J_{1\min} = \frac{P^2}{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}. \qquad (17.8)$$

II. Внутри периода возможно накопление энергии, но невозможен ее междуфазный обмен (есть накопители по одному в каждой фазе), что приводит к трем изопериметрическим уравнениям связи

$$P_{kA} = \frac{1}{T}\int_0^T u_A \cdot i_{kA}\, dt = 0; \qquad P_{kB} = \frac{1}{T}\int_0^T u_B \cdot i_{kB}\, dt = 0; \qquad P_{kC} = \frac{1}{T}\int_0^T u_C \cdot i_{kC}\, dt = 0. \qquad (17.9)$$

Далее по аналогии с предыдущим вариантом, но с тремя неопределенными константами:

$$F^* = (i_A - i_{kA})^2 + (i_B - i_{kB})^2 + (i_C - i_{kC})^2 + \qquad (17.10)$$
$$+ \lambda_A \cdot u_A \cdot i_{kA} + \lambda_B \cdot u_B \cdot i_{kB} + \lambda_C \cdot u_C \cdot i_{kC} + \lambda_2(\mathrm{t}) \cdot (i_{kA} + i_{kB} + i_{kC});$$

$$\frac{dF^*}{di_{kA}} = -2 \cdot (i_A - i_{kA}) + \lambda_A \cdot u_A + \lambda_2(\mathrm{t}) = 0 \ ;$$
$$\frac{dF^*}{di_{kB}} = -2 \cdot (i_B - i_{kB}) + \lambda_B \cdot u_B + \lambda_2(\mathrm{t}) = 0 \ ; \qquad (17.11)$$
$$\frac{dF^*}{di_{kC}} = -2 \cdot (i_C - i_{kC}) + \lambda_C \cdot u_C + \lambda_2(\mathrm{t}) = 0 \ .$$

Решение системы с уравнением конечной связи (17.2) имеет простой вид:

$$\lambda_2(\mathrm{t}) = -(\lambda_A \cdot \mathrm{u_A} + \lambda_B \cdot \mathrm{u_B} + \lambda_C \cdot \mathrm{u_C})/3; \qquad (17.12)$$

$$i_{\text{ост}A} = + \lambda_A \cdot u_A/3 - \lambda_B \cdot u_B/6 - \lambda_C \cdot u_C/6;$$
$$i_{\text{ост}B} = - \lambda_A \cdot u_A/6 + \lambda_B \cdot u_B/3 - \lambda_C \cdot u_C/6; \qquad (17.13)$$
$$i_{\text{ост}C} = - \lambda_A \cdot u_A/6 - \lambda_B \cdot u_B/6 + \lambda_C \cdot u_C/3;$$

но нахождение постоянных коэффициентов представляет определенные трудности. Пусть фазные мощности известны и, например, для фазы A выражаются не только через ток фазы i_A, но и из-за связей (17.9) через $i_{\text{ост}A}$

$$P_A = \frac{1}{T}\int_0^T u_A \cdot iA \, dt = \frac{1}{T}\int_0^T u_A \cdot i_{\text{ост}A} \, dt. \qquad (17.14)$$

Подстановка в формулы для мощностей значений из системы (17.13) приводит к системе уравнений с интегральными значениями

$$3 \cdot P_A = + \lambda_A \cdot U_A^2 - \lambda_B \cdot (u_A, u_B)/2 - \lambda_C \cdot (u_C, u_A)/2;$$
$$3 \cdot P_B = - \lambda_A \cdot (u_A, u_B)/2 + \lambda_B \cdot U_B^2 - \lambda_C \cdot (u_B, u_C)/2; \qquad (17.15)$$
$$3 \cdot P_C = - \lambda_A \cdot (u_C, u_A)/2 - \lambda_B \cdot (u_B, u_C)/2 + \lambda_C \cdot U_C^2 \ .$$

Определитель системы и значение неопределенного множителя λ_A с учетом формул трехпроводных связей параграфа 8.1

$$D = U_A^2 \cdot U_B^2 \cdot U_C^2 - \{ (u_A, u_B) \cdot (u_B, u_C) \cdot (u_C, u_A) + \qquad (17.16)$$
$$+ U_A^2 \cdot (u_B, u_C)^2 + U_B^2 \cdot (u_C, u_A)^2 + U_C^2 \cdot (u_A, u_B)^2 \}/4 =$$
$$= -3 \cdot U_S^2 \cdot \{ U_A^2 \cdot (u_B, u_C) + U_B^2 \cdot (u_C, u_A) + U_C^2 \cdot (u_A, u_B) \}/16,$$

где $U_S^2 = U_A^2 + U_B^2 + U_C^2$. (17.17)

Теперь $\lambda_A = 1.5\cdot\{+2\cdot P_A\cdot[U_B^2\cdot U_C^2 \quad - (u_B,u_C)^2/2 \quad] +$ (17.18)

$+ P_B\cdot[U_C^2\cdot(u_A,u_B) + (u_B,u_C)\cdot(u_C,u_A)/2] +$

$+ P_C\cdot[U_B^2\cdot(u_C,u_A) + (u_B,u_C)\cdot(u_A,u_B)/2]\ \}/D.$

Формулы для остальных множителей получаются из (17.18) по правилам симметрии записи.

Полученные формулы носят общий характер, но из-за сложности плохо воспринимаются. Можно рассмотреть частный случай равных действующих значений (уже говорилось, что это еще не означает полную сдвиговую симметрию их форм). Тогда после подстановки значений неопределенных множителей в (17.13) получаются формулы для мгновенных остаточных, а затем и среднеквадратичных токов (17.19) для фазы А и значение функционала (17.3). Для остальных фаз формулы записываются по правилам симметрии.

$$i_{\text{ост}A} = [3\cdot P_A\cdot u_A - (P_B - P_C)\cdot u_{BC}]/U_S^2\ ; \quad (а) \qquad (17.19)$$

$$I_{\text{ост}A}^2 = [3\cdot P_A^2 + (P_B - P_C)^2]/U_S^2\ . \qquad (б)$$

$$J_{2\min} = J_{1\min} + 2\cdot\{(P_A - P_B)^2 + (P_B - P_C)^2 + (P_C - P_A)^2\}/U_S^2\ . \qquad (17.20)$$

При равных фазных мощностях формулы совпадают с формулами варианта I. На (рис. 30) диаграммы остаточных токов построены по формулам (17.19 а).

III. Накопление энергии невозможно, но возможен ее междуфазный обмен. Это проявляется в уравнении конечной связи для общей мгновенной мощности:

$$p_k = u_A\cdot i_{kA} + u_B\cdot i_{kB} + u_C\cdot i_{kC} = 0. \qquad (17.21)$$

Далее по аналогии с предыдущими вариантами, но с двумя неопределенными функциями:

$$F^* = (i_A - i_{kA})^2 + (i_B - i_{kB})^2 + (i_C - i_{kC})^2 + \qquad (17.22)$$

$$+ \lambda_1(t)\cdot(u_A\cdot i_{kA} + u_B\cdot i_{kB} + u_C\cdot i_{kC}) + \lambda_2(t)\cdot(i_{kA} + i_{kB} + i_{kC});$$

$$\frac{dF^*}{di_{kA}} = -2\cdot(i_A - i_{kA}) + \lambda_1(t)\cdot u_A + \lambda_2(t) = 0\ ;$$

$$\frac{dF^*}{di_{kB}} = -2\cdot(i_B - i_{kB}) + \lambda_1(t)\cdot u_B + \lambda_2(t) = 0\ ; \qquad (17.23)$$

$$\frac{dF^*}{di_{kC}} = -2\cdot(i_C - i_{kC}) + \lambda_1(t)\cdot u_C + \lambda_2(t) = 0\ .$$

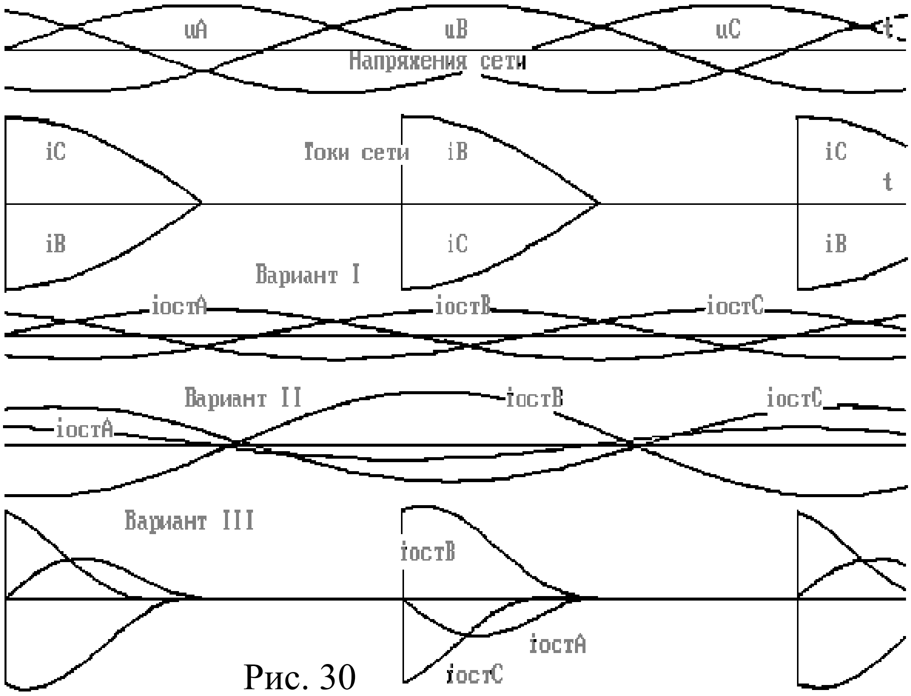


Рис. 30

После почленного сложения уравнений системы получается, что вторая неопределенная функция $\lambda_2(t)$ – нулевая. Решение системы с уравнениями конечной связи имеет вид

$$i_{\text{ост}A} = \lambda_1(t)\cdot u_A/2; \qquad i_{\text{ост}B} = \lambda_1(t)\cdot u_B/2; \qquad i_{\text{ост}C} = \lambda_1(t)\cdot u_C/2; \tag{17.24}$$

$$\frac{\lambda_1(t)}{2} = \frac{u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C}{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} = \frac{p(t)}{u_A^2(t) + u_B^2(t) + u_C^2(t)}. \tag{17.25}$$

Как похожи уравнения (17.8) и (17.25)! Отличия только в том, что в одном ВСЕ выражено через интегральные значения, в другом – через мгновенные. Остаточные токи построены на (рис. 30).

