

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 1  
ОДНОФААЗНЫЕ 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.  
ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ: Учебное пособие. – Челябинск: Изд.  
ЮУрГУ, 1999. – Ч.1. – 106 с.

Учебное пособие состоит из двух частей. В первой части последовательно развивается концепция Фризе энергетических составляющих полной мощности. Фризе рассмотрел один электроприемник. Б.С. Замараев наметил развитие этой концепции на сети электроснабжения с параллельным соединением электроприемников, автор пособия сумел перенести все это на самый общий случай произвольной цепи с однофазным питанием. В итоге предложена качественно новая теория энергетического баланса Фризе–Замараева–Лохова. Эта теория могла бы быть создана еще в начале века, но методологическая ошибка преподавания в курсе ТОЭ самых первых основ переменного тока помешала этому.

Вторая часть продолжает развитие теории на трехфазные трехпроводные и двухфазные цепи.

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

Замечания по данному пособию можно направить по электронной почте:

Lokhov1945@mail.ru

Ил. 18. табл. 10. список лит. –53 назв.

Одобрено учебно-методической комиссией  
энергетического факультета

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

@ Издательство ЮУрГУ, 1999.

ISBN 5-696-01229-9

## ВВЕДЕНИЕ

«Нет ничего хуже неточных наблюдений,  
подтверждающих неточную теорию».

Л.А. Арцимович.

Вопросам определения, расчета, улучшения энергетических составляющих в электрических цепях и сетях посвящено множество учебников, научных публикаций, патентов. Поэтому следует выделить только обзорную информацию Б.С. Замараева [6] и Я.Ю. Солодухо [39, 40], а также книгу Г.С. Зиновьева [8] с обзором всех направлений. Далее следуют упомянуть монографии сторонников конкретных часто непримиримых направлений: Р. Дрехслера [4], А.Ф. Крогериса и др. [34], К.А. Круга [13], О.А. Маевского [30], Н.А. Мельникова [31], В. Сарва [38], Г. Супруновича [41]. Можно говорить уже о многостовольном дереве энергетических теорий. Бурное внедрение в нашу жизнь вентильных преобразователей придало практическую значимость данному, казалось бы, теоретическому вопросу. Недаром из приведенного списка только К.А. Круг и Н.А. Мельников не являлись узкими специалистами в области какой-нибудь ветви преобразовательной техники.

Жесткая критика разных направлений дана в упомянутых обзорах. Авторы направлений подтверждали свою истинность «на практике» для простейшего случая линейной сети синусоидального питания и, иногда, доказывали балансируемость по всей цепи. Столь же «строгие» доказательства авторов других теорий просто игнорировались. Именно поэтому эпиграфом взяты слова академика Л.А. Арцимовича. Недостатком критики является ее неконструктивность: нет ничего завершеного взамен.

В пособии под термином «сеть» понимается сеть электроснабжения бесконечной мощности, когда все электроприемники включены параллельно и между ними нет взаимного влияния через напряжение сети. Допускается наличие в сети трансформаторов, включая фазоповоротные в трехфазной сети, но также бесконечной мощности. Под «цепью» понимается общий случай включения элементов этой цепи.

Создание основ новой теории автор пособия начал в 1972 году практическими предложениями по определению базовых энергетических составляющих и управлению обобщенным преобразователем [49, 50]. Позднее такие предложения были «сделаны» другими авторами у нас и зарубежом и получили признание, например, [46]. Специалист по энергетическим теориям может воскликнуть: «Я уже где-то читал это у других авторов». Но, во-первых, у автора учебного пособия на все это

есть авторские свидетельства, во-вторых, все это получает завершённое логическое развитие. Получить полное завершение удалось только через четверть века в публикациях [27, 28], когда пришло осознание, что причиной всех неудач явилось нечёткое изложение начала раздела «Переменный ток» в курсе ТОЭ. Заложенные там понятия стали обыденным сознанием любого электрика и энергетика, а ошибки обыденного сознания почти невозможно обнаружить (падение предметов на землю было столь обыденным для людей явлением, что тысячи лет они не могли догадаться, что Земля притягивает предметы). Для подробного анализа ситуации выбран классический учебник «Основ теории цепей» [33]. Суть обнаруженного парадокса состоит в том, что в учебнике формально нет ошибки! Но, как говорят программисты, по умолчанию этот учебник формирует такое обыденное сознание, внутри которого уже невозможно создать общую теорию балансируемых энергетических составляющих.

Уже после получения основных положений предлагаемой теории автор «обнаружил», что два фундаментальных принципа предложены ранее С. Фризе [45] и Б.С. Замараевым [5, 6, 7], которому совсем немного не хватило до завершающего шага. Работе Фризе 30-х годов повезло тем, что она сейчас признана классической и все на нее ссылаются, и не повезло тем, что ее из-за этого не читают в подлиннике. Не читал до некоторых пор и автор пособия. Малоизвестные публикации Б.С. Замараева написаны трудным языком и просто были не поняты. Оба предложения реферированы в пособии, но можно познакомиться с ними и в обзоре [6].

Фризе сделал первый шаг и исследовал только один (!) электроприемник и разложил его два электрических сигнала произвольных форм на ортогональные на периоде рассмотрения составляющие, применил для этого оптимизационные принципы нахождения минимума потерь энергии при передаче той же активной мощности. Далее Б.С. Замараев сделал второй шаг и рассмотрел уже «сеть» с тремя электрическими сигналами, повторяя в остальном Фризе. В данном пособии сделан третий шаг и рассматривается уже «цепь» с четырьмя электрическими сигналами и показывается, что описанные шаги оказываются обычными этапами известной функциональной ортогонализации Грама-Шмидта, которую можно производить в любом порядке и даже с потерей шагов Фризе и Замараева. Итогом является получение набора формул баланса энергетических составляющих во всевозможных формах, включая интегральные и векторные с применением качественно новой системы комплексных чисел.

Новым качеством предлагаемой теории являются «четвертичные», а не обычные «квадратичные» формы балансов, и относительный, а не абсолютный характер получаемых величин. Новое качество находится на столь низком фундаментальном уровне, что предлагаемая теория является по сути новым отдельным деревом, а не продолжением какого-то известного ствола.

Задачи нахождения минимума чего-то совпадают с решением задач нахождения максимума другого внутри одной сути рассматриваемого явления. Для развиваемой теории через поиск максимума активной мощности при тех же потерях выводится понятие «полной мощности». Автору известно, что такой подход был применен в работах прежде всего Л.С.Лурье [29] для трехфазной сети несимметричного синусоидального напряжения. Кто является автором определения полной мощности однофазной сети через анализ на максимум, автору пособия не известно. Обнаружено полное совпадение результатов анализов на нахождение минимума и на нахождение максимума при произвольных формах токов и напряжений, что названо «зеркальным отражением» одной физической сути.

Во второй части пособия рассматривается новый энергетический баланс в трехпроводной цепи, для чего пришлось сделать четвертый шаг и временную ортогонализацию дополнить пространственной. Эти четыре шага являются центральным стволом нового дерева теорий.

Ответвления нового дерева начаты опять с анализа одного (!) электроприемника в переходных режимах и режимах с очень большим периодом. Начаты и не закончены.

Предлагаемая теория нигде не вступает в конфликт с существующей практикой разработки вентильных преобразователей и компенсаторов. Она конфликтует только с существующими теориями. Главная формула интегрального баланса энергетических составляющих защищена патентом России [53].

Замечания по данному пособию можно отправить на электронный адрес Интернет автора: [lokhov1945@mail.ru](mailto:lokhov1945@mail.ru)

# 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ОДНОГО ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКА В СЕТИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

## 1.1. Реферат статьи С.Фризе [45]

С.Фризе рассмотрел один произвольный электроприемник, подключенный к однофазной сети произвольного напряжения при произвольном токе (рис.1 а)

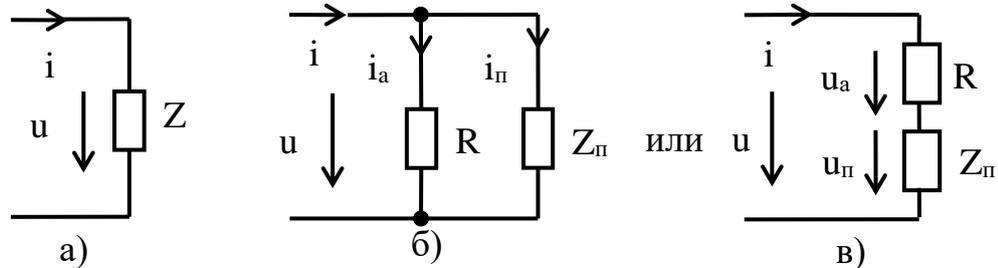


Рис. 1

Ссылаясь на то, что известно из математики неравенство Шварца

$$\left[ \int_a^b f(x) \cdot g(x) dx \right]^2 < \left[ \int_a^b f^2(x) dx \right] \cdot \left[ \int_a^b g^2(x) dx \right] \quad (1.1)$$

превращается в равенство при пропорциональности подынтегральных функций

$$f(x) = k \cdot g(x), \quad (1.2)$$

он предложил разложить ток  $i$  на активную  $i_a$  (повторяющую форму напряжения сети и получающую за интервал рассмотрения ту же энергию, что и весь ток) и пассивную  $i_{п}$  (невязку до тока, не потребляющую энергию или ортогональную с напряжением сети и активным током) составляющие:

$$i = i_a + i_{п}. \quad (1.3)$$

Указанным свойством обладает чисто активное сопротивление. Описанному случаю однофазной сети Фризе ставит в соответствие эквивалентную схему (рис.1 б). Симметричной реализацией формулы (1.2) является выделение из напряжения его активной составляющей (повторяющей форму тока и т.д.) чему Фризе поставил в соответствие эквивалентную схему (рис.1 в)

$$u = u_a + u_{п}. \quad (1.4)$$

Далее через общепринятые определения мощности, среднеквадратичного напряжения и тока за произвольный интервал рассмотрения  $T$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \, dt; \quad (1.5)$$

$$U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 \, dt; \quad (1.6)$$

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \, dt \quad (1.7)$$

им получены значения коэффициента пропорциональности в формуле (1.2) для обоих вариантов. В первом варианте (рис.1 б)

$$i_a = \frac{P}{U^2} \cdot u \quad (a) \quad (1.8)$$

$$i_{\text{п}} = i - i_a. \quad (б)$$

а взаимная ортогональность проявляется в соотношениях

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i_a \, dt; \quad (1.9)$$

$$\int_0^T u \cdot i_{\text{п}} \, dt = 0; \quad \int_0^T i_a \cdot i_{\text{п}} \, dt = 0. \quad (1.10)$$