Еще более красивый вид имеют уравнения для токов компенсатора, которые после преобразований выражаются еще через одну функцию:

$$i_{kA} = \lambda_3(t)\cdot u_{BC}; \qquad i_{kB} = \lambda_3(t)\cdot u_{CA}; \qquad i_{kC} = \lambda_3(t)\cdot u_{AB}; \tag{17.26}$$

$$\lambda_3(t) = \frac{u_{BC}i_A + u_{CA}i_B + u_{AB}i_C}{u_{AB}^2(t) + u_{BC}^2(t) + u_{CA}^2(t)}. \tag{17.27}$$

Здесь даже появились произведения линейных напряжений на противофазные токи! Именно эти произведения интегрируют классические счетчики реактивной энергии! Минимум функционала (17.3) имеет вид

$$J_{3\min} = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{p^2(t)}{u_A^2(t) + u_B^2(t) + u_C^2(t)}. \tag{17.28}$$

Трехфазная симметричная система синусоидальных напряжений обладает удивительным свойством связи мгновенных и интегральных значений:

$$u_A^2(t) + u_B^2(t) + u_C^2(t) = U_A^2 + U_B^2 + U_C^2. \tag{17.29}$$

Тогда в формуле (17.8) мы имеем дело с квадратом средней мощности, в (17.28) – со среднеквадратичным значением. Наконец, при постоянстве мгновенной мощности, что на практике часто почти имеет место в трехпроводной сети, обе формулы совпадают. А это означает, что возможна полная компенсация большинства трехфазных нагрузок без накопителей энергии!

По мнению автора именно междуфазный энергообмен лежит в основе работы компенсированных выпрямителей с одноступенчатой коммутацией [60, 61], а не «частотное преобразование реактивной мощности», что приписывают этим интересным разработкам практиков авторы разных частотных теорий реактивной мощности. К сожалению, сами авторы разработок преобразователей этот вопрос как-то вуалируют (видимо, они решают другие проблемы). Появились интересные преобразователи, в которых междуфазный энергообмен заявлен открыто, в прибалтийской научной школе, например, [38]. Но в этих работах предлагаются все новые и новые схемы, дается их конкретный расчет, а фундаментального энергетического подхода, как в этом разделе, автор не встречал. Практическими же разработками конкретных схем этого направления автор пособия не занимался, но в следующем параграфе описан возможный вариант реализации чистого междуфазного энергообмена с помощью LC-цепочек. Полученные «на кончике карандаша» диаграммы сигналов этого чистого варианта вернут нас к интересным теоретическим формулам (17.26) данного теоретического раздела [55].

17.2. Простейший компенсатор междуфазного обмена

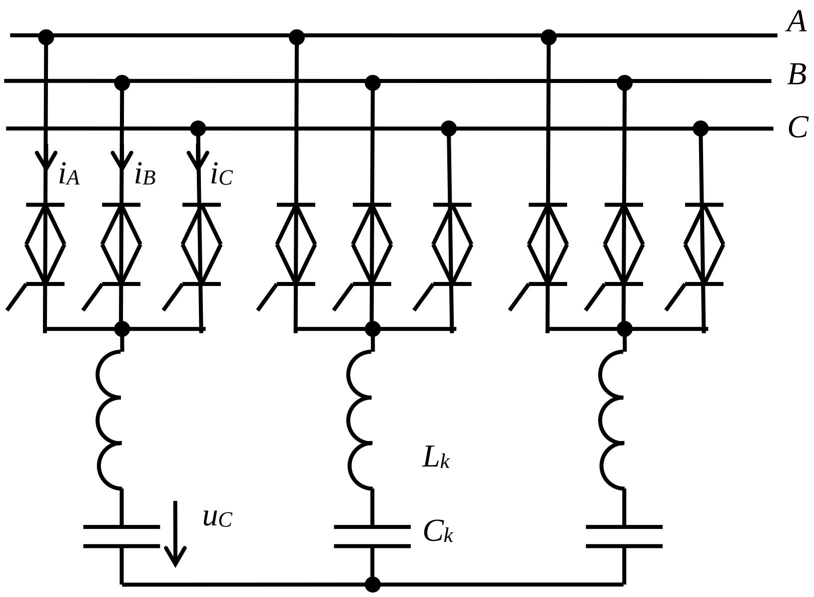
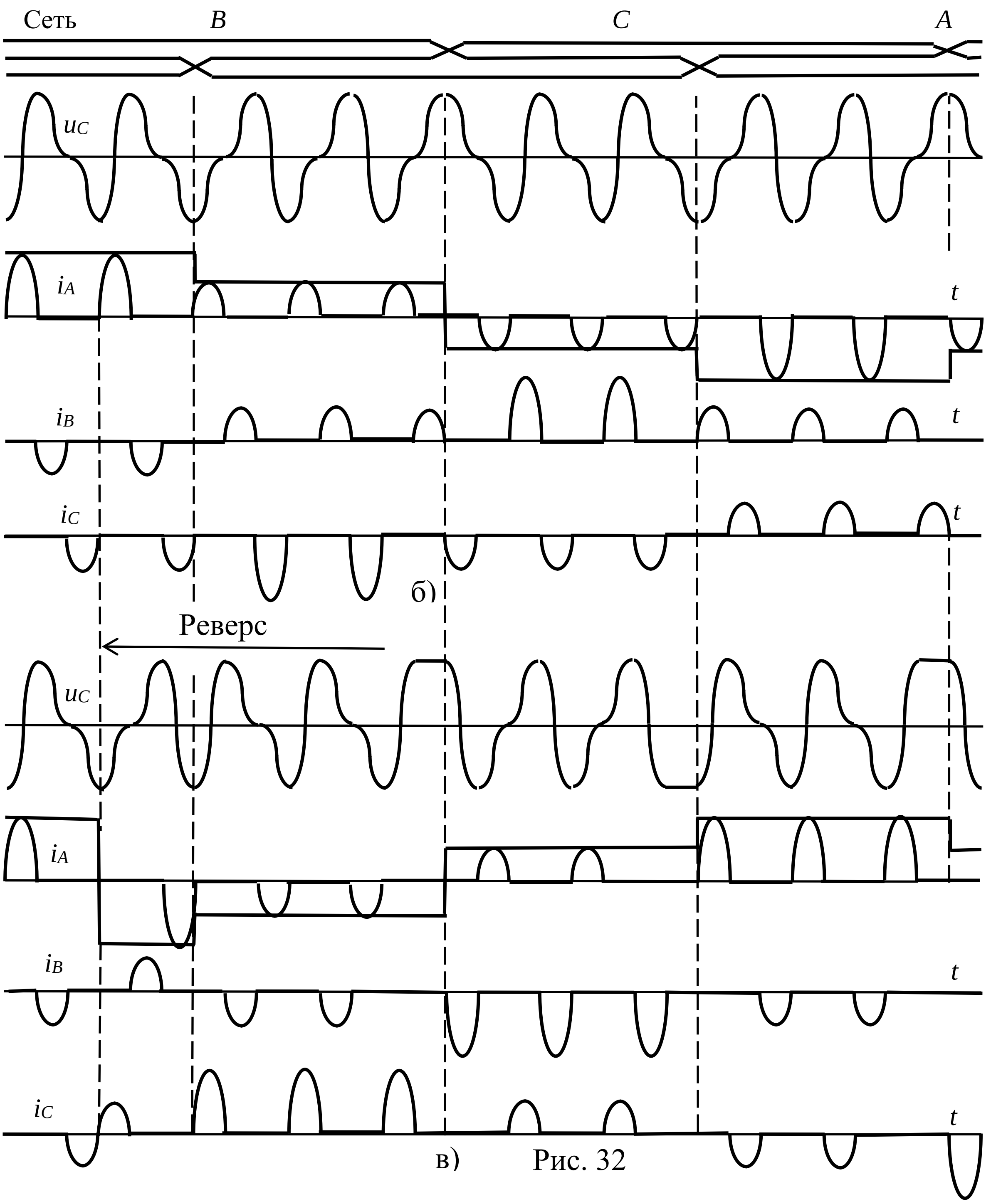


Рис. 31

Из разработок автора «на кончике карандаша» несомненный теоретический интерес представляет анализ возможной работы схемы компенсатора (рис. 31) с чистым междуфазным энергообменом [55, 56]. Саму схему можно считать общеизвестной (например, это может быть простейший непосредственный преобразователь частоты). Показанные на рисунке *LC*-цепочки по циклу подключаются к разным фазам сети и только при переходах тока через нуль с почти синусоидальной формой тока на частоте резонанса (самый благоприятный режим работы обычных тиристоров, как в последовательном инверторе). Если цепочку считать идеальной, то процесс одного перезаряда полностью описывается тремя величинами: напряжением на емкости в начале и конце одного цикла и амплитудой тока. Пусть цепочка с напряжением на емкости U_0 подключается к напряжению u. В процессе резонансного перезаряда ток достигнет амплитудного значения I_m, а в конце перезаряда напряжение на емкости достигнет величины U_1

$$I_\mathrm{m} = 2\cdot(u - U_0)\cdot\sqrt{(C_k / L_k}\,; \qquad U_1 = 2\cdot\mathrm{u} - U_0\,. \tag{17.30}$$

На (рис. 32) построены диаграммы сигналов схемы в упрощенном для анализа варианте: общая точка *LC*-цепочек заземлена и трехфазная схема (рис. 31) распадается на три однофазных. Напряжения сети на (рис. 32) соответствует выходу трехфазного мостового инвертора при одном варианте соединения обмоток выходного трансформатора (например, звезда – звезда). На (рис. 32) показаны напряжение на емкости и токи фаз при прямом следовании переключений. Видно, что токи фаз получились отстающими от напряжений фаз и соответствующими по форме другому соединению обмоток (например, звезда – треугольник). Можно сказать иначе: амплитуды токов стали такими, как линейные напряжения



в) Рис. 32

$$I_{mA}(t) = 2 \cdot u_{BC} \cdot \sqrt{(C_k / L_k} \ . \qquad (17.31)$$

Для наглядности по вершинам синусоид токов проведены аппроксимирующие линии только в фазе *A*. Регулированием частоты переключений очень просто осуществлять регулирование усредненных значений токов. На (рис. 32) до момента «Реверс» показаны те же диаграммы, что и сверху, а затем изменен порядок следования переключений. Видно, что токи фаз переключились на опережающие при той же форме. Приятно, что эти интересные процессы идут при постоянстве амплитуды напряжения на емкости. Совпадение формул (17.26) для теоретического междуфазного энергообмена и (17.31) для работы простейшей схемы с энергообменом наводит на мысли о глубокой внутренней связи оптимизационной теории и простейшей схемы (которая «не подозревает о существовании этой теории») с простейшим алгоритмом работы.

К сожалению, этот интереснейший материал так и остался не исследованным. Например, при плавающей точке соединения *LC*-цепочек процессы усложняются; не исследована схема с подключением цепочек к линейным напряжениям (тогда токи в цепочках будут как на (рис. 32), другим будет потребляемый ток, но число вентилей возрастает; на (рис. 32) специально «удачно» подобрано начальное напряжение на емкости. При другом начальном напряжении амплитуды будут поочереди то больше, то меньше этого «удачного напряжения». Следует ожидать, что при учете активного сопротивления эти колебания должны затухнуть, а процессы установиться к виду (рис. 32) при любых начальных условиях. При бесконечной частоте переключений мы получим идеальное энергобменное устройство, весьма полезное для теоретических умозаключений.