Если теперь в формулу для среднеквадратичного значения тока (1.7) подставить его разложение (1.3), то с учетом ортогональности (1.10) получится важное выражение

$$I^2 = I_a^2 + I_{\text{п}}^2. \quad (1.11)$$

Действующие значения определяются через корни квадратные из соответствующих среднеквадратичных значений (1.6), (1.7), (1.11). Определяются действующие значения и для полученных ортогональных составляющих. Из формул (1.8 а), (1.9) через них выражается активная мощность

$$P = U \cdot I_a. \quad (1.12)$$

По аналогии с (1.12) Фризе вводит понятие пассивной мощности

$$P_{\text{п}} = U \cdot I_{\text{п}}. \quad (1.13)$$

Теперь сумма квадратов двух мощностей с учетом формулы (1.11) приводит к признанной «формуле Фризе»:

$$S^2 = U^2 \cdot I^2 = P^2 + P_{\Pi}^2. \quad (1.14)$$

Аналогичные операции были проведены для варианта (рис.1 в), они дали симметричные формулы, не имеющие практического применения в реальных сетях электроснабжения и забытые. При этом конечная формула (1.14) не изменилась.

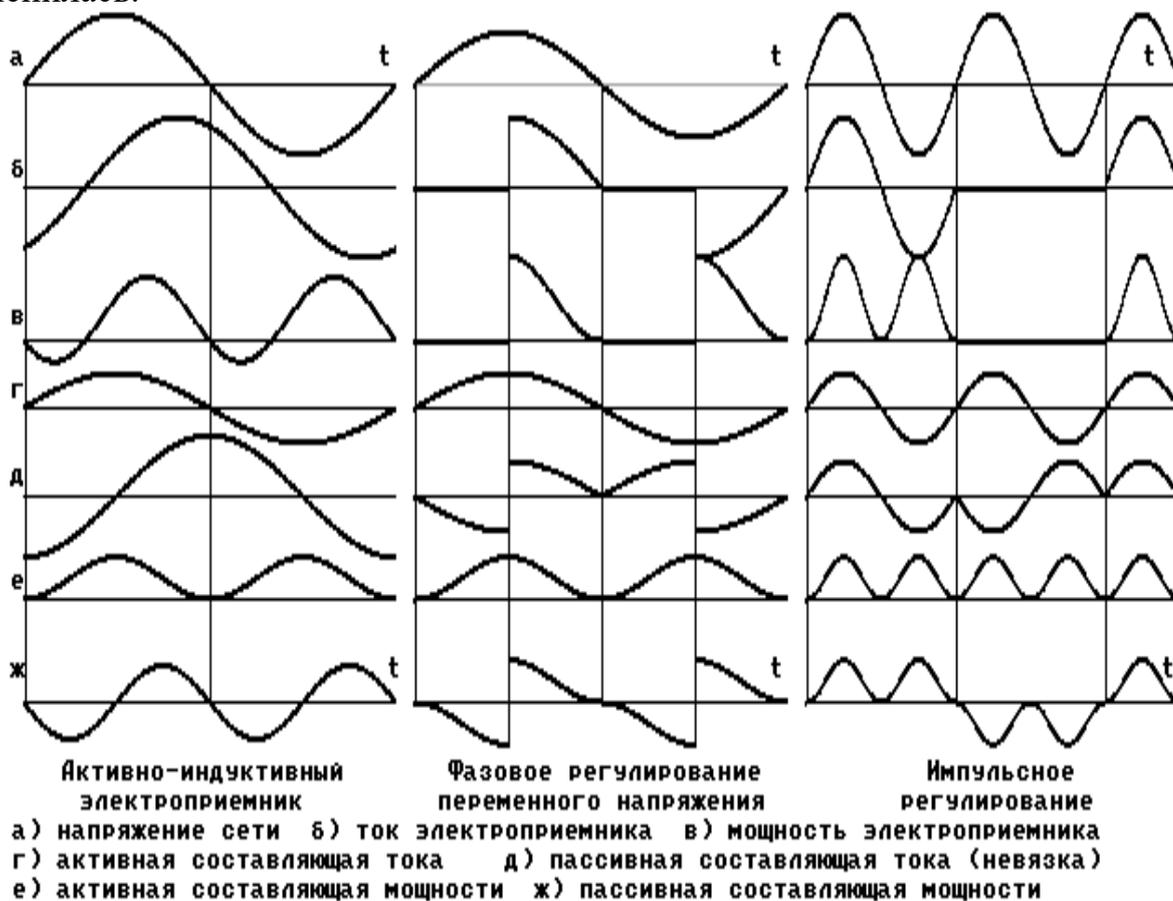


Рис. 2

Поскольку пассивные составляющие не потребляют энергии (1.10), то Фризе предложил их скомпенсировать. Для иллюстрации приведены примеры сигналов напряжения и тока абстрактных очень сложных многоступенчатых

форм и их разложения на предлагаемые составляющие. На рис.2 приведены упрощенные примеры диаграмм сигналов при работе трех вариантов конкретных электроприемников. Следует обратить внимание на диаграмму активной составляющей тока ( $\gamma$ ) и мгновенной пассивной мощности ( $\zeta$ ), среднее значение которой равно нулю (1.10) и она может быть поэтому скомпенсирована устройством без источника энергии.

Статья Фризе написана на немецком языке, имеет свою терминологию. Термин «пассивный» автор пособия взял у С.И.Кирпатовского [11]. Можно было бы ввести термин «неактивный», но есть специальный ГОСТ на терминологию, запрещающий негативные термины. При синусоидальных режимах мгновенный пассивный ток (1.8) совпадает с реактивным, можно было бы закрепить за ним термин «реактивный», но в сознании людей его определение слишком уж связано со сдвиговыми операциями, а автор пособия категорически не приемлет их. У Фризе соответствующий термин может быть переведен как «слепой», но возможны и другие варианты. Термин «невязка» поддержан почти всеми, но слишком много составляющих являются «невязками» при разных подходах, так что этот термин используется как дежурный (как аккумулятор в ЭВМ) для обозначения чего угодно, чего не хватает до полного баланса на данный момент анализа. Статья Фризе заканчивается словами, что все написанное легко переносится на трехфазные сети.

Таким образом, С.Фризе предложил разложение сигналов на две мгновенные ортогональные функции (1.10), начал с определения именно активной составляющей, а остальное определил как невязку, указал на необходимость компенсации последней и обосновал физичность формулы (1.14), хотя сама формула применялась и ранее для синусоидальных сигналов, при которых пассивная мощность совпадает с реактивной, определенной из других соображений. Тогда ее называют формулой К.Будеану, который опубликовал ее гораздо раньше.

Сейчас написанные формулы будут еще раз получены, но другими методами. Именно такое изложение и рекомендуется в студенческом курсе после определения понятий переменный периодический ток произвольной формы, его периода  $T$ , интегральных показателей активной мощности (1.5), среднеквадратичных (действующих) значений напряжения (1.6) и тока (1.7). Также студенты должны знать о тепловом действии тока и вызываемых потерях. Они должны знать, что эти потери надо передать окружающей среде, а это приводит к необходимости увеличения сечения проводников и габаритов электрических аппаратов, прежде всего, трансформаторов, они должны знать работу трансформатора. Переменные сигналы можно рисовать произвольной

формы, можно пользоваться синусоидальной формой, как на (рис. 2). Но не надо связывать эту форму с вращением векторов, не надо анализировать диаграмму реальной мгновенной мощности (в) на рисунке, не надо вводить классические мнимые единицы до завершения предлагаемого курса!

## 1.2. Полная мощность электроприемника и его энергетические составляющие при короткопериодических сигналах

Пусть к однофазной сети (рис. 1 а) подключен один электроприемник, известны мгновенные напряжение  $u$  и ток  $i$  сети и электроприемника.

Сейчас признано большинством ученых, что полную мощность сети целесообразно определить как максимально возможная активная мощность сети (1.5) при сохранении напряжения и другом пока неопределенном оптимальном токе  $i_{\text{опт}}$  с тем же среднеквадратичным значением (1.7). Последнее ограничение называется в математике изопериметрической связью. После такой формулировки получается вариационная задача. Подробнее познакомиться с вариационными методами можно в книге [3]. Поставленная задача является элементарной. Для ее решения из двух подынтегральных выражений (1.5), (1.7) формируется вспомогательная функция с неопределенным множителем, с этим множителем берется функция связи (1.7)

$$F^* = u \cdot i_{\text{опт}} + \lambda \cdot i_{\text{опт}}^2 . \quad (1.15)$$

В этой функции мы имеем известный сигнал напряжения сети  $u$ , а на место известного тока  $i$  подставлено значение сигнала тока неизвестной оптимальной формы  $i_{\text{опт}}$ , при которой и обеспечится достижение максимума. От этой функции берется частная производная по искомой неопределенной функции и приравнивается нулю

$$\frac{dF^*}{dt_{\text{опт}}} = u + 2 \cdot \lambda \cdot i_{\text{опт}} = 0 . \quad (1.16)$$

Оптимальный ток оказался повторяющим форму напряжения сети

$$\begin{aligned} i_{\text{опт}} &= - (1/2\lambda) \cdot u = \quad (a) \\ &= \frac{I}{U} \cdot u. \quad (б) \end{aligned} \quad (1.17)$$

Значение неопределенного коэффициента в правой формуле (1.17 а), получено после ее подстановки ее в выражение (1.7). Результат (1.17 б) надо подставить в формулу (1.5) и получить искомое значение полной мощности сети и электроприемника:

$$S = P_{\text{макс}} = U \cdot I. \quad (1.18)$$

Допустимо и другое определение, когда полная мощность сети определяется как максимально возможная активная мощность сети (1.5) при сохранении тока и другом пока неопределенном оптимальном напряжении с тем же среднеквадратичным значением (1.6). Конечная формула получается такой же (1.18), а доказательство симметричным вышеприведенному.