18. НОВАЯ ТЕОРИЯ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

18.1. Непосредственное применение

Концепция Фризе много дала развитию преобразовательной техники даже на неосознанном уровне. Синтез одного или группы параллельно работающих устройств с формой общих токов в фазах, повторяющих формы напряжений сети, породил много интересных технических решений. Исследователь всегда знал, какое устройство является исходным, а какое компенсирующим, и мог получить все нужные соотношения. То, что решение, кто кого компенсирует, принималось субъективно, а не по сигналам, позволило только написать сию критику, но не мешало исследователю.

Теперь новая теория решает все вопросы объективно, то только по сигналам, и может найти применение для улучшения режимов работы в системах электроснабжения, если не надо решать вопросы, кто кого компенсирует. Это все уже было сказано в параграфе 7.7 для однофазных сетей. Из-за практической симметрии реальных трехфазных сетей часть вторая мало что добавит к выводам этого параграфа. Но надо больше присмотреться к формулам (11.29), (11.34), (16.21), (16.25), чтобы оценить величину этой добавки перед пренебрежением.

Специалисты преобразовательной техники улучшают эффективность своих устройств, введением конденсаторов, работающих на высокой частоте, всевозможных нулевых вентилей, и им хотелось бы знать долю компенсирующего действия того же нулевого вентиля в общем балансе ответственностей всей схемы. К сожалению, доля ответственности и конденсатора, и нулевого вентиля будет нулевой (без учета активных потерь). В балансе участвуют только элементы цепи, в сигналах которых есть формы сетевых сигналов. Из-за повышенной частоты сигналов на конденсаторе и вентиле (при условии симметрии, конечно) сетевых форм в их сигналах нет и не надо даже вычислять разные скалярные произведения, результат будет заранее нулевым. Можно пойти по частоте в другую сторону. Нулевым будет участие любых устройств в цепи постоянного тока выпрямителей, хотя сглаживающий дроссель меняет формы всех токов в выпрямителе и общую полную мощность. Участие идеального дросселя в балансе ответственностей будет нулевым.

Вся ответственность за пассивные составляющие сетевых токов ляжет только на основные вентили выпрямителей, преобразователей частоты, так как у них периоды сигналов совпадают с сетевыми. То есть за «реактивную мощность» в этих схемах отвечают основные вентили. В схеме междуфазного обмена (рис. 31) вся ответственность за «реактивную мощность» ложится на симисторы. А хитрые добавки в схемы типа нулевых вентилей и конденсаторов на высокой частоте изменяют формы сигналов основных вентилей и они начинают меньше «отвечать за реактивную мощность». Объяснение очень простое, но обидно, чтоглавные виновники улучшения остаются вне баланса по новой теории и не получат «премию».

Основная масса ученых продолжает спрашивать: «Как же у вас вентили потребляют реактивную энергию, если там нет накопителей». С такими учеными уже не надо спорить, отослать их к главе 1 и параграфу 3.2 и сказать, что вентили не «потребляют реактивную энергию», а «несут ответственность» за эту составляющую. Для таких ученых В.А.Лабунцов даже предложил «пробный камень» в виде тиристора и активного сопротивления, примут или нет такие ученые, что тиристоры несут всю ответственность. Теперь оказалась, что принятие этой ответственности не надо и доказывать, а принять концепцию Фризе и все станет ясно по определению (параграф 1.3). Если они не примут это, то они не принимают концепцию Фризе и надо прекращать с ними споры, так как теория этой концепции ушла слишком далеко от главы 1.

Итак, по теории вся ответственность ложится только на основные вентили преобразователей, а предлагаемая теория позволяет рассчитать ее по приведенным формулам. Но это ничего не дает исследователю, он получит все составляющие по анализу сетевых сигналов идеального преобразователя, что проще и он делал и раньше, и отнесет пассивную составляющую ответственности на основные вентили. Новая теория вооружает исследователя уверенностью в правоте такого отнесения. Но можно построить все сигналы вентилей и проверить баланс. Если он не сойдется к сетевому, то в построениях допущена ошибка. Это бывает полезно исследователю.

18.2. Искусственное применение

В параграфе 16.3 подробно обсуждалось свойство «фазонечувствительности» балансируемых энергетических теорий. Сеть питания еще до «трансформаторных приведений» можно поворачивать схемами (рис. 22). После выбора любого угла (коэффициентов перераспределения) он оставался постоянным. Теперь можно заставить этот угол меняться искусственно много раз за период повторяемости процессов. Это будет идеальный трансформаторный непосредственный преобразователь частоты (и фаз для рис. 22 б) или фазовращатель. После этого надо включить еще один такой обратный преобразователь, чтобы на его выходе получить реальные напряжения для исследуемой цепи. Так что, элементы цепи даже «не узнают», что подводимая к ним электроэнергия была дважды преобразована. Этот прием получения промежуточных энергетически эквивалентных сетевых сигналов уже использован для получения формул двухфазного баланса в трехфазной сети, когда в промежутке энергия передавалась по двум фазам.

Коэффициенты перераспределения исследователь может заставить изменяться по любому закону. Из всего ранее доказанного следует, что энергетический баланс по всей цепи относительно новой искусственной энергетической точки будет всегда выполняться, но распределение ответственностей между элементами будет другим. Будет другое решение принципа справедливости. Коэффициенты могут изменяться плавно, могут скачками. Исследователь может перераспределить ответственность на нужные ему элементы цепи. Например, в тиристорных преобразователях нагрузка скачками подключается к разным фазам своей реальной сети. Если исследователь также и одновременно заставит изменяться коэффициенты перераспределения, то этим он снимет описанную выше ответственность с основных вентилей и перераспределит ее на вводимые им в схему устройства. Так автор пособия получал зависимости влияния сглаживающего дросселя в цепи постоянного тока на энергетические характеристики выпрямителя. Можно в схеме (рис. 31) снять всю ответственность с симисторов и перераспределить ее на LC-цепочки.

Если применить предлагаемый подход к неявнополюсной синхронной машине, то можно заставить коэффициенты перераспределения меняться плавно по гармоническому закону в функции угла поворота прямо по уравнениям (10.26). Проще симметричную трехфазную машину рассматривать в двухфазных осях. Тогда мы получим хорошо известную модель синхронной машины «с заторможенным ротором в осях d и q» [54]. Но теперь за реактивную мощность машины будет нести ответственность ток возбуждения! Так хорошо известный на практике факт может получить новое теоретическое обоснование. Пока это не является обоснованием, а только предлагаемым для исследователей приемом. Но в будущем, если предлагаемая теория будет принята, надо будет ввести в нее уравнения электромеханического преобразования энергии, тогда прием с синхронной машиной может стать не столь искусственным.

19. В Ы В О Д Ы

Приведенные выводы в большей степени отражают мировоззрение автора на суть вопроса, поэтому в списке есть результаты, полученные ранее другими авторами. Они включены для получения единства представления. Система выводов построена для сознания студента, который впервые изучает вопросы энергетического баланса и перед ним по кирпичикам вырастает здание новой теории, и в ней мало критического материала о других строениях, хотя он есть в тексте пособия.

19.1. Энергетические составляющие сети с одним электроприемником при периодических сигналах

1. В большинстве литературных источников имя Фризе связывают с его формулой (1.14), что говорит, скорее, о непонятии, чем неприятии его идеи. Имя Фризе сейчас стало общепризнанным, но подлинник большинство не читало, поэтому и приведен реферат в параграфе 1.1. Концепция Фризе связана минимизацией среднеквадратичного тока сети (1.7) через определение

оптимальной мгновенной активной составляющей тока однофазной сети произвольного периодического (с коротким периодом) напряжения с ЕДИНСТВЕННЫМ электроприемником (рис. 1 а) при той же активной мощности (1.5), (1.12). Активная составляющая оказалась повторяющей форму напряжения сети (1.8 а), что соответствует чисто активной нагрузке. Вторая составляющая появляется только при нелинейности между током и напряжением. Поскольку оптимальные свойства активной нагрузки были известны и до Фризе, его статья не была сразу замечена. Для доказательства используется неравенство Шварца (1.1). Затем определяется невязка (пассивный ток) активной составляющей тока до полного тока (1.3), которую Фризе рекомендует компенсировать. Такому разделению токов соответствует схема замещения из параллельно включенных активного и пассивного сопротивлений (рис. 1 б). Менее известно предложение Фризе по выделению активной и пассивной составляющих из напряжения (1.4), тогда получается схема замещения (рис. 1 в). Показана функциональная ортогональность на периоде двух полученных составляющих (1.10), (1.11) и только затем появляется «формула Фризе» (1.14), не имеющая принципиального значения для сути концепции.

2. Строго говоря, Фризе интегрировал не периодические сигналы, а сигналы за произвольный интервал времени (1.10), считая дальнейшие процессы произвольными, но полученные им формулы соответствовали периодическим процессам. Интуитивная попытка расширения концепции не имела последствий.

3. Только при несовпадении форм тока и напряжения на периоде появляются пассивные составляющие Фризе и их можно подсчитывать счетчиками. Но, если счетчиками подсчитать значения два раза по половине периода, то сумма не совпадет с периодным значением. В примере параграфа 6.6 на интервалах $T_1 = 0.64 \cdot T$ и $T_2 = 0.36 \cdot T$ (рис. 9 а) сигналы постоянны и нет пассивной мощности, а на общем периоде T мы имеем дело со ступенчатым процессом, на котором Фризе и пояснял свою теорию. Попытка применить формулы Фризе к любому интервалу времени означает, что этот интервал считается периодом и слева и справа от него аналогичные процессы. Поэтому внутри концепции Фризе невозможны даже попытки определения мгновенной пассивной (реактивной) мощности (параграф 6.6) по сигналам на это мгновение. В каждое мгновение в цепи сигналы постоянного тока и не может быть пассивных составляющих.

4. Относительным показателем разделения сигналов на ортогональные составляющие является коэффициент мощности (1.22). Он характеризует оправданную эффективность загрузки сети электроснабжения.

5. В простейших ключевых (без потерь) преобразователях энергии с активной нагрузкой известна линейная связь коэффициента мощности с глубиной регулирования напряжения, известны доказательства этой связи. Однако при менее известном подходе Фризе с разложением напряжения на ортогональные составляющие (рис. 1 в) эта связь получается по определению (1.24), а не через ее доказательство.

6. После признания великого открытия у него всегда находятся предшественники. Концепция Фризе является самым первым шагом известной в математики процедуры ортогонализации Грама-Шмидта в параграфе 4.1. В этой процедуре вторая ортогональная составляющая на произвольном интервале появляется только при нелинейной связи двух функций, когда определитель Грама (4.7) получается ненулевым. Форма его записи (4.7 г) полностью совпадает с определением пассивной мощности по формуле Фризе (1.14). Таким образом, Фризе сделал первый шаг перенесения процедуры Грама-Шмидта в электротехнику, то есть вписал строчку (б) в этой процедуре (4.4).

7. Результаты Фризе повторно получены в пособии вариационными методами (1.20), что строже, не сложнее, представляет определенный методологический интерес и допускает усложнение налагаемых связей. В студенческом курсе доказательство должно вестись только вариационными методами, так как через них получаются и неравенство Шварца (1.1), и все последующие выводы пособия, и будущие выводы, которые сделают сами студенты.

8. Вариационными методами решена задача минимизации потерь в трехпроводной сети без нулевого провода и найдены оптимальные (активные) токи при любых (8.15) и одинаковых (8.16) сопротивлениях линий. Сам Фризе свою статью закончил фразой, что ему ясно как поступить с трехфазной сетью, но так и не опубликовал это.

9. Предложены различные аппаратные решения по выделению энергетических составляющих: прямая реализация формулы Фризе (рис. 11 а), с инерционной обратной связью, обеспечивающей ортогональность разложения (рис. 11 б), она же в трехфазном варианте (рис. 20). Если первая схема реализует конечную формулу, то две вторые реализуют физическую суть процессов. Из-за этого они получаются гораздо проще и позволяют выделить другие составляющие заранее заданных форм.

10. Известно, что надо создавать электроприемники с высокими энергетическими показателями, без пассивного тока. Можно замкнуть этот пассивный ток у электроприемника через компенсатор, что и обосновано концепцией Фризе. Однако сопротивление компенсаторов почти всегда получается больше сопротивления линий электропередачи по законам геометрии электрических аппаратов (для трансформатора это закон Видмара) и общие потери после компенсации могут возрасти (см. параграф 6.1). Поэтому надо создавать либо компенсированные преобразователи (для какой-то технологии) без пассивного тока, компенсирующие преобразователи, которые выполняют технологическую функцию и одновременно компенсируют вредное действие других, но не выгодно создавать чистые компенсаторы. Последние все же создают, когда они одновременно улучшают качество напряжения сети или регулируют его. Кроме того, компенсация уменьшает полную мощность сети и габариты трансформаторов, что может иметь решающее значение.

11. В трехпроводных сетях можно рассмотреть обобщенный компенсатор (рис. 29) и вариационными методами еще раз минимизировать потери в трансформаторе при трех типах ограничивающих связей для компенсатора.

I. Возможно накопление энергии и ее обмен между фазами.

II. Возможно только внутрифазное накопление энергии.

III. Возможен только обмен энергией между фазами.

Результаты анализа по вариантам.

I. Полное совпадение с п.8 этих выводов при равных сопротивлениях (8.16), (17.7).

II. Получены сложные формулы (17.13),... (17.19), требующие дальнейшего анализа.

III. Фазные токи компенсатора начали повторять линейные напряжения (17.26), впервые появилась формула (17.27), похожая на формулу реактивной мощности по схеме трех варметров, в симметричной сети возможна полная компенсация без накопителей энергии. Это самый интересный анализ данного раздела.

12. Анализ «на кончике карандаша» простейшей схемы компенсатора междуфазного обмена энергией с естественной коммутацией тиристоров (рис. 31) открывает в нем интересные свойства, имеющие общетеоретический интерес. Она генерирует токи с формой противоположного фазе линейного напряжения (рис. 32). Поскольку эти формы появляются в схеме естественным образом, а не под действием управления (угол включения всегда нулевой), она требует глубокого исследования.

19.2. Полная мощность сети с одним электроприемником при периодических сигналах

13. Сейчас почти общепринято определять полную мощность сети электроснабжения как максимальную активную мощность, которая может быть получена от сети при тех же ограничивающих условиях. Далее сторонники этого подхода расходятся в мнениях об этих условиях. Не будем пока рассматривать расхождения, так как это все же «сторонники».

14. Наиболее опасны «ложные сторонники» оптимизационного определения полной мощности. Они опасны тем, что пишут про ту же максимальную активную мощность, а потом доказывают, что единства тут быть не может, так как условия оптимизации разные у трансформатора, кабеля, двигателя, лампочки, гальванической ванны и др. Дело в том, что специалисты по всем упомянутым объектам присвоили себе тот же термин «полная мощность» и, правильно определив его у себя, навязывают нам свое понятие. Поскольку условия работы сетевого кабеля и трансформатора несколько отличаются, то надо выбрать что-то одно при оптимизации сети электроснабжения. В данном пособии принято определение полной мощности по фидерному трансформатору, к которому могут быть подключены любые из упомянутых объектов, включая двигатель. И пусть специалисты по электрическим машинам определяют свою полную мощность двигателя, это нас уже не касается.

15. Предлагается следующее определение полной мощности (параграф 8.5). Под заданные сигналы подобрать идеализированный трансформатор, чтобы каждый сигнал соответствовал его номиналу, и определить потери. При тех же напряжениях изменить формы токов так, чтобы при сохранении потерь получить максимальную активную мощность. Она и будет полной для исходных сигналов. При анализе токи должны вызывать потери, но не падения напряжений. Потери понимаются суммарными, но можно предложить варианты формул полной мощности с сохранением пофазных потерь. Самым сложным в этом определении является требование: «каждый сигнал соответствовал его номиналу».

16. В номинальном режиме в стержнях магнитопровода должны быть номинальные индукции, чего при разных напряжениях можно добиться либо числом витков, либо сечением магнитопровода при сохранении объема стали и меди. Это изменяет сопротивления обмоток и получается, что они зависят он напряжений. Эти зависимости могут быть разные, например (8.21).

Получается, что в общем случае сопротивления потерь в идеализированном трансформаторе должны быть различными.

17. Вариационными методами получены формулы полной мощности однофазной (1.18) и трехфазной (8.19) сетей. В однофазной сети значение сопротивления сократилось, а с ним и все проблемы и осталась формула (1.18). В трехфазной рассмотрены три варианта для сопротивлений потерь и получены формулы для равных сопротивлений (8.20) и разных индукциях, при выравнивании индукций числом витков, сохранении пофазных объемов меди в трех трансформаторах, но с нулевым проводом (8.32), при дополнительном перераспределении междуфазных объемов меди (8.39). Как видно, во всех формулах есть изъяны. Формула (1.18) общепринята, а (8.20) почти общепринята, то есть обе формулы были раньше доказаны не вариационными методами.

18. При получении формул (1.18), (8.20) в промежутках были выведены формулы оптимальных токов, передающих максимальную мощность. Они совпали с с ранее определенными активными токами. Это является зеркальным отображением одной физической сути нахождения минимума и максимума при короткопериодических режимах. Далее при длинных периодах это зеркало станет кривым.

19. Активная мощность экономически компенсируется стоимостью энергоносителей (эксплуатационные издержки), а полная - стоимостью всего электрооборудования по производству (исключая турбины), передаче и распределению энергии (капитальные затраты). Четкой грани нет, но ее можно идеализировать, параграф 1.4. Тогда появится экономический подход в определении энергетических составляющих, двух качественно разных тарифов плат за энергию. Предлагаемая теория не вступает в конфликты с практикой, сейчас уже применяется первая ставка тарифа платы за потребленную энергию (за эксплуатационные издержки) и вторая ставка за максимум активной и реактивной мощности (за реактивную дают надбавки ко второй ставке, но суть это мало меняет) в часы максимума энергосистемы. Вторая ставка уже близка к идее введения ставки за максимум (оборудование выбирают по максимуму) полной мощности и это будет плата не за дополнительные потери в сети из-за этой полной мощности, как часто это трактуют, а плата за капитальные затраты на весь тракт энергопередачи этой полной мощности. Так и будем далее понимать «вторую ставку» платой за полную мощность.

20. Приравниванием экономических статей расходов от реальных и эквивалентных им сигналов в короткопериодических режимах, можно

получить многие известные интегральные соотношения, например, среднеквадратичный ток (7.9), но чего-то нового получить не удается.

21. Последовательный строгий оптимизационный подход не привел к появлению общепринятых энергетических составляющих (реактивная или сдвига, искажений, несимметрии). Эти понятия были введены разными авторами на основе «очевидности» ввода в сети синусоидального напряжения. Так поступал и автор пособия [2].

19.3. Распределение ответственностей электроприемников за энергопотребление

22. Сетью в пособии называется параллельное соединение электроприемников, когда на всех одно общее напряжение, или последовательное соединение всех электроприемников, когда у всех общий ток. Если есть хоть один элемент, сигналы которого не совпадают с сетевыми, то это уже цепь. Минимальная цепь может быть создана из трех элементов (рис. 8). Один и два элемента образуют только сеть. У Фризе был один элемент. Как только элементов стало больше одного, так возникла задача справедливого распределения между ними платы за подключение к сети электроснабжения.

23. Плата по первой ставке за потребленную энергию определяется интегралом активной мощности сети $P_s = (u_s,i_s)$, а распределение этой ставки между электроприемниками производится по интегралам их активных мощностей $P_k = (u_k,i_k)$, причем выполняется баланс последних значений по всей сети. Можно сказать, что выполняется справедливый баланс ответственностей за активную мощность или энергию сети.

24. Всем хотелось бы перенести простоту и справедливость такого решения и на вторую ставку, за полную мощность сети. Но уже экономический подход поясняет, что это качественно другая плата, платить надо за максимум полной мощности, но не интегрировать ее, чтобы заплатить за новый вид «полной энергии». Для сети все потребители – один электроприемник, оборудование (и трансформатор) будет выбираться по суммарному току и напряжению сети.

25. Концепция Фризе (глава 1) и ее трехфазное развитие (глава 8) имеет дело с одним электроприемником и для нее бесчисленное множество потребителей сети – один электроприемник! Даже не знакомый с ней исследователь, когда включают параллельно одному электроприемнику другой (компенсатор), из двух синтезирует один электроприемник с лучшими энергетическими показателями, анализирует энергетические показатели

полученного одного электроприемника (по Фризе) и этим оценивает эффективность работы компенсатора, то он стихийно остается внутри концепции Фризе с ее анализом работы одного электроприемника. С таких позиций создана и оценена вся современная преобразовательная техника. Это разумный для практики подход! Например, автор пособия в своей практической деятельности исследовал энергетические показатели параллельной работы большого числа импульсных преобразователей [2], но в анализе все они выступали одним электроприемником, и сам автор этого простого факта тогда еще не осознавал.

26. Таким образом, формулы (1.18), (8.19) позволяют определить ответственность всех электроприемников за полную мощность, концепция Фризе и ее развитие позволяет поделить эту ответственность на активную и пассивную, но не позволяет поделить эту ответственность между электроприемниками.