Теперь можно решить саму задачу Фризе вариационными методами. Активная составляющая тока (рис.1 б) имеет пока неопределенную, но оптимальную форму  $i_{\text{опт}}$ , обеспечивающую минимум ее среднеквадратичного значения (1.7) при том же напряжении сети и передающую ту же активную мощность (1.5). По сравнению с предыдущей задачей поменялись местами функционал и изопериметрическая связь. Вспомогательная функция, ее частная производная, оптимальная форма тока получают аналогичными преобразованиями:

$$F^* = i_{\text{опт}} + \lambda \cdot u \cdot i_{\text{опт}} ; \quad (\text{а}) \quad (1.19)$$

$$\frac{dF^*}{dt_{\text{опт}}} = 2 \cdot i_{\text{опт}} + \lambda \cdot u = 0, \quad (\text{б})$$

$$i_{\text{опт}} = - (1/2\lambda) \cdot u = \quad (\text{а}) \quad (1.20)$$

$$= \frac{P}{U^2} \cdot u. \quad (\text{б})$$

Полученная оптимальная форма определяет искомую активную составляющую тока по Фризе (1.8 а). Далее определяется невязка или пассивная составляющая тока, показывается их взаимная ортогональность и т.д. Аналогично для схемы (рис.1 в) активная составляющая напряжения имеет пока неопределенную, но оптимальную форму, обеспечивающую минимум среднеквадратичного значения (1.6) при том же токе сети и передающую ту же активную мощность (1.5). Дальнейший вывод получается симметричным вышеприведенному с конечным результатом как у Фризе:

$$u_{\text{опт}} = \frac{P}{I^2} \cdot i. \quad (1.21)$$

Как видно, данный параграф интересен не только другим методом доказательства, но и указанием на зеркальную связь определений понятий активной составляющей тока по Фризе и полной мощности сети (фидерного трансформатора). Первое применение вариационных методов для доказательства опубликовано автором пособия в книге [2].

### 1.3. Энергетические показатели сети

Энергетические показатели представляют собой какие-то относительные числовые характеристики энергопроцессов. Они должны быть понятными, общепринятыми, ответственными за что-то. Первым классическим показателем является коэффициент полезного действия, характеризующий бесполезные потери энергии внутри электроприемника.

Вторым общепринятым показателем является коэффициент мощности (1.22)

$$\chi = \frac{P}{S} = \quad (\text{а})$$

$$= \frac{UI_a}{UI} = \frac{I_a}{I} = \quad (\text{б}) \quad (1.22)$$

$$= \frac{U_a I}{UI} = \frac{U_a}{U} . \quad (\text{в})$$

Он характеризует степень неоправданного вредного воздействия электроприемника на сеть (трансформатор). Действительно, электроприемнику требуется мощность  $P$ , а он загружает сеть гораздо большей полной мощностью  $S$ . Поскольку активная мощность выражается через произведение действующего значения одного электрического сигнала на действующее значение активной составляющей другого, то схеме (рис.1 б) соответствует форма записи (1.22 б), а (рис.1 в) – (1.22 в).

Активные составляющие определяются технологической нагрузкой, поэтому логичнее их взять за базу при определении энергетических показателей. Так и поступили в системах электроснабжения, введя для синусоидальных режимов коэффициент «тангенс фи»

$$\text{tg}(\varphi) = \frac{Q}{P} = \frac{I_p}{I_a} = \quad (\text{а}) \quad (1.23)$$

$$= \frac{I_n}{I_a} . \quad (\text{б})$$

Здесь в формуле (а) фигурируют еще не изученные реактивная мощность  $Q$  и реактивный ток  $I_p$ , но в формуле (б) «предлагается» ввести аналогичный показатель для пассивного тока.

Анализ формы записи (1.22 в) приводит к интереснейшим следствиям. Можно предположить на месте эквивалентного сопротивления без потерь  $Z_n$  в схеме (рис.1 в) идеальный ключ, который не имеет потерь. Сопротивление  $R$  представляет реальную чисто активную нагрузку. Тогда схема (рис.1 в)

превращается в реальный простейший ключевой преобразователь переменного напряжения. Действующее напряжение на нагрузке  $U_n$  совпадает с действующим значением активной составляющей  $U_a$  и формула (1.22 в) превращается в формулу связи коэффициента мощности и глубины регулирования реального преобразователя:

$$\chi = \frac{U_n}{U}. \quad (1.24)$$

Эта формула была выведена в 1965 г. С.Г. Обуховым с «классических» энергетических позиций [32], близкие по смыслу формулы достаточно сложно получены для других типов преобразователей электроэнергии, например, выпрямителей. Профессор В.А.Лабунцов называл схему из ключа и активного сопротивления (то есть – рис.1 в) «пробным камнем» для всех разрабатываемых энергетических теорий, да и автор пособия провел много исследований схемы такого преобразователя [2]. Во время этих исследований автор еще не знал, что Фризе дал и второй вариант определения активной составляющей в виде схемы замещения (рис.1 в). Теперь оказывается, что формула (1.24) получается не в результате какого-либо доказательства, а по ОПРЕДЕЛЕНИЮ, по самому факту присоединения к концепции Фризе! Классиков надо читать в подлиннике!

Следующими «общепринятыми» энергетическими показателями являются коэффициенты сдвига (известный всем «косинус фи») и искажений. Введение этих показателей методологически преждевременно в рамках новой теории и даже вредно.

#### 1.4. Ответственность электроприемника перед сетью электроснабжения

Единственный электроприемник отвечает перед сетью электроснабжения дважды и в разных качествах (по разным ставкам), он должен расплачиваться:

- 1) за потребленную активную энергию;
- 2) за загрузку сети электроснабжения полной мощностью.

За первым стоят экономические затраты на строительство электростанций выработку первичных энергоносителей и на сопутствующие траты. За вторым стоят затраты на линии электропередачи, трансформаторы и потери активной энергии и на сопутствующие траты. Понятно, что четких экономических границ тут быть не может, но пассивная мощность проявляет себя только во втором качестве, а активная – в двух. По современным двухставочным тарифам электроприемник платит энергосистеме за потребленную энергию (первая

ставка) и за получасовой максимум активной и реактивной мощностей в часы максимума энергосистемы (вторая ставка). Теория Фризе и предлагаемая в данном пособии «имеют отношение» только к этой второй ставке. В формуле Фризе (1.14) активная мощность на равную с пассивной мощностью отвечает за загрузку энергосистемы и тут же отдельно отвечает за потребленную энергию. Двойственность проявления чего-либо известна в физике, например, такое простое понятие как масса на самом деле проявляет себя и как тяжелая масса (в произведении двух притягивающихся масс  $M \cdot m$ ), и как инертная масса (коэффициент пропорциональности  $m$  в формуле ускорения массивного тела).

Термин «мощность» достаточно четко определен во всех физических явлениях и в понятии активная мощность в электрических цепях. Приходится добавлять эпитет «активная» ради дальнейшего противопоставления ее другим «мощностям», хотя под мощностью в физике понимается только активная мощность. Известны связанные с этим понятием фундаментальные законы сохранения и баланса. Хотелось бы иметь такие же законы для полной и пассивной мощностей уже потому, что они были названы «мощностями».

Любые терминологические споры в этом направлении могут стать бесконечными. Поэтому предлагается внутри концепции Фризе ввести более обтекаемый термин «ответственность». Например: «Ответственность за загрузку сети электроснабжения полной мощностью поделена между двумя электроприемниками на 40% и 60%». Дело в том, что все измерения разных составляющих в сетях электроснабжения должны закончиться расчетом ответственности каждого электроприемника перед сетью. В данном пособии решена эта задача расчета ответственности за загрузку сети электроснабжения, но стоит начать вводить промежуточные «мощностные» термины, как начнется бесконечный спор. Если предлагаемый конечный энергетический баланс ответственностей будет принят, то вопросы терминологии будут постепенно решены. Если же не будет принят, то и спорить не о чем.

Все известные энергетические теории предлагается сопоставлять по трем критериям. Предлагается назвать первым «критерий ответственности». То есть все предлагаемые энергетические составляющие должны отвечать за какой-то понятный материальный ущерб. В предлагаемой теории все энергетические составляющие будут нести прямую ответственность за загрузку сети электроснабжения полной мощностью. Далее будут введены критерии «справедливости» и «практической реализуемости».

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ В СЕТИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Концепции Фризе в пределах материала главы 1 оказалось достаточно для оценки работы любых электроприемников, всех известных компенсированных или компенсирующих преобразователей. Все они или в одиночном исполнении, или при параллельной работе с произвольным потребителем, или при параллельной работе с себе подобными преобразователями должны обеспечить энергетически оптимальный общий ток. Перед источником питания все упомянутые группы выступают как ОДИН ЭЛЕКТРОПРИЕМНИК, и этот один электроприемник несет одну ответственность перед сетью. Разделить эту ответственность между электроприемниками позволяет любая теория балансируемых (суммируемых) энергетических составляющих, например, активных и реактивных мощностей отдельных элементов при синусоидальных сигналах. Но ни одна известная теория не продолжает концепцию Фризе. Единственное прямое продолжение сделано Б.С.Замараевым. Предложения автора пособия опубликованы в работах [19,... 22, 52].