27. Решение вопроса баланса ответственностей за полную мощность сети почему-то был сведен большинством ученых к решению баланса реактивной мощности элементов цепи (и сети) при несинусоидальностях. Сейчас мы не говорим о допущенных при этом ошибках, речь идет об ошибочности самой постановки этого вопроса! Как бы ни был решен баланс реактивной мощности, надо далее решать вопрос о балансе ответственностей за полную мощность, а после этого выяснится, что с этого и надо было начинать!

28. Баланс ответственностей за полную мощность элементов произвольной цепи при любом питании должен определяться формулами (4.11) через взаимодействия разноименных сигналов и иметь размерность $[В{\cdot}А]^2$ четвертой степени по отношению к одному первичному сигналу, а не квадрата $[В{\cdot}А]$, как при балансах активных и реактивных мощностей. Члены баланса (4.11) могут быть перекомпонованы, переведены к формам взаимодействий одноименных сигналов, разбиты на множество составляющих, но везде степень будет четвертой (4.16), (4.34), (12.9), (16.20). Первая и вторая ставка платы за электроэнергию качественно отличаются, качественно отличаются и соответствующие им энергетические балансы даже своей размерностью. Поэтому теории баланса реактивных мощностей элементов были обречены на неудачу, так как искали результат не в той размерности.

29. Противники могут возразить: «Мы нашли бы формулу для реактивной мощности Q_k k-го элемента цепи и подставили бы ее в вашу формулу (4.11) в член $Q_s{\cdot}Q_k$». Дело тут в том, что баланс 4-й степени естественен и поэтому выражается простой и красивой формулой через скалярные взаимодействия сигналов (4.25 а, в), (4.36)

$$Q_S \cdot Q_k = [u_S,i_S][u_k,i_k] = (u_S,u_k)(i_S,i_k) - (u_S,i_k)(i_S,u_k). \qquad (19.1)$$

В этой естественной форме нет в явном виде Q_S и Q_k, векторная запись [] – только красивая абстракция (4.23). Но при большом желании их можно получить, а поскольку это противоестественно, то формулы получаются очень сложные (4.38), (4.39). Вряд ли какой-нибудь ученый смог сперва предложить формулу для Q_k (4.39), а потом для произведения (19.1). В трехфазных цепях пройти таким путем было бы еще сложнее. А как же быть с членом $P_S \cdot P_k$ в (4.11) с просто выражаемым $P_k = (u_k,i_k)$? Во-первых, это приятное исключение, во-вторых, это исключение навело ученых на ошибочную мысль, что такая исключительность свойственна и другим членам, в-третьих, надо было еще догадаться, что балансировать надо член $P_S \cdot P_k$, а не P_k.

30. Еще раз: сама постановка вопроса о балансе реактивных мощностей с размерностями 2-й степени в нелинейных цепях ошибочна! Этот вопрос навязан теоретиками, а надо решать практические задачи реального гармоничного мира. Только тогда могут быть получены гармоничные соотношения. В реальных сетях электроснабжения стоят два реальных вопроса о балансировании ответственностей за потребленную энергию и за габариты этих сетей. Последнее связано с понятием полной мощности. И оно должно быть получено оптимизационным анализом процессов в максимально упрощенных, но все же достоверных моделях аппаратов этих сетей. Тогда будет достигнута максимальная гармония всех соотношений. Недаром существует зеркальная связь в оптимизационных выводов понятий активных токов и полных мощностей (параграфы 1.2, 8.5). И этот анализ вывел на балансы электрических сигналов 2-й степени для активных мощностей и 4-й степени для полных. Могла получиться и другая степень, но она должна «получиться», но не быть изначально заложенной. Совсем изначально связали руки сторонники энергопотокового направления требованием, что все энергетические теории должны строиться только на базе анализов графиков мгновенных мощностей, иначе теории не могут быть названы «энергетическими».

Вывод о разных размерностях вынесен вперед следующих «тонких» выводов об ортогонализации и относительном балансе затем, чтобы студенты, только что прослушавшие курс физики, сразу и просто поняли, что существуют два КАЧЕСТВЕННО разных баланса в теоретической электротехнике, разных даже по размерности.

31. Может быть, вся беда с двумя балансами имеет лингвистические корни: в обоих балансах неудачно применили одно и тоже слово «мощность».

Использовали бы во втором балансе слово «габариты», например, «Трансформатор габаритов 100 [В·А]^2», вместо «Трансформатор мощностью 10 [В·А]», и развитие теории пошло бы другим путем. Измеряют же мощность двигателя внутреннего сгорания в единицах объема его цилиндров, а потом стали называть это «классом». Надо только привыкнуть.

32. Б.С. Замараев рассмотрел работу нескольких электроприемников в общей сети (рис. 3) и сделал следующий шаг в разложении сигналов в этой схеме на ортогональные составляющие (4.4 в). Пассивная составляющая тока по Фризе теперь оказалась объективно разложенной на другие составляющие, среди которых особое место заняла ее балансируемая часть с формой пассивного тока сети (2.9), (4.4 в), которая и станет «реактивной» составляющей, составляющей пассивных потерь в общей сети по вине конкретного электроприемника. Общая же ответственность за потери в сети была поделена между двумя электроприемниками формулами (2.1 в) и (2.1 г). Только при таких подходах в сети стало несколько электроприемников, а у Фризе был один! Оказалось, что потери по вине электроприемника i_1 в общей сети зависят от тока другого электроприемника i_2 и в формулах (2.1 в, г) появился член $i_1 \cdot i_2$ количественной оценки этого взаимодействия. Вот суть вклада Б.С. Замараева в концепцию Фризе.

33. Перестановка скобок в (2.1) приводит к формулам ответственности k-го электроприемника сети сперва за потери в ней (2.2 в) через сетевые сигналы, затем за полную мощность сети (2.4). С последней формулы и начинаются балансы 4-й степени, и вся предлагаемая теория.

34. Еще один шаг (4.4 г) и получается полная ортогонализация сигналов уже в цепи по Граму-Шмидту (4.4). Потом оказалось, что порядок этих шагов может быть любой, а результаты можно подвергнуть линейным преобразованиям и не будет шагов ни Замараева, ни самого Фризе (4.10), останется процедура Грама-Шмидта для произвольной цепи.

35. Пассивный ток сети $i_{Sп}$ в разложении (4.4) оказался формообразующим для пассивных сигналов всех элементов цепи (4.5). Его форма оказалась балансируемой по всем элементам наравне с активной составляющей. Таким свойством обладала только реактивная составляющая в линейных синусоидальных цепях. Поэтому в дальнейшем именно ее можно называть «реактивной». В больших энергетических системах ток сети складывается из множества несинусоидальных токов отдельных электроприемников и он

становится тем синусоидальнее, чем мощнее система. Тогда реальная форма активной составляющей становится синусоидальной, а пассивной или реактивной – косинусоидальной (параграф 2.5). Теперь можно начать объективное введение относительных коэффициентов типа «косинус фи», коэффициент искажений, но в пособии этого не сделано.

36. Разложение (4.4) всех элементных сигналов в строках (в), (г) зависит от сетевых (4.5), в формулах балансов ответственностей (2.4), (4.11) входят сетевые сигналы и т.д. Это означает, что любые энергетические соотношения в любой цепи носят относительный, а не абсолютный, как $P_k = (u_k,i_k)$ характер. Последнее является исключением, но в балансе ответственностей и это соотношение становится относительным $P_S{\cdot}P_k$. Поэтому изначально обречены на неудачу поисков универсальной формулы реактивной и других составляющих даже в формуле (4.11) в абсолютном виде. Даже система уравнений Кирхгофа пишется для всей цепи сразу (3.13), (3.14) и классические энергетические балансы курса ТОЭ (3.17) доказаны и пишутся для таких, то есть относительных сигналов, и теоремы балансов псевдомощностей Ланжевена (3.14) и Телледжена доказаны для таких относительных сигналов. Только удивительные свойства синусоиды (рис.7) позволили получить реактивные балансы в абсолютном виде (3.18). С этого приятного исключения и начались поиски абсолютных формул реактивных мощностей через два абсолютных сигнала элемента u_k и i_k. Пока поиск такой абсолютной истины породил только множество научных школ.

37. Формула (2.4) стала первой формулой, в которой ответственность (за полную мощность – будем опускать) получена через взаимодействия одноименных сигналов, т.е. скалярные произведения (x,y) (2.3) только напряжений $U_S^2 = (u_S,u_S)$ и только токов (i_S,i_k), а не через взаимодействия разноименных, т.е. мощностей, например, (u_k,i_k). Это начинает новое мировоззрение на баланс полной мощности в цепи.

38. После понятия сути формулы (2.4) была предложена формула (4.11) через взаимодействия разноименных сигналов. Эта формула слишком универсальна, она подходит под все созданные в пособии теории и под еще не созданные, но она не раскрывает содержание членов $Q_s{\cdot}Q_k + X_s{\cdot}X_k +$... и даже не подсказывает путь к раскрытию.

39. Гораздо больше направляет поиски исследователей обобщенная формула комплексного баланса ответственностей в произвольной цепи (4.12), она также является логическим следствием формулы (2.4). Предлагается после

ортогонализации Грама-Шмидта сигналов однофазной (4.10) или трехфазной (11.16) цепи записать их в гиперкомплексной (нужно много мнимых единиц) форме и подставить в формулу (4.12). Внутри систем гиперкомплексных чисел существуют все четыре математические операции. Тогда и сумма S_k сойдется к S_S, и сумма $S_S{\cdot}S_k$ сойдется к S_S^2, что и обеспечит справедливое балансирование ответственностей, а формулы (2.4) и (4.11) оказываются частным случаем формулы (4.12).

40. В математике существуют только три системы гиперкомплексных чисел: комплексных, кватернионов и октав, что позволяет работать по формуле (4.12) с 2, 4 и 8 ортогональными формами сигналов, в записи (4.10) не может быть больше 8 колонок. Далее этот строгий вывод окажется ошибочным для теории балансирования ответственностей в цепях.

41. После процедуры Грама-Шмидта сигналы однофазной цепи разлагаются по 4-м функциональным ортам (4.6), значит к ним можно применить систему кватернионов (нет примера в пособии, так как пришлось бы занять много места на описание самой системы кватернионов). После подстановки в формулу (4.12) последние два орта дают члены, при которых стоят нулевые соответствующие члены сети (из-за $U_{S2} = U_{S3} = U_{S4} = 0$, $I_{S3} = I_{S4} = 0$), и применение системы кватернионов оказывается избыточным, хотя результат получается правильным. Тогда аналогичный правильный результат получается при применении системы известных из курса ТОЭ комплексных чисел (4.17),... (4.20). В результате выведена основная формула баланса ответственностей однофазной цепи, представленная в разных формах (4.20), (4.22), (4.25).

42. Так был получен «положительный результат практического применения» кватернионов. Из-за этого положительного результата автор пособия потерял 10 лет на бесполезные поиски ошибки, в том числе, в безупречных формулах (4.25). Треугольная форма процедуры Грама-Шмидта (4.6) дает минимальный набор ортогональных функциональных членов. Далее он может быть преобразован в другие формы с увеличением числа членов до бесконечности (4.10), ряды Фурье, например. К ним должны быть применимы системы комплексной (4.18), (4.19), ортогональной (4.20 а, б) форм записей с тем же итоговым результатом (4.20 в, г). Анализ на ЭВМ (не приведен в пособии) систем кватернионов для исходных записей (4.10) с 4-мя колонками и октав с 8-ю колонками показал, сходимость получаемых балансов к полной

мощности сети, но разные элементные значения. При выполнении общего баланса нарушился «принцип справедливого» распределение общей ответственности между элементами. Если распределения разные, как выбрать из них справедливое? Члены формулы баланса ответственностей должны быть независимы от расклада (4.6) или (4.10), они должны быть «раскладонечувствительны». Например, активная мощность в форме скалярного произведения (u_k, i_k) будет одной и той же при получении ее из двух сигналов и из бесконечного ряда этих же сигналов в разложении Фурье. Формула (u_k, i_k) – раскладонечувствительна.

43. Некоторые физики считает, что математики нет как самостоятельной науки, все, что в ней есть стоящего, создано механиками, а затем физиками, когда в этом возникала потребность. Такая потребность возникла у электрика. Три системы гиперкомплексных чисел созданы под три тождества двух (4.13), четырех (4.14) и восьми квадратов. Доказано, что других тождеств не бывает. Сперва было тождество, а потом под него система комплексных чисел. В электрических цепях форма тока i_1 вызывает падение напряжения на сопротивлении с той же формой u_1, причем это напряжение препятствует току. Это эффект преобразования тока в напряжение или гирации. В цепи взаимодействуют между собой две формы 1 и 2, что выражается произведениями действующих значений $U_1 \cdot I_2$ и $U_2 \cdot I_1$. Не ясно, в чем проявляется это взаимодействие, но из-за эффекта гирации они должны быть одного качества и суммироваться с разными знаками $(U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1)$. Такой член есть в тождестве двух квадратов (4.13 в), далее он появляется в действиях с комплексными числами, далее так начинают определять реактивную мощность. Вот они корни реактивной мощности! Сперва было тождество (4.13)!

44. Не удается даже столь упрощенно предложить какие-то процессы в электрических цепях под члены (4.14 в, г, д) тождества 4-х квадратов. Если нет физических процессов, значит, нет места системе кватернионов и октав в теории цепей.

45. Но процессы попарных взаимодействий разных форм $(U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1)$ в цепях есть! Тогда под любое число ортогональных форм предложено свое «электрическое» тождество любого числа квадратов (4.15), оно не согласуется с требованиями математиков к подобным тождествам, но согласуется с физикой процессов в цепях. По аналогии с (4.20) под него сразу получается формула баланса (4.16), далее своя система гиперкомплексных чисел (табл. 8, 9), далее совпадение расчетов на ЭВМ со всеми ранее полученными формулами в таблицах 1,... 6. Но сперва было электрическое тождество квадратов (4.15).

46. Принятое в ТОЭ тождество двух квадратов (4.13) является частным случаем и тождества 4-х квадратов (4.14) под кватернионы, и 8-ми квадратов под октавы, и предложенного тождества (4.15). Поэтому новое предложение не вступает в конфликт с практикой расчетов цепей в курсе ТОЭ.

47. Поскольку предложенная система комплексных чисел (табл. 8, 9) бесконечна, нужны простые правила обращения с ней. В системе обозначений приняты буквы размерностей сигналов, которые они сопровождают, а сама система названа «комплексными размерностями». Подробный анализ этой системы не проводился, она была создана достаточно быстро после появления тождества квадратов (4.15). Форма баланса под это тождество достаточно понятна (4.16), поэтому особой потребности в системе комплексных размерностей нет. Система требует исследований.

48. Полученную формулу баланса алгебраическими преобразованиями можно привести к формам с взаимодействиями одноименных сигналов при всех вариантах представлений (4.22), (4.25), (4.34). С формулы (2.4) началось новое мировоззрение, что полная мощность в цепи балансируется через взаимодействия одноименных сигналов, а не мощностей. Новые формулы не противоречат этому мировоззрению.

49. Теперь можно встать на это мировоззрение! В схеме (рис. 21 а) можно привести любой элемент цепи к ее входу реальным трансформатором с коэффициентом (9.8), через принятую нами формулу (2.4) получить скалярную часть новой формулы баланса (9.7 д), (9.14 а) и убедиться, что только она обеспечивает баланс по всей цепи (табл. 3, 6, 7). Невязка напряжения элемента u'_k (9.9) получается ортогональной $(u_S,u'_k) = 0$ или мнимой. Поэтому ее можно ппривести так же мнимым трансформатором, и получить вторую часть формулы (9.14 б) в новой записи $[u_S,u'_k][i_S,i_k]$. Оказывается, что $[u_S,u'_k] = [u_S,u_k]$ и мы в нашем варианте формулы баланса (4.25 б) не указываем этот важный штрих только для экономии бумаги. Баланс полученной векторной пары по цепи оказывается нулевым (те же таблицы), то есть пара только перераспределяет ответственность. И эта «второстепенная» пара при раскрытии дает член $P_s \cdot P_k$. Это «напряженческий» подход, но результат «токового» (рис. 21 б) получается аналогичным. Если студенту с чистым сознанием дать такое простое доказательство (параграф 9.3), он его сразу поймет и оно станет его мировоззрением на всю жизнь, а балансы активных и реактивных мощностей в цепи будет воспринимать результатом алгебраических преобразований.

50. Во всех интегральных формулах энергетического баланса векторные произведения встречаются только парами, получена формула преобразований векторных произведений к скалярным (4.23), (4.24). Через нее происходит переход от одного мировоззрения (4.25 а) к другому (4.25 б). Формулы преобразований позволяют также формально найти численное значение каждого сомножителя и формально заменить запись $[u_S,i_S][u_k,i_k]$ на $Q_S{\cdot}Q_k$, находя значения каждого члена (4.38), (4.39). Знак каждого члена может быть любым, под него подстроится знак другого члена, и знак всей пары не изменится. Поэтому споры о знаке реактивной мощности с точки зрения рассматриваемой теории не имеют практического значения.

51. Если записать каждый член векторной пары в системе комплексных размерностей (табл. 8, 9), то к члену с размерностью S_S^2 и численным значением по формуле (4.23) добавится много членов с размерностями пустых клеток таблицы 9. Извлечение членов с S_S^2 названо экстракцией, поэтому строго действия с векторной парой и реактивной мощностью должны быть записаны так

$$\mathrm{Ex}\{[v,w][x,y]\} = (x,v)(y,w) - (x,w)(y,v); \tag{19.2}$$

$$Q_S{\cdot}Q_k = \mathrm{Ex}\{[u_S,i_k][u_k,i_S]\}. \tag{19.3}$$

Для сокращения записи в пособии это опущено, например, (19.1), так как для теории энергетического баланса не представляет интереса.

52. Два T-периодических сигнала $x(t)$, $y(t)$ описываются их объективными формами, скалярное произведение (x,y) имеет конкретное значение (2.3), векторное произведение $[x,y]$ объективно имеет только модуль (4.24), все остальные его составляющие носят субъективный характер. Если исходные сигналы будут разложены по двум ортогональным ортам, то в векторном произведении будет иметь один член вида (4.13 в) без квадрата со своей мнимой единицей. Своя мнимая единица означает ортогональность обоим исходным ортам. Если исходные сигналы будут разложены по четырем ортогональным ортам, то в векторном произведении будет шесть членов вида (4.15) без квадратов со своими мнимыми единицами, и т.д. То есть все будет зависеть от нашего субъективного разложения исходных сигналов. Но какой бы ни был субъективно принят исходный базис ортов, для всей цепи он должен быть единым, тогда, и начнут выполняться формулы разных взаимодействий между составляющими векторных произведений, часть из которых получается раскладонечувствительными (4.16), (19.2). Неизвестно, можно ли внести какие-то изменения в определение векторного произведения

в механике, но в ТОЭ даже простейшее из векторных произведений (3.13) пишут неверно: не может быть одна и та же мнимая единица в множителях и в произведении.

53. Минимальная система гиперкомплексных чисел имеет две единицы, не может быть в электротехнике систем с одной мнимой единицей. Любые диницы должны быть некоммутативны, то есть $i \cdot j = -j \cdot i$. И это есть в принятой в ТОЭ комплексной системе, но мнимость применяемой там действительной единицы прикрывают понятием «сопряженный комплекс». В данном пособии вплоть до главы 4 используется это понятие, чтобы показать, что все предложенное, включая (4.25), может быть получено и по правилам ТОЭ. Если ввести правило $i \cdot 1 = -1 \cdot i$, то не надо будет вводить понятие «сопряженного комплекса». Это методологическое замечание, сути оно не меняет, в ТОЭ можно все оставить без изменений.

54. Все выводы теории практически реализуемы. На базовой схеме «первого шага ортогонализации по Фризе» (рис. 11 б) могут быть построены ортогонализаторы Грама-Шмидта на любое число сигналов (рис. 12) с выделением всех составляющих. Реализация такого решения в больших энергосистемах потребует передачи на большие расстояния быстрой аналоговой информации. Если воспользоваться фактом синусоидальности сетевых сигналов в больших энергосистемах, то система передачи может быть значительно упрощена (рис. 18) за счет того, что передаваемые сигналы становятся медленно изменяющимися. На часы максимума их можно даже передавать словесно по местному радио вместо объявления номеров режимов.

55. Новая теория таит в себе много непривычных нам парадоксов.

Полной компенсации, когда для компенсатора $Q_S \cdot Q_k = 0$ и он «не получает премии» (параграф 6.2). При подходе Фризе мы сами принимали решение, кто кого компенсирует, здесь это происходит объективно. Но знание теории помогает найти субъективный выход из ситуации (параграф 6.3).

Невозможность поинтервального баланса. Нужно еще раз вернуться к выводам 2, 3 и параграфу 6.6 с его таблицей 10, чтобы осознать этот парадокс теперь в условиях балансирования.

Очень неприятны результаты выявления виновников резонансов теорией (параграф 6.4), это самая горькая пилюля для автора. Может быть читатели помогут найти выход или дать приемлемое для сознания людей объяснение явлению.

19.4. Особенности многофазного баланса ответственностей за полную мощность

56. Теорий полной мощности и ее составляющих трехфазной сети много, но нет ни одной теории трехфазного баланса составляющих всех двухполюсников цепи. Все используют в теориях однофазные балансы. Какие-то элементы чисто трехфазного баланса имеют теории симметричных составляющих, но они не доводят это до сигналов двухполюсника, да и при зачатии этих теорий в них были заложены нереальные операции сдвига. В разрабатываемой теории сдвиги запрещены. Имеет смысл по ее завершению разрешить сдвиги и еще раз пройти все методами симметричных составляющих.