### 2.1. Автор пособия о предложении Б.С.Замараева [5, 7]

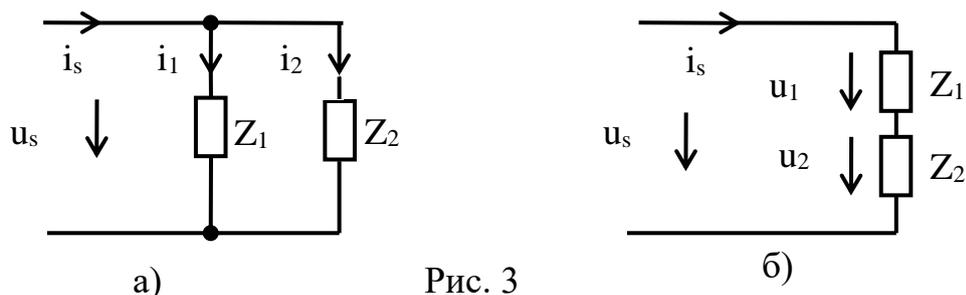


Рис. 3

В своих работах Б.С.Замараев рассматривает многофазную сеть электроснабжения произвольного напряжения. Вводится качественно новая терминология для всех составляющих, например, активные токи названы «трансмиссионными» и т.д. Ниже все эти термины не поддерживаются. Решается и старая задача Фризе по минимизации потерь в сети, и новая задача разделения ответственностей за потери между одним рассматриваемым многофазным электроприемником и всеми остальными электроприемниками, объединенными в один второй «эквивалентный» электроприемник. Упростим задачу до однофазной схемы (рис.3), в которой есть рассматриваемый электроприемник  $Z_1$  и все прочие электроприемники, приведенные к «эквивалентному»  $Z_2$ .

В сети имеется непоказанное на рисунке сопротивление активных потерь  $r$ , но такое маленькое, что не влияет на напряжения электроприемников. С точки зрения принятой в пособии терминологии такое допущение соответствует тому, что рассматривается «сеть», а не «цепь». Мгновенные потери в сопротивлении могут быть выражены формулами

$$\begin{aligned}
 \Delta p_s &= r \cdot (i_1 + i_2)^2 = (a) \\
 &= r \cdot (i_1^2 + 2 \cdot i_1 \cdot i_2 + i_2^2) = (б) \\
 &= r \cdot (i_1^2 + i_1 \cdot i_2) + (в) \\
 &\quad + r \cdot (i_1 \cdot i_2 + i_2^2). \quad (г)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Формулы (в) + (г) делят сетевые потери (б) между двумя электроприемниками. При этом формула (в) определяет потери в сети из-за первого электроприемника  $\Delta p$ , которые состоят из «собственных потерь» (член  $i_1^2$ ) и потерь второго «эквивалентного» электроприемника (член  $i_1 \cdot i_2$ ). Аналогично формулой (г) определяются потери из-за второго электроприемника  $\Delta p_{s2}$ , баланс потерь выполняется. Этой зависимости можно дать физическую интерпретацию, представляя, что при равномерном распределении тока по поперечному сечению сетевого проводника токи занимают различные участки, площади которых пропорциональны токам.

В работе [5] также показано, что пассивные составляющие токов по Фризе различных электроприемников имеют различные формы и их надо разделить на пассивные составляющие первого рода, которые суммируются в общем сетевом пассивном токе и вызывают потери, и пассивные составляющие второго рода, которые при этом суммировании полностью взаимно компенсируются и не вызывают потерь. Автор предлагаемого пособия называет первые составляющие балансируемыми, а вторые – небалансируемыми. Таким образом, вместо взаимно ортогональных сигналов активного и пассивного токов по Фризе, появляются взаимно ортогональные сигналы активного, балансируемого пассивного и небалансируемого пассивного токов по Замараеву.

В работе [7] предпринята попытка решить вариационными методами эту же задачу с учетом влияния падения напряжения на сетевом сопротивлении, то есть перейти от частной задачи «сети» к общей задачи «цепи». Вообще, неудачные попытки Б.С.Замараева опубликовать то, что ему не удалось сделать для цепи, помешали ему сформулировать и осознать свои удачи для сети.

## 2.2. Начало теории относительного энергетического баланса для сети

Формулу (2.1 в) мгновенной ответственности первого электроприемника за потери в сети следует преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta p_{s1} &= r \cdot (i_1^2 + i_1 \cdot i_2) = \text{(а)} & (2.2) \\ &= r \cdot i_1 \cdot (i_1 + i_2) = \text{(б)} & . \\ &= r \cdot i_1 \cdot i_s . & \text{(в)} & .\end{aligned}$$

Суть изменилась мало, иначе расставлены скобки, но вместо трудно измеряемого «эквивалентного» тока других электроприемников появляется простой сигнал тока сети и исчезает проблема деления потерь на «собственные потери» и какие-то еще.

Теперь можно считать ток электроприемника не 1-м, а произвольным  $k$ -м. Интегрированием формулы (2.2) за период напряжения сети получается формула усредненной или интегральной ответственности  $k$ -го электроприемника за потери в сети

$$\Delta P_{sk} = \frac{r}{T} \int_0^T i_s \cdot i_k dt = r \cdot (i_s, i_k). \quad (2.3)$$

С этой формулы вводится очень удобное для записей обозначение скалярного произведения  $(x, y)$  двух  $T$ -периодических функций времени  $x(t)$  и  $y(t)$ .

Только в случае сети типа (рис. 3) сумма токов всех электроприемников равна току сети  $i_s$ , тогда сумма скалярных произведений  $(i_s, i_k)$  равна  $(i_s, i_s)$  или  $I_s^2$  – квадрату действующего тока сети. Для  $k$ -го элемента сети можно написать интегральную формулу

$$S_{sk}^2 = U_s^2 \cdot (i_s, i_k), \quad (2.4)$$

с балансом по всем  $N$  элементам сети, равным полной мощности (1.14)

$$\sum_0^N S_{sk}^2 = S_s^2. \quad (2.5)$$

Формулу (2.4) назовем интегральной формулой ответственности  $k$ -го элемента сети за загрузку сети полной мощностью. Эта формула требует глубокого осмысления, непринятие ее приводит к непринятию всей теории Фризе – Замараева – Лохова.

Пока единственным критерием истинности формулы (2.4) является ее балансируемость к полной мощности сети (2.5), что означает ее соответствие введенному в главе 1 критерию «ответственности». Но общая ответственность

может быть поделена между электроприемниками несправедливо. Поэтому предлагается ввести второй критерий истинности – принцип «справедливости». Это самый трудно доказуемый критерий. Всегда приходится «убеждать» в справедливости, а не «доказывать» ее. В рассматриваемом случае член  $2 \cdot i_1 \cdot i_2$  в формуле (2.1 б) был поровну поделен между членами в формулах (2.1 в) и (2.1 г). И надо убедить читателя, что это самое справедливое деление, хотя можно было бы какому-то члену дать больше. Если поделить ответственность не поровну, то надо будет признать наличие несимметрии в электрических сетях, а последствия такого признания не предсказуемы для курса ТОЭ. Будем считать на этом «убеждения» законченными, а формулу энергетического баланса (2.4) отвечающей критерию «справедливости».

В качестве третьего и последнего критерия истинности теории предлагается принять принцип практической «реализуемости». Реализуемость должна быть обеспечена в «реальном масштабе времени», а результаты измерений могут быть использованы для управления, например, реальным компенсатором.

Этим требованием автору пособия хотелось бы, например, отсечь огромный поток энергетических теорий, построенных на основе преобразований Гильберта. Эти преобразования требуют полной информации о сигналах в прошлом и будущем, а последнее невозможно в реальном масштабе времени. Однако сторонники этих теорий не принимают данные доводы и утверждают, что они могут произвести все необходимые расчеты на ЭВМ по записям сигналов в прошлом и дать результаты на прошедшие моменты времени. То есть у предлагаемого третьего принципа есть противники.

Что касается предлагаемой теории, то формулы (2.2 в), (2.4) позволяют с помощью обычных умножителей рассчитать даже мгновенную ответственность на данный момент времени. Для экономических расчетов могут быть использованы обычные индукционные счетчики энергии, обмотка напряжения которых подключается через преобразователь «ток – напряжение» одному из токов так, что счетчик будет интегрировать сигнал скалярного произведения  $(i_s, i_k)$ . Такое включение счетчика известно для интегрирования квадрата тока сети или  $(i_s, i_s)$  [4]. Таким образом, предлагаемая теория отвечает критерию «реализуемости».

Весь следующий анализ развивает формулу (2.4), а значит он сохраняет ее основные свойства. Поэтому уже сейчас интересно изучить особенности этой базовой формулы.

Новая величина  $S_{sk}^2$  имеет размерность квадрата полной мощности  $[В \cdot А]^2$ , но может быть отрицательной в режиме генерации или компенсации. Поэтому в записи  $S_{sk}^2$  двойка понимается как верхний индекс, указывающий на упомянутую размерность. Можно было бы вести новую букву для обозначения этой величины, но при таком обозначении формула баланса (2.5) смотрится красивее. В курсе ТОЭ изучаются балансы активных и реактивных мощностей с размерностью  $[В \cdot А]$ . Значит, подходы к решению проблемы различаются даже по размерности.