57. Автор пособия не смог получить чего-то вразумительного в многофазных цепях, начиная с шага Фризе. Полезные исходные ортогональные орты получались только из многофазности сети, то есть всегда первым шагом было взаимодействие одноименных сигналов двух фаз, например, напряжений фаз x, y в (11.16). Формулы начали получаться только после применения приема трансформаторного приведения сигналов элемента к сети, что в однофазной цепи было только вариантом доказательства (параграф 9.3). Пусть другие пути найдут читатели, а сейчас к трансформаторам.

58. Энергия трехпроводной сети преобразуется фазоперераспределительным трансформатором (рис. 22 а) с сохранением не только полной мощности (8.20) за период, но и аналогичных преобразований для мгновенных напряжений и токов (10.9) при выполнении определенных требований к соотношениям коэффициентов трансформации (параграф 10.1). Аналогично в двухфазной сети, где формулы проще (параграф 10.4). Трансформаторы напряжения и тока (рис.23) позволяют привести друг к другу трехфазные и двухфазные сети с сохранением энергетических составляющих (параграф 10.2).

59. Известные в курсе электрических машин трехфазно – двухфазные преобразования выполнены путем проекций симметричных осей и линейными математическими операциями, а не трансформаторами при произвольных несимметриях (рис.23). В результате допущена ошибка в коэффициенте, вошедшая затем коэффициентом 1.5 в классическое уравнение двухфазной машины Парка-Горева (10.16). Удивительно читать, как эту ошибку пытаются оправдать тем, что трехфазная машина в 1.5 раза оптимальнее двухфазной. «Подтвердила» это и практика, когда трехфазная машина при двухфазном

включении теряла примерно столько же габаритной мощности. Поэтому применяемые в пособии преобразования фаз (осей) названы «трансформаторными» в отличии от применяемых в математике «линейных». Математики также делают линейные косоугольные преобразования, которые сложнее упомянутых симметричных, и также не думают о законах сохранения, но почему электрики их принимают? Этот побочный продукт энергетического анализа показывает студентам, насколько надо быть аккуратным и последовательным в выводах, особенно в исходных, и нельзя никому доверять (выкладки пособия тоже надо проверить).

60. В уравнение полной мощности (8.20) в квадратуре ($U_A^2 + U_B^2 + ...$) находятся сигналы одинаковых форм, если они в разных фазах A и B. Поэтому к временной функциональной ортогонализации сигналов следует добавить пространственную. Трансформаторными преобразованиями элемент (двухполюсник) цепи можно привести к сети (проще к двухфазной), тогда сбоку (в пространстве) у элемента появляется «хвост» напряжения (рис. 23 а) u_q (11.11) или тока (рис. 23 б) i_q (11.15). Трехфазные хвосты обозначаются буквой z. Ортогонализация Грама-Шмидта при напряженческом (рис. 23 а) подходе приобретает вид (11.16). Надо привыкнуть к тому, что в многофазной цепи ее двухполюсные элементы имеют пространственные хвосты многофазности, иначе теорию многофазного энергетического баланса не создать.

61. Теперь можно многое сказать о будущих формулах баланса. Они должны быть сложными, потому что в них должны быть все скалярные взаимодействия всех сигналов из (11.6) (u_x,u_y), (u_x,i_x), (u_y,i_x),… (u_q,i_k) и далее почти все сочетания пар скалярных произведений (12.5). Они будут иметь две формы представления: через коэффициенты трансформаторного приведения и через хвосты, которые рассчитываются через эти коэффициенты (11.11), (11.15). Второй вариант получается сложнее для расчетов, но выглядит эстетичнее.

62. Перенесение действительного трансформатора приведения из однофазной цепи (9.7 д) в двухфазную для напряженческого (рис. 23 а) и токового (рис. 23 б) подходов приводит к формулам (11.22 а, б), которые дают различные результаты, чего не было в однофазной цепи (рис. 21 а, б). Тогда принято решения, что формулы (11.22) дают два частных решения одного общего, которое находится через сумму частных с неопределенными множителями D_u, D_i долевых коэффициентов (11.25).

63. Значения долевых коэффициентов определены формулой (11.26) из предъявления к ним общих соображений и выбора самого простого варианта

рассуждениями в параграфе 11.6. Коэффициенты определяются только через сетевые сигналы, то есть являются общими для всех элементов цепи. Здесь читатели могут предложить свои решения, начиная с оптимизации чего-то, кончая получением более красивых окончательных формул, а не простых формул самих коэффициентов (11.26).

64. После принятых решений возникает задача преобразования полученных формул к красивым двух- и трехфазному видам. Самой удачной является формула (11.29). В многофазных цепях трансформаторное приведение сигналов элемента ко входу питания осуществляется гораздо точнее, чем в однофазных, а для двухортных цепей, например, с синусоидальными сигналами, осуществляется точно. Поэтому для реального случая трехпроводных сетей электроснабжения с синусоидальными сигналами красивая формула (11.29) является точной! Ее вывод, может быть, является главным практическим достижением второй части пособия. Энергопотребление в реальных мощных энергосистемах почти симметричное по фазам, тогда получается еще более эффектный вариант этой точной формулы (11.34). В однофазных синусоидальных цепях аналогичный скалярный член (9.14 а) давал балансируемое по сети, но не справедливое значение. Здесь же мы получаем точное значение, то есть и балансируемое, и справедливое.

65. Точные решения получаются для самих фаз трехфазной сети, где приведение к сети уже осуществлено. Формула ответственности одной фазы (11.31) выглядит настолько правильной, что возникает внутренний протест против сложной формулы (11.32) по предлагаемой теории. Сложность возникает из-за долевых коэффициентов (11.26), хочется принять их, хотя бы, равными по 0.5. Когда автор пособия начинал строить свою теорию, он за исходную принимал «очевидную» формулу (11.31) и годы не мог получить симметричного баланса. Студентам следует понять, как важно уделять много времени исходным положениям своих будущих теорий и проявлять осторожность с их «очевидностью».

66. Не балансируемые трансформаторами невязки сигналов участвуют в балансе векторными произведениями по аналогии с (9.12). Они только перераспределяют ответственность. Неожиданности при выводе не возникают, и формула окончательного баланса через коэффициенты приведения и взаимодействия одноименных сигналов получается сразу (12.2). Получены и хвостатые варианты (12.9), (12.13).

67. Не возникают проблемы и с формулами через любое число ортогональных составляющих при взаимодействиях одноименных сигналов,

введением двухфазных комплексных размерностей (глава 14), аппаратной реализацией (глава 13). Теория многофазного баланса на этом могла бы быть завершена.

68. Проблемы возникают при алгебраическом преобразовании полученных формул к взаимодействиям разноименных сигналов (мощностей), ради получения членов $P_S \cdot P_k + Q_S \cdot Q_k + ...$ (глава 15). А получается в итоговом балансе квадратичный член с минусом $-X_S^2$ (15.6 а), объясненный появлением в формулах извращенного (гиперболического) векторного произведения [[x,y]] (15.2), (15.4), которое участвует в специфическом квадратичном балансе (15.3), называемом гиперболическим вместо тригонометрического. Может быть, к этому явлению в цепях надо начать привыкать.

69. Однако расчеты в условиях гиперболического баланса (табл. 14, 15) и представления через ортогональные составляющие (15.14) возможны. Возможно и создание правил действий с комплексными размерностями, где для мнимых единиц 1·1 = 1 + 1 из-за гиперболического баланса (15.3), но автор не стал это помещать в пособие.

70. В главе 16 предпринята попытка представить два члена гиперболического баланса с непривычным минусом в виде суммы трех членов. Для этого создан «Конструктор балансируемых теорий» в виде большого набора формул для разных членов и из двух- и трехфазных балансов. Более того, показано, как строить эти формулы. Имея такой набор «кубиков» человек может попытаться построить что-то красивое своим интуитивным мышлением. Так получена красивая формула (16.20) с приемлемым общественному сознанию балансом (16.21). Приведены расчеты (табл. 16, 17, 18).

71. Формула (16.21) сразу рождает мысли о жертве ее пятым членом («пятом колесом») с получением красивейшей формулы баланса под другую формулу полной мощности (8.32), от которой мы отказались ради формулы (8.20). Обе формулы полной мощности получены с изъянами в доказательстве, так что ради красоты можно вернуться к формуле (8.32). После этого надо будет заново пройтись по всем главам второй части, посмотреть, как организовать трансформаторное приведение, как будет выглядеть новая формула баланса через одноименные взаимодействия и т.д. Если первую часть пособия автор считает теорией, то вторую часть – скорее методом создания новых теорий.

19.5. Энергетические составляющие сети с одним электроприемником при длиннопериодических и непериодических сигналах

72. Термином «короткопериодический» определен такой период сигналов, при котором колебаниями температуры в электрических аппаратах (в изоляции фидерного трансформатора) можно пренебречь и использовать в анализе общепринятые определения средних и среднеквадратичных значений (1.5), (1.6), (1.7). Эти формулы осуществляют эквивалентирование переменных сигналов постоянным и по потерям, и по загрузке аппаратов, а постояннство оптимальной активной мощности удовлетворяет любой маневренности электростанций (параграф 7.3). Найденные оптимальные за период значения зеркально отображают друг друга, любые доказательства дают один результат. Так общеизвестные формулы получаются при коротких периодах при экономическом методе эквивалентирования электрических сигналов по эксплуатационным издержкам и капитальным затратам (параграф 7.4).

73. Поэтому при переходе к «длинным периодам» ученым хотелось бы иметь пусть другой, но общий для всех подходов результат, чтобы одновременно и потери были минимальными, и полная мощность им эквивалентна, и источникам питания было пропорционально хорошо. Но вот этого и не получилось, вместо одного результата предлагаются три.

74. Оптимальному решению по Фризе соответствует активный ток с формой напряжения, умноженной на постоянный сигнал x (1.8 а), (7.1). Этот постоянный сигнал получается в схеме ортогонального анализатора (рис. 11 б) при коротких периодах из-за инерционности звена 4 с передаточной функцией $W_2(p)$. Маневренность электростанций допускает только плавные изменения активной мощности. В схеме (рис. 11 б) в переходных режимах сигнал x будет плавно изменяться со скоростью, зависящей от постоянной времени инерционного звена. Предлагается так и определить активную составляющую тока во всех режимах, остается только договорится о передаточной функции $W_2(p)$ и величине постоянной времени T. В ее выборе может помочь график (рис. 14) в параграфе 7.3. Видно, что постоянная времени должна на два порядка быть больше периода, принятого исследователем за «короткий». Приятно, что граница между понятиями «короткий» и «длинный» периоды получилась плавной.

75. Срок службы электрического аппарата зависит от его загрузки и, в конечном счете, от перегрева аппарата при перегрузке. Ближе всего зависимость срока службы от перегрева отражает экспонента, например, закон Аррениуса для изоляции. Предложено обратную величину срока службы определить мгновенной функцией коэффициента амортизации (7.11) капитальных затрат аппарата. Интегрирование этого коэффициента будет определять истраченный ресурс аппарата. Приравнивание ресурсов в реальном варианте и эквивалентном варианте с постоянным током позволяет найти эквивалентный постоянный ток, определяющий полную мощность в любых режимах. Расчеты параграфа 7.4 позволили получить графики эквивалентного тока (рис. 15), похожие на (рис. 14) как в кривом зеркале. Однако последние ближе к реальности. Из них видно, что ресурс истекает и у выключенного аппарата (изоляция стареет), размах изменений зависит от соотношения мощностей электроприемника и фидерного трансформатора. Интегрирование коэффициента амортизации помогает определить ресурс. С другой стороны, на это направлено определение понятия полной мощности аппарата. Получается, что таким образом осуществляется подсчет полной энергии, за которую надо платить. Как только такие счетчики «намотают» номинальное значение полной энергии, так аппарат выйдет из строя, а его стоимость к этому времени будет оплачена потребителем по отдельной ставке энергорасчетов.

76. Можно подвести итоги. Оптимизационный подход при коротких периодах показал, что плата за полную мощность есть вторая ставка плата за капитальные затраты и качественно отличается от первой ставки платы за электроэнергию. При этом получилась зеркальная связь результатов оптимизации по выделению активной составляющей тока по минимуму потерь, определению полной мощности по максимуму активной мощности и все это не предъявляло требований к высокой маневренности источников питания. В переходных процессах и при длинных периодах зеркало стало кривым, расчеты – очень сложными, но не противоречащими практическому сознанию. Графики (рис. 14) и (рис. 15) разных подходов похожи друг на друга, границы между переходами к разным качествам – размытыми, все подходы практически реализуемыми в измерительных приборах. Причем реализовать и понять работу этих приборов проще, чем разобраться в расчетах.

77. Для анализа любых процессов надо подбирать самые простые, но адекватные модели. Тогда поведение измерительных устройств на основе этих моделей (рис. 11 б, все схемы главы 13, описание реализации в параграфе 7.3)

и будет определять все понятия в любых режимах. Их выходные сигналы будут соответствовать даже таким понятиям, как «мгновенная интегральная оценка». Снимаем же мы со счетчика в определенное мгновение показание, осталось только психологически признать, что это и есть мгновенная интегральная оценка. Теория распределения ответственностей элементов цепи в переходных режимах не разработана в данном пособии, но все приборы, предложенные для таких измерений в периодических режимах, будут давать нужные значения и в переходных! Это самая полезная для практики мысль данного пособия.

78. Прочувствовать эту мысль проще на примере синтеза фильтра $W_2(p)$ в схеме (рис. 11 б). Если это интегратор, то реакция схемы на прямоугольный наброс соответствует апериодическому звену и показана на (рис. 13 б). Далее следует это распространить на любые сигналы и все! Однако учеными предлагаются другие варианты этой реакции (рис. 13 г, д), которые красивее выглядят на бумаге и понятнее человеку. Тут не хватает самого красивого, симметричного слева и справа рисунка реакции. Так на основе простых и наглядных рисунков узаконены многие определения, а с их реализацией (или ее невозможностью) мучаются другие люди, не допущенные к созданию законов. Предлагается требование простоты и наглядности перенести на измерительные приборы типа (рис. 11 б) с простейшим фильтром (интегратором) и их узаконивать. После этого будут решены все проблемы с измерениями любых сигналов.

19.6. «Технические» составляющие энергетического баланса

79. Выделение «технической» составляющей полезно для решения какой-то практической задачи. Классический пример: форма тока конденсатора, подключенного к сети произвольного напряжения и минимизирующая ток сети. Другие примерами могут служить формы из анализа процессов междуфазного обмена энергией (параграф 17.1). Предложенные в пособии технические решения, например (рис. 12, 25, 26), позволяют включать любые формы в общий ортогональный баланс.

80. Сейчас уже разработаны активные компенсаторы токов любой формы. Но для их работы мало энергетического обоснования Фризе, требуется еще информационное обеспечение. Требуется получение упреждающего управляющего сигнала о пассивном токе. Последнее технически возможно методами прогнозирования. Анализ сигналов в таком «техническом» аспекте

позволяет выделить из них регулярные (повторяющиеся от периода к периоду) и случайные энергетические составляющие. Они оказываются в квадратуре, а значит возможно еще одно ортогональное представление. Повторяемость регулярной составляющей позволяет ее выделить и сформировать сигнал ее прогноза (рис. 16). Измерение регулярной и случайной составляющих является научным обоснованием возможности применения активных компенсаторов в конкретных установках. Например, в токе выпрямителей гальванических ванн должна преобладать регулярная составляющая, а токе дуговой печи ее доля упадет.

19.7. Корни дерева новой теории

81. Автору пособия даже немного страшно, что он вырастил такое большое дерево новой теории в конце века. У этого дерева были все научные основания вырасти в начале века.

82. Росту помешала постановка самого начала курса «Переменный ток» в ТОЭ еще в начале века (см. главу 3). Курс начинается сразу с синусоиды, тем более через вращение вектора (рис.5). И это сформировало такой мощный фундамент электротехнического ПОДСОЗНАНИЯ, что росток нового дерева сразу оказался под ним. Как видно из изложения материала пособия, обращение к синусоиде нигде не потребовалось. Констатируется, что в мощных системах ток синусоидален, а невязка получается косинусоидальной, но в формулах это нигде не используется. Поэтому на последней лекции курса «Переменный ток», можно рассказать об удивительных свойствах синусоиды. Это (рис. 7), баланс (3.18) и другое. Лекцию лучше начать с вопроса: «Мы с вами много говорили о формах вообще. Теперь подумайте, есть ли такая форма, которая...»

83. Представляется, что новую теорию должны сразу понять и принять студенты, так как заложенные в нее фундаментальные мысли очень просты и их немного. Сложнее всего ее принять сторонникам уже созданных энергетических школ. На действующую практику новая теория мало повлияет, так как ее предложения нигде не вступают в конфликт с ней (понятие реактивной энергии практически отвергнуто, расчеты уже идут по максимуму полной мощности, сильных искажений в энергосистемах нет, разработки специалистов преобразовательной техники правильные и т.д.). Кстати, это плохо для новой теории.

84. У нетронутого никем дерева столько нетронутых ветвей, что новые предложения льются из рога изобилия в таком количестве, что некогда обдумывать их качество. Автор заранее согласен, что многие предложения и технические решения пособия являются еще сырыми, требуют доработки и проверки на практике.

19.8. Социально-психологические проблемы новой теории

Сейчас будет поднят вопрос, которым могут заняться психологи и социологи, но материалы им должны предоставить инженеры. Описать это можно только от первого лица, хотя это не принято в научной литературе.

Искажения пришли в сети с появлением ионных (затем полупроводниковых) преобразователей. И поэтому специалисты по преобразовательной технике первыми занялись изучением этой сложной проблемы. Написано большое число научных публикаций, созданы школы. Но солидная публикация покойного Н.А Мельникова [31] сразу вызвала у меня чувство «взаимного психологического непонимания». И дело не в научных предложениях книги, я с ними не согласен, но я со многими книгами не согласен. Книга написана человеком другой психологии, он настолько отрицал все наработанное специалистами по преобразовательной технике, что не захотел даже писать список литературы, написав, что есть много публикаций, с которыми он не согласен. И далее между строк читается эта совсем другая психология.

Однажды мне пришлось делать научный доклад в МЭИ на энергетической кафедре (может даже, где работал Н.А. Мельников) и там возникла конфликтная ситуация, когда я задал безобидный контрвопрос маститому ученому: «А зачем вы повышаете косинус фи?» Вопрос был воспринят оскорблением. В кулуарах среди молодых инженеров я спросил их: «А разве вы повышаете косинус фи не для экономии энергии?» В ответ ЕДИНОГЛАСНО прозвучал смех: «Активные сопротивления в энергосистемах настолько малы, что никакой экономии там быть не может. Мы косинусом фи регулируем напряжение в сетях, и тиристорные компенсаторы реактивной мощности создаются только для этого».

Через какое-то время на конференции по преобразовательной технике я задал аудитории тот же вопрос: «Зачем вы повышаете косинус фи?» Последовал ЕДИНОГЛАСНЫЙ ответ: «Для экономии энергии». «А для регулирования напряжения?» – спросил я. Это вызвало у всех смех.

Таким образом, с точки зрения разрабатываемой теории существуют две непонимающие друг друга социальные группы: электрики и энергетики. Объединяет их только общий курс ТОЭ. Все они знают законы геометрии электрических аппаратов, знают, что в мощных аппаратах падает доля активного сопротивления, но одно дело знать, другое иметь к этому отношение. Вот и получаются две группы с разным коллективным подсознанием. Как после этого электрик может спорить с энергетиком, например, о сложнейшей формуле (15.4), если они не могут объяснить друг другу, зачем повышают «косинус фи». Хорошо, что предлагаемая электриком здесь трактовка полной мощности связывается не с потерями, а с капитальными затратами в энергосистемах. Может, примут теорию обе социальные группы?

ЛИТЕРАТУРА

54. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.

55. Лохов С.П. Возможности оптимизации энергетических режимов трехпроводных сетей с помощью компенсаторов// Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: ЧПИ, 1984. – С. 104–112.

56. Лохов С.П. Возможности повышения энергетических показателей промышленных сетей с применением вентильных преобразователей без накопителей// Тезисы докладов к совещанию «Преобразовательная техника в энергетике (ПТЭН-84)». – М.: Информэнерго, 1984. – С. 51–52.

57. Лохова С.П. Энергетические составляющие мощности вентильных преобразователей. Однофазные цепи. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1999. –Ч.1.– 106 с.

58. Файнштейн Э.Г. К вопросу о полной мощности многофазной электрической цепи// Известия вузов. Энергетика, 1963. – №7. – С. 30–37.

59. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – Киев: Наукова думка, 1979. – 203 с.

60. Хохлов Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных агрегатов. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 355 с.

61. Чиженко И.М. Выпрямители с опережающим углом сдвига// Информационное письмо 3/37. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 110 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Сергей Прокопьевич Лохов
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ МОЩНОСТИ ВЕНИТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
Часть 2
МНОГОФАЗНЫЕ ЦЕПИ
Учебное пособие
Техн. редактор А.В.Миних
Издательство Южно-Уральского государственного университета

ЛР N 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 18.08.99. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л.7,21. Уч.-изд. л.7,30. Тираж 150 экз. Заказ 244/362. Цена 8 р. 40 к.

УОП Издательства. 454080, г.Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.