В функциональных преобразованиях большинства энергетических теорий участвуют только два сигнала  $u$  и  $i$  (рис. 1), принадлежащие и сети, и электроприемнику, все эти теории являются «двухсигнальными», их функциональные соотношения носят АБСОЛЮТНЫЙ характер. На (рис. 3) и в формуле (2.4) появляется третий сигнал  $i_s$  тока сети. Новая теория изначально становится «трехсигнальной», что лишает смысла вопрос о ее сопоставлении с другими. Присутствие в функциональных соотношениях сетевых сигналов делает их ОТНОСИТЕЛЬНЫМИ. Все получаемые результаты будут носить относительный характер, они будут различными в часы максимума и минимума энергосистемы. Более того! Относительность предлагаемой теории проявляется и в том, что значение получаемых энергетических составляющих одного и того же электроприемника будут различными в зависимости от того, относительно какой точки энергосистемы мы их измеряем, в различных точках энергосистемы форма тока  $i$  различная.

### 2.3. Ортогональные функции Фризе – Замараева

В сети (рис. 3) напряжение сети и электроприемников одно и то же, поэтому это напряжение задает формы всем активным составляющим

$$i_{Sa} = \frac{(u_s, i_s)}{(u_s, u_s)} \cdot u_s; \quad i_{ka} = \frac{(u_s, i_k)}{(u_s, u_s)} \cdot u_s. \quad (2.6)$$

Здесь уже знакомые нам величины  $P_s$ ,  $P_k$ ,  $U_s^2$  записаны в формах скалярных произведений.

Невязки определяют пассивные составляющие сети  $i_{sp}$  и приемника  $i_{kp}$

$$i_{sp} = i_s - i_{Sa}; \quad i_{kp} = i_k - i_{ka}. \quad (2.7)$$

Первая вся влияет на потери энергии в сети и на полную мощность сети.

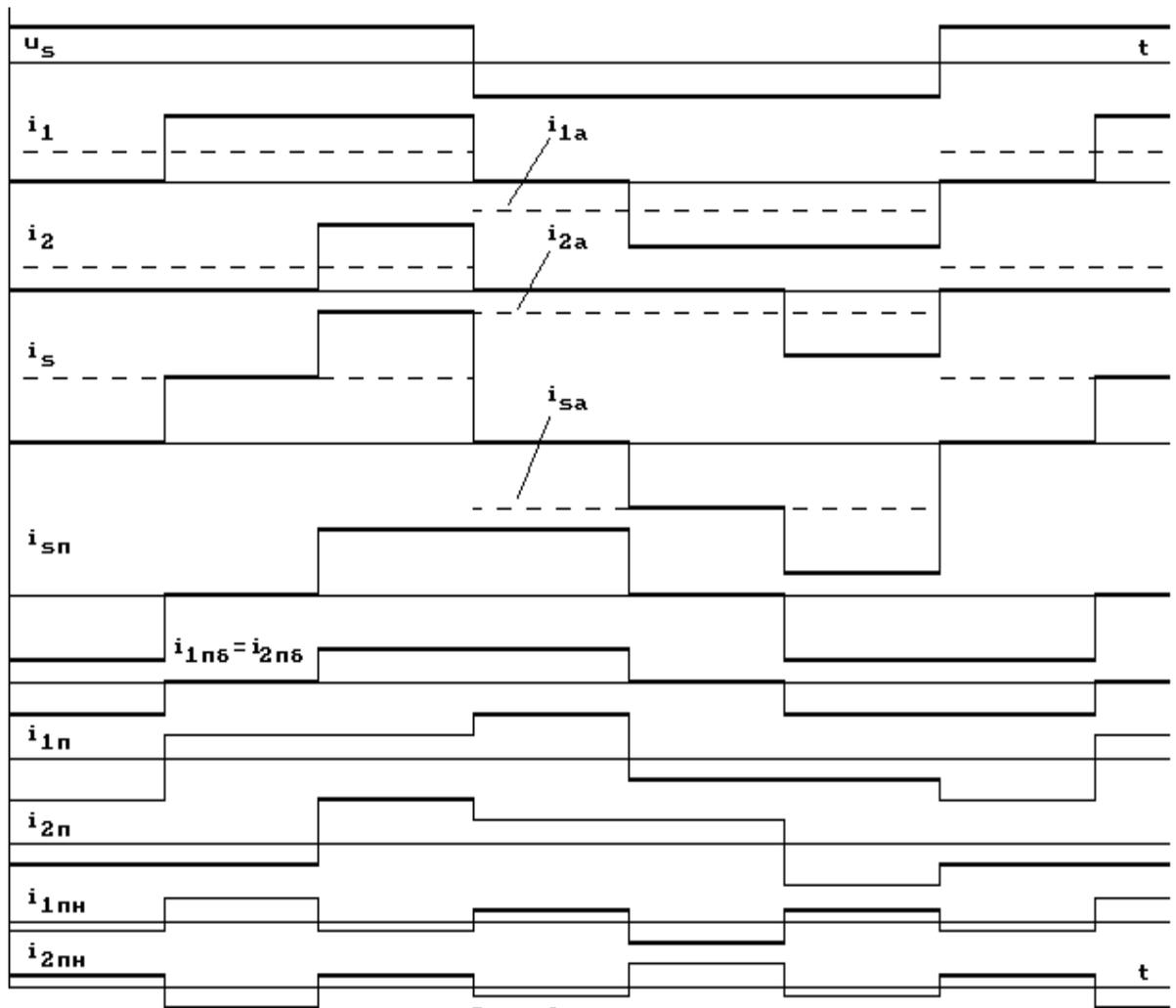


Рис. 4

Вторая влияет только балансируемой частью своего пассивного тока  $i_{кпб}$ , которая замыкается через сеть. Небалансируемая  $i_{кпн}$  замыкается (компенсируется) через другие электроприемники

$$i_{кп} = i_{кпб} + i_{кпн} . \quad (2.8)$$

Подобное возможно, когда  $i_k$  повторяет форму  $i_{sn}$ . Это очень похоже на нахождение активных составляющих с формой  $u_s$  (2.6), поэтому и формула расчета получается похожей

$$i_{кпб} = \frac{(i_{Sn}, i_{кп})}{(i_{Sn}, i_{Sn})} \cdot i_{Sn} = \frac{(i_{Sn}, i_{кп})}{(i_{Sn}, i_{Sn})} \cdot i_{Sn} . \quad (2.9)$$

Между полученными составляющими много соотношений взаимной функциональной ортогональности, которые и позволяют написать несколько форм формул, например, две формы выражения (2.9):

$$\begin{aligned} (i_{Sa}, i_{Sn}) &= 0; & (a) & . \\ (i_{Sa}, i_{кп}) = 0; \quad (i_{Sa}, i_{кпн}) &= 0; \quad (i_{Sa}, i_{кпб}) = 0; \quad (i_{Sa}, i_{кпнн}) = 0; & (б) & (2.10) \\ (i_{Sn}, i_{ka}) &= 0; \quad (i_{Sn}, i_{кпнн}) = 0; & (в) & . \\ (i_{ka}, i_{кп}) = 0; \quad (i_{ka}, i_{кпб}) &= 0; \quad (i_{ka}, i_{кпнн}) = 0; & (г) & . \\ (i_{кпб}, i_{кпнн}) &= 0. & (д) & . \end{aligned}$$

На рис. 4 приведен пример разложения сигналов для сети с двумя электроприемниками. Ответственность перед сетью электроснабжения несут только активные и балансируемые пассивные составляющие.

#### 2.4. Первое приближение к интегральной формуле относительного энергетического баланса

Формула (2.4) позволяет найти ответственность каждого электроприемника сети за полную мощность сети, но она не содержит привычных для энергетического баланса «мощностных» величин. Ее можно преобразовать с использованием соотношений предыдущего параграфа:

$$\begin{aligned} S_{Sk}^2 &= U_S^2 \cdot (i_{Sa} + i_{Sn}, i_{ka} + i_{кпб}) = & (a) & . \\ &= U_S^2 \cdot (i_{Sa}, i_{ka}) + U_S^2 \cdot (i_{Sn}, i_{кпб}) = & (б) & . \\ &= U_S^2 \cdot \left( \frac{P_s}{U_s^2} \cdot u_s, \frac{P_k}{U_s^2} \cdot u_s \right) + U_S^2 \cdot (i_s, i_{кп}) = & (в) & (2.11) \\ &= P_s \cdot P_{Sk} + U_S^2 \cdot (i_{Sn}, i_k). & (г) & . \end{aligned}$$

Формула (2.11 г) замечательна своим членом активного баланса  $P_s \cdot P_k$ . Активная мощность по разному выступает в балансах ответственности за потребленную энергию в виде  $P_k$  и в балансах ответственности за полную мощность в виде  $P_s \cdot P_k$ . О разных размерностях балансов уже упоминалось. Как тут не вспомнить аналогию с инертной массой, когда она выступает как  $m$ , и с тяжелой массой, когда она выступает в произведении  $m \cdot M$ .

Формула (2.11 г) подсказывает симметричную форму записи второго члена в виде произведений реактивных мощностей  $Q_s \cdot Q_k$ .

## 2.5. Появление реактивного тока

При синусоидальных (в смысле формы независимо от сдвигов) сигналах формулы (1.8 б), (2.7), (2.8) определяют пассивные составляющие (балансируемые и нет) таких же форм, точнее косинусоидальных. Таковую же форму имеет «реактивная» составляющая тока в классическом курсе ТОЭ. При несинусоидальных сигналах концепция Фризе определяет соответствующую сложную форму пассивного тока, в названии которого нет никакого единства.

С появлением формулы (2.11 г) ситуация кардинально меняется, теперь в энергетическом балансе участвует не пассивный ток электроприемника сколь угодно сложной формы, а пассивный ток сети  $i_{ст}$ . Форма этого тока в больших энергосистемах складывается из большого числа сложных форм пассивных токов отдельных электроприемников и поэтому приближается по форме к косинусоиду! Действительно, если представить токи электроприемников бесконечным рядом гармоник, то первые гармоники синфазны с напряжением сети и суммируются арифметически, чем выше гармоника, тем случайнее значение ее фазы и она суммируется геометрически. Известна примерная аппроксимация этих законов суммирования. При арифметическом суммировании токов  $N$  электроприемников равной мощности результат увеличивается пропорционально  $N$ . При геометрическом суммировании результат возрастает пропорционально корню  $N$ . Получается, что абсолютное значение гармоник по мере увеличения числа электроприемников возрастает, но их относительное значение падает. Подтверждение этого можно найти в книге ученого и практика Н.А.Мельникова [31], который утверждает, что не видел ни в одном токе мощных энергосистем сколь либо заметных несинусоидальностей. Поэтому можно смело принимать форму тока  $i_{ст}$  косинусоидальной или чисто «реактивной». Однако надо помнить, что в один и тот же момент времени в одной точке энергосистемы реактивный ток может быть опережающим, а в другой – отстающим. С этого места и далее будут применяться и термин «пассивный», и термин «реактивный». «Пассивный» может применяться во всех случаях, «реактивный» – для мощных сетей электроснабжения, а также тогда, когда следует отделять косинусоидальную составляющую от других.

Активные составляющие токов имеют синусоидальную форму напряжения в мощных сетях. После этого предлагаемые ортогональные преобразования становятся похожими на хорошо известный в курсе ТОЭ метод гармонической

линеаризации при анализе нелинейных цепей или на расчеты по первой гармонике. Это не должно опорочить новизну предлагаемой теории по следующим причинам:

1) новая теория является новым фундаментальным обоснованием известного метода на область мощных сетей электроснабжения или цепей, где токи источников синусоидальны;

2) полученные старым методом результаты будут подставляться в новые формулы типа (2.11 г) для участия в неизвестном ранее балансе ответственностей;

3) старые методы подтверждены практикой, а новая теория нигде не вступает в конфликт с практикой;

4) старая гармоническая линеаризация не предполагала синфазность гармонических преобразований с напряжениями сети. Последнее замечание будет понятно после рассмотрения трехфазных цепей.

До сих пор все выводы осуществлялись для любых форм токов и напряжений. В последнем параграфе появились термины «синусоида», «реактивная составляющая». Настало время открыть учебник ТОЭ.

### 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ПИТАНИЯ В КУРСЕ ТОЭ

#### 3.1. Переменный синусоидальный ток однофазной цепи в курсе ТОЭ

Здесь приведены некоторые цитаты из учебника [33]. После общих определений периодического тока и напряжения, их среднеквадратичных значений (1.6), (1.7) авторы переходят к синусоидальной обобщенной величине (ток, напряжение, магнитный поток)

$$v = V_m \cdot \sin(\omega t + \varphi). \quad (3.1)$$

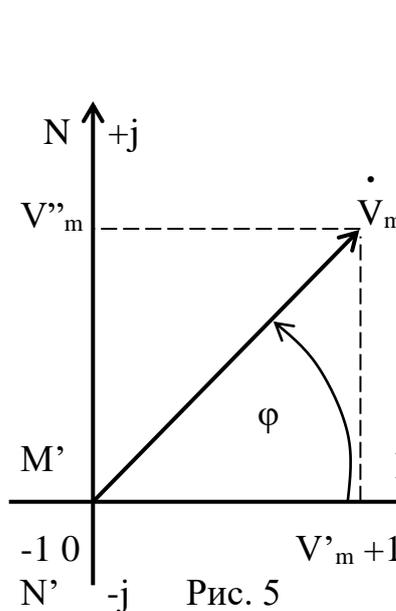


Рис. 5

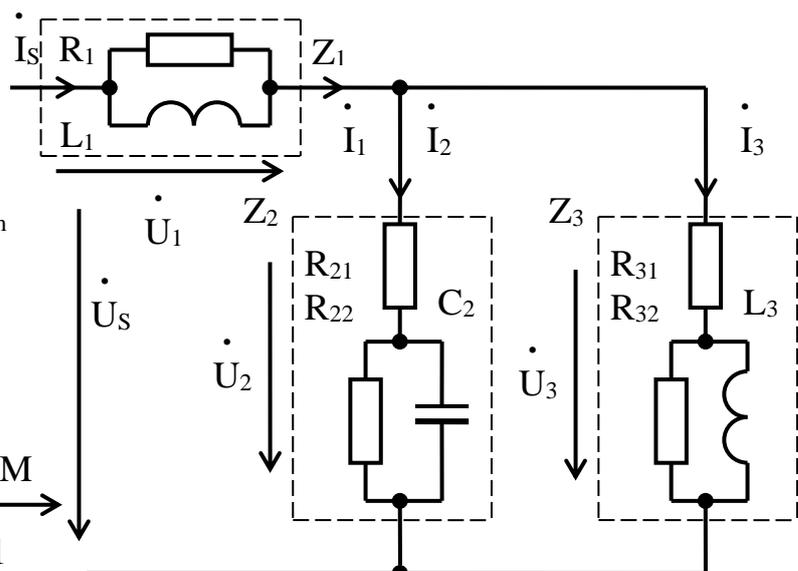


Рис. 6

Возьмем прямоугольную систему осей MON. Расположим под углом  $\varphi$  относительно горизонтальной оси OM вектор  $V_m$ , длина которого в масштабе равна амплитуде величины (положительные углы откладываются против движения часовой стрелки). Представим себе, что вектор с нулевого момента времени начинает вращаться вокруг начала координат O против направления движения часовой стрелки с постоянной угловой скоростью, равной угловой частоте  $\omega$ . Можно также оставить вектор неподвижным и начать вращать ось N'N по направлению движения часовой стрелки. В обоих случаях проекция вектора на ось N'N (линию времени) равна в масштабе мгновенному значению рассматриваемой величины (3.1). Таким образом, между мгновенным значением (3.1) и вектором (рис. 5) можно установить однозначную связь. Говорят о векторах напряжения, тока и т.д. Если считать ось MM' осью вещественных (действительных) чисел ( $-1..+1$ ), а ось NN' – мнимых ( $-j..+j$ ) на комплексной плоскости, то вектор (рис. 5) соответствует комплексному числу, модуль которого равен  $V_m$ , а аргумент – углу  $\varphi$ . Это комплексное число называется комплексной амплитудой рассматриваемой величины (в другом месте авторы вместо амплитуды используют действующее значение, что гораздо удобнее). Комплексную амплитуду можно записать в полярной, показательной, тригонометрической и алгебраической формах (единственную мнимую единицу почему-то чаще принято обозначать  $j$ , а не  $i$ ):

$$\dot{V}_m = V_m \angle \varphi = V_m \cdot \exp(j\varphi) = V_m \cdot (\cos\varphi + j \cdot \sin\varphi) = V_m' + j \cdot V_m'' \quad (3.2)$$

Если вектор (рис. 5) вращается против часовой стрелки, то ему соответствует комплексная мгновенная величина (3.3). Значение ее мнимой части равно синусоидально изменяющейся величине (3.4).

$$\dot{v} = V_m \cdot \exp(j(\omega t + \varphi)) = V \cdot \cos(\omega t + \varphi) + j \cdot V \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.3)$$

$$\dot{v} = \text{Im} \{ V_m \cdot e^{j\omega t} \} \quad (3.4)$$

Комплексный метод введен в электротехнику американским ученым и инженером Ч.Штейнмецем (Ch. Steinmetz). Он позволяет ввести также понятия комплексных сопротивлений и проводимостей двухполюсника (элемента цепи) как комплексных коэффициентов пропорциональности между его током и напряжением.

Рассматривается подключение двухполюсника к источнику (сети электроснабжения), а полученные выводы полностью совпадают с анализом Фризе схемы (рис. 1), включая графические представления (рис. 1 б) и (рис. 1 в) с выделением активного сопротивления, но для линейного двухполюсника и синусоидальной сети. В выводах только пассивные составляющие названы

реактивными и обе составляющие представлены не мгновенными значениями, а комплексами. Мгновенным балансам (1.3), (1.4) соответствуют комплексные (3.5), а ортогональные балансы (1.11) и (3.6) вообще совпадают. Более того, для рассматриваемого случая анализ Фризе дает совпадение всех составляющих по мгновенным значениям.

$$\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_p ; \quad \dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_p ; \quad (3.5)$$

$$I^2 = I_a^2 + I_p^2 ; \quad U^2 = U_a^2 + U_p^2 . \quad (3.6)$$

Ортогональный баланс токов приводит к ортогональному балансу мощностей (3.7). Появляется полная мощность и реактивная мощность  $Q$  и ранее приведенное выражение для коэффициента мощности (1.24), которое в рассматриваемом случае совпадает с косинусом угла сдвига (3.8):

$$S = U \cdot I ; \quad S^2 = P^2 + Q^2 ; \quad (3.7)$$

$$\chi = \cos\varphi = P/S ; \quad (3.8)$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi ; \quad Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi . \quad (3.9)$$

Для лучшего использования аппаратов желательно иметь более высокий коэффициент мощности (стремятся получить 1). Например, для питания приемника мощностью 10000 кВт при  $\cos\varphi = 0.7$  источник питания должен быть рассчитан на (полную) мощность 14300 кВА. Высокий коэффициент мощности желателен также для уменьшения потерь при передаче энергии по линиям. При данной активной мощности приемника ток в линии тем меньше, чем больше значение коэффициента мощности. При расчетах электрических цепей находит применение так называемая реактивная мощность  $Q$  (3.9), она положительна при отстающем индуктивном токе ( $\varphi > 0$ ) и отрицательна при опережающем емкостном ( $\varphi < 0$ ). Единицу измерения называют ВАр. Для увеличения коэффициента мощности приемника нужно, очевидно, уменьшать его реактивную мощность. В то время как активная мощность  $P$  определяет совершаемую работу или передаваемую энергию в единицу времени, полная  $S$  и реактивная  $Q$  мощности не определяют ни совершаемой работы, ни передаваемой энергии  $W_a$  за единицу времени. Однако в электроэнергетике рассматривают некоторую величину, которую называют условно реактивной энергией  $W_p$ . Во избежании путаницы приходится добавлять термины «активная» и «реактивная» и ввести разные размерности Вт·ч и ВАр·ч.

$$W_a = P \cdot t ; \quad W_p = Q \cdot t . \quad (3.10)$$



Кирхгофа для всех контуров данной цепи. Тогда это доказательство более общей теоремы Телледжена: баланс псевдомощностей (3.14) выполняется для произвольных сигналов данной цепи, лишь бы для токов выполнялись первые законы Кирхгофа, а для напряжений – вторые.

Полезно привести пример конкретного расчета линейной цепи из трех элементов  $Z_1, Z_2, Z_3$  (рис. 6) комплексным методом с действующими значениями комплексов. Все единицы даны в системе СИ, поэтому для сокращения записи Вольты, Амперы, Омы, Ватты опущены:

$$U_s = 6, \quad R_1 = 1, \quad R_{21} = 2/3, \quad R_{22} = 4/3, \quad R_{31} = 1, \quad R_{32} = 1, \\ X_{L1} = 0.5926, \quad X_{C2} = 1, \quad X_{L3} = 0.17777. \quad (3.16)$$

Результаты расчета (3.17) подтверждают выполняемость всех балансов напряжений и токов по законам Кирхгофа, активных и реактивных мощностей.

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= 2.56 + j \cdot 1.92, & \dot{I}_1 &= 5.8 - j \cdot 2.4, & \dot{S}_1 &= 10.24 + j \cdot 17.28, \\ U_2 &= 3.44 - j \cdot 1.92, & I_2 &= 3 + j \cdot 0, & S_2 &= 10.33 - j \cdot 5.76, \\ U_3 &= 3.44 - j \cdot 1.92, & I_3 &= 2.8 - j \cdot 2.4, & S_3 &= 14.23 + j \cdot 2.88, \end{aligned} \quad (3.17)$$

-----

$$\dot{U}_s = 6 + j \cdot 0, \quad \dot{I}_s = 5.8 - j \cdot 2.4, \quad \dot{S}_s = 34.8 + j \cdot 14.4.$$

При  $U_s^2 \cdot I_s^2 = 36 \cdot (33.64 + 5.76) = 36 \cdot 39.4 = 1418.4.$

### 3.2. Критический анализ представленного курса

Следует обратить внимание на то, что качественно другим методом для синусоидальных форм получены выводы Фризе (1.3), (1.4), (1.11) для произвольных форм, отмечена двойственность влияния снижения коэффициента мощности и на полную мощность линии электропередачи, и на потери в ней, что в пособии названо зеркальным проявлением одной сути. Суть эта связана с потребностями практики, связана с реальными экономическими затратами и поэтому не является «академическим интересом»

Фризе берет за основу эту экономическую суть и получает результаты оптимизационными методами, не связывая себя какими-то формами. Курс ТОЭ начинается почему-то с вращения вектора, что рождает самую удивительную, самую «гармоничную» из всех возможных периодических функций – синусоиду. Можно написать не одну оду удивительным свойствам синусоиды. Например: «Придумайте такую форму сигнала, что, если подать его на вход линейной системы неизвестной сложности, то на выходе получится такая же форма». Но автору пособия хочется привести более ядовитый пример:

«Придумайте сигнал такой формы, что, сколь ни антагонистичны были бы теории энергетических балансов, на этой форме все они дадут одинаковый результат». Опасно делать выводы на самой уникальной форме!

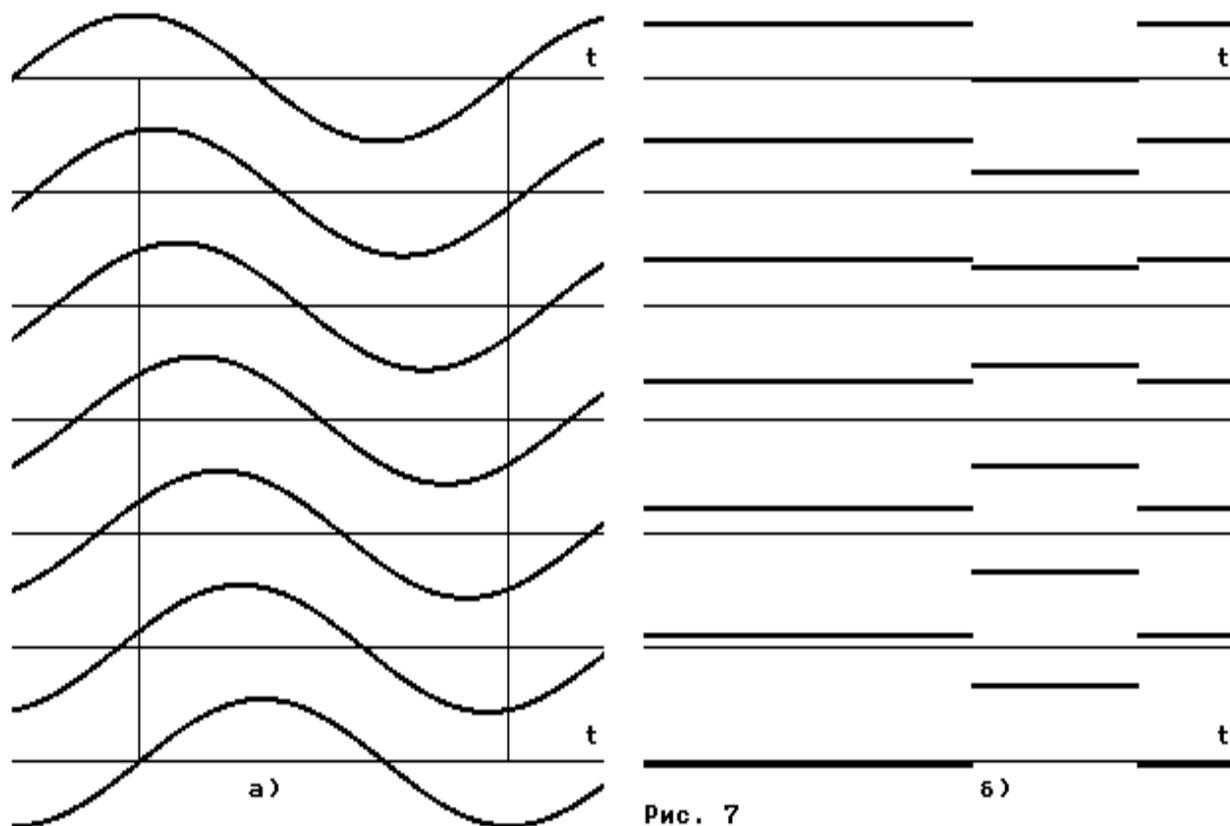
С первого знакомства с переменным током понятие реактивной мощности связывается с мощностными процессами, с запасением энергии, ее обменом. Концепция Фризе не выступает против потоков энергии. Если бы в результате оптимизационного анализа они получились, то пусть будут правы сторонники этих теорий энергопотоков. Но пока этого не получается! Не получаются и графики мгновенной мощности, а только мгновенные токи и напряжения!

Совершенно недопустимо введение в учебник ТОЭ безобидной на вид и правильной для синусоиды формулы (3.15 б). Эта формула начинает одну из ветвей энергопоточковых теорий [6, 39, 40]. Студенты еще не представляют, что в учебниках могут быть ошибки, а им для начала жизненного пути дают формулу одной ветви дерева энергетических теорий, не упоминая о других.

Используется понятие сопряженного комплекса, когда меняют знак перед мнимой частью. В одной части стоит синус, в другой – косинус. Синус и косинус являются взаимно ортогональными функциями. Это то, что используется в концепции Фризе и будет далее использоваться в пособии. Но помимо этого косинус является еще и сопряженной функцией для синуса в математике. Это разные «сопряжения», но совпадение терминов влияет на подсознание. Появляется мысль о глубинной связи форм активных и пассивных составляющих, что достаточно знать только форму напряжения сети, а вторую ортогональную форму можно получить через функцию сопряжения (учат же в ТОЭ получать реактивную мощность умножением на сопряженный комплекс), то есть через преобразование Гильберта. Так родилась самая модная в настоящее время энергетическая теория [6, 39, 40]. Она родилась по двум причинам: 1) упомянутый неудачный выбор синусоиды и косинусоиды для начала курса; 2) неудачное применение одного термина «сопряженный» для разных действий. Конечно, авторы учебника не имеют права менять общепринятый термин, но надо же что-то тут делать! Например, внутри концепции Фризе даже не возникает мысль, что формы активных и пассивных составляющих как-то связаны. Связь же форм синусоиды и косинусоиды представляется слишком очевидной. Опять не надо начинать курс с синусоиды.

Гораздо хуже то, что синусоида вводится в курс через рисунок (рис. 5). С этим рисунком связаны две методологические идеи:

- 1) действующее значение любого сигнала может быть графически представлено суммой двух взаимно ортогональных сигналов с соответствующими действующими значениями;
  - 2) перераспределение этой суммы создает эффект вращения вектора, что соответствует сдвигу сигнала по оси времени (поворот тождественен сдвигу).
- Со второй идеей нельзя соглашаться.



На рисунке (рис. 7 а) показаны семь примеров формирования сигнала из суммы двух взаимно ортогональных ортов синусоидальной и косинусоидальной форм с весовыми коэффициентами. Эти коэффициенты плавно перераспределяются так, что сверху получается только один сигнал синусоидальной формы, снизу – только второй минус косинусоидальной формы. На промежуточных диаграммах виден плавный сдвиг результирующей кривой. На правом рисунке (рис. 7 б) выбраны ортогональные орты сигналов прямоугольных форм с равными левым действующими значениями и проведены те же операции с теми же весовыми коэффициентами. То есть, обеспечена полная энергетическая эквивалентность правых и левых рисунков. Глядя на рис. 7 б, можно говорить о чем угодно, только не о сдвиге во времени.

Поэтому нет никакого сдвига и на рис. 7 а, есть только перераспределение, а видимый сдвиг – обман зрения из-за удивительных свойств синусоиды. Так через рис. 5 вводится мысль о возможности сдвиговых операций в энергетических процессах. Отсюда пошли термины «фазоповоротные трансформаторы», «фазосдвигающие цепочки», хотя нет реальных явлений, приводящих к сдвигу или повороту фазы на энергетическом уровне, то есть без потерь и накоплений энергии. Упомянутые трансформаторы являются «фазоперераспределительными»!

Операции сдвига, как и получения сопряженной функции, создает в подсознании ту же опасную мысль, что форма пассивной составляющей тока может быть получена из формы напряжения сети, то есть из формы активной составляющей, причем однозначно, с точностью до знака. Продолжением является мысль, что всегда можно договориться и о знаке полученной «реактивной мощности». Сдвиг в одну сторону – один знак, в другую – другой, осталось договориться! Даже международные конгрессы договаривались об этом знаке.

А теперь еще очень простая мысль. Доказательства Ланжевена и Телледжена выполнены для сигналов, разлагаемых по сетевым функциональным формам или ортам (об этом в следующей главе), по сетевой синусоиде и сетевой косинусоиде. Только поэтому и выполняются оба закона Кирхгофа. Значит, в разложении сигналов произвольного элемента цепи по этим составляющим присутствуют... эти составляющие, сетевые составляющие! Всего в элементном разложении сигналов участвуют четыре сигнала. Теоремы Ланжевена и Телледжена являются четырехсигнальными!

Почему же этот простой факт остался незамеченным? На практике было обнаружено, что баланс активных и реактивных мощностей выполняется для синусоиды при независимом выделении действительных и мнимых членов комплексов напряжения и тока каждого элемента. При этом за базис каждый раз удобно принимать синусоиду напряжения элемента, тогда мнимый член комплекса тока сразу будет определять его реактивную составляющую. Пересчитанный баланс (3.17) для цепи (рис. 6) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= 3.2 + j \cdot 0, & \dot{I}_1 &= 3.2 - j \cdot 5.4, & \dot{S}_1 &= 10.24 + j \cdot 17.28, \\ U_2 &= 3.94 + j \cdot 0, & I_2 &= 2.62 + j \cdot 1.46, & S_2 &= 10.33 - j \cdot 5.76, \\ U_3 &= 3.94 + j \cdot 0, & I_3 &= 3.61 - j \cdot 0.73, & S_3 &= 14.23 + j \cdot 2.88, \end{aligned} \quad (3.18)$$

---


$$\dot{U}_s = 6 + j \cdot 0, \quad \dot{I}_s = 5.8 - j \cdot 2.4, \quad \dot{S}_s = 34.8 + j \cdot 14.4.$$

Пересчет от старых значений токов, например,  $\dot{I}_2$  к новым  $\dot{I}_2'$ , выполнен по формуле

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{I}_2^* U_2}{U^2} = \frac{3 \cdot (3.44 + j \cdot 1.92)}{(3.44^2 + 1.92^2)} = 2.62 + j \cdot 1.46. \quad (3.19)$$

Как видно, в (3.18) не выполняются законы Кирхгофа для токов и напряжений,

например,  $\dot{I}_1 \neq \dot{I}_2 + \dot{I}_3$ , но баланс мощностей выполняется. Например, для второго элемента по разным данным (3.17) и (3.18)

$$\dot{S}_2 = (3.44 - j \cdot 1.92) \cdot (3.0 + j \cdot 0.0) = 10.33 - j \cdot 5.76; \quad (a) \quad (3.20)$$

$$\dot{S}_2 = (3.94 + j \cdot 0.0) \cdot (2.62 - j \cdot 1.46) = 10.33 - j \cdot 5.76. \quad (б)$$

Последний баланс не доказывается формулами (3.13), (3.14), так как теперь формулы первого закона Кирхгофа (3.13) не верны для новых значений (3.18).

По инерции хотелось во всем опять обвинить эту удивительную синусоиду. Но суть явления оказалась чуть сложнее. Это будет рассмотрено в следующей главе. В ней будет предлагаться новая четырехсигнальная теория энергетического баланса, хотя «часть новой стороны» уже присутствует в «старом» доказательстве (3.13), (3.14).

#### 4. БАЛАНСЫ ОТВЕТСТВЕННОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

##### 4.1. Ортогонализация Грама-Шмидта

Ортогонализация (процедура) Грама-Шмидта (I.Gram, E.Schmidt) применяется для образования взаимно ортогональных базисных векторов какой-то системы линейно независимых векторов, линейно независимых на отрезке функций [1]. В радиотехнике такие функции рассматриваются даже в учебниках. Например, в [36] читаем, что в теории широко используется понятие комплексного сигнала

$$\dot{S}(t) = a(t) + j \cdot b(t). \quad (4.1)$$

Используются произведения комплекса на сопряженный комплекс и т.д. То есть дальнейшее применение аппарата обычных комплексных чисел к функциональным ортам тоже известно. Предложения С.Фризе, Б.С.Замараева и автора данного пособия оказываются типичными шагами известной в

математике процедуры ортогонализации Грама-Шмидта для периодических функций времени. После ортогонализации можно будет записать уравнение (2.4) в комплексной форме и перенести его с сети на цепь. Замечательно то, что результатом всегда является конечный ряд периодических функций, значит любая цепь будет описываться в конечномерном векторном пространстве. Значит, и формулы будут давать точные значения при ограниченном числе математических операций. Это еще до пояснений отличает представляемый подход от модных преобразований в бесконечномерных пространствах современных энергетических теорий.

Рассмотрим четыре функциональных сигнала: мгновенные значения напряжения  $u_S$  и тока  $i_S$  однофазного источника питания и напряжения  $u_k$  и тока  $i_k$   $k$ -го элемента внутри произвольной цепи. Формы сигналов произвольны, но периодичны с одним общим для всех сигналом периодом. Минимальная цепь может состоять из трех элементов, как на рис.6. Согласно процедуре Грама-Шмидта через эти сигналы последовательно определяются базисные функциональные орты  $A(t), \dots, D(t)$ , которые взаимно ортогональны  $(A, B) = 0$  и т.д.

$$\begin{aligned} u_S &= A(t) = u_S && ; (a) \\ i_{S\Pi} &= B(t) = K_{11} \cdot u_S + i_S && ; (б) \\ i_{k\Pi\Pi} &= C(t) = K_{21} \cdot u_S + K_{22} \cdot i_S + i_k && ; (в) \\ u_{?k} &= D(t) = K_{31} \cdot u_S + K_{32} \cdot i_S + K_{33} \cdot i_k + u_k . && (г) \end{aligned} \quad (4.2)$$

В выражениях (4.2) сделана попытка дать им ранее принятые для сетей обозначения. Однако, если  $i_{S\Pi}$  точно отражает суть явлений, то  $i_{k\Pi\Pi}$  – пассивная небалансируемая составляющая так обозначена только по инерции лингвистики. Как обозначить четвертую составляющую – вообще не ясно. Обратные преобразования имеют вид:

$$\begin{aligned} u_S &= A(t) && ; (a) \\ i_S &= k_{11} \cdot A(t) + B(t) && ; (б) \\ i_k &= k_{21} \cdot A(t) + k_{22} \cdot B(t) + C(t) && ; (в) \\ u_k &= k_{31} \cdot A(t) + k_{32} \cdot B(t) + k_{33} \cdot C(t) + D(t) . && (г) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Интересно еще раз переписать формулы в более привычных обозначениях, пронумеровав также столбцы в записи

$$\begin{array}{cccc} (1) & (2) & (3) & (4) \\ u_S &= & u_S & ; (a) \\ i_S &= & i_{Sa} + i_{S\Pi} & (Фризе) ; (б) \\ i_k &= & i_{ka} + i_{k\Piб} + i_{k\Pi\Pi} & (Замараев?) ; (в) \\ u_k &= & u_{ka} + u_{k\Piб} + u_{k\Pi\Pi} & u_{k?} , (г) \end{array} \quad (4.4)$$

$$u_S = u_S \quad (a)$$

$$i_S = \frac{(u_S, i_S)}{U_S^2} \cdot u_S + \left\{ i_S - \frac{(u_S, i_S)}{U_S^2} \cdot u_S \right\} \quad (б)$$

$$i_k = \frac{(u_S, i_k)}{U_S^2} \cdot u_S + \frac{U_S^2 \cdot (i_S, i_k) - (u_S, i_S)(u_S, i_k)}{U_S^2 \cdot I_S^2 - (u_S, i_S)^2} \left\{ i_S - \frac{(u_S, i_S)}{U_S^2} \cdot u_S \right\} + \dots \quad (в)$$

(4.5)

$$u_k = \frac{(u_S, u_k)}{U_S^2} \cdot u_S + \frac{U_S^2 \cdot (i_S, u_k) - (u_S, i_S)(u_S, u_k)}{U_S^2 \cdot I_S^2 - (u_S, i_S)^2} \left\{ i_S - \frac{(u_S, i_S)}{U_S^2} \cdot u_S \right\} + \dots \quad (г)$$

Здесь «привычность» состоит в том, что, если «цепь» будет «сетью», то появятся знакомые балансируемые и небалансируемые составляющие Замараева, но в общем случае «цепи» это не они. Поэтому фамилия Замараева стоит с вопросом. Формулы для недостающих членов в (4.5 в,г) очень сложны, члены эти не участвуют в последующих выкладках, поэтому здесь не приводятся.

Но наиболее полезна запись через нормированные орты, то есть для которых при соблюдении взаимной ортогональности еще  $(a,a)=1$ ,  $(b,b)=1$ ,  $(c,c)=1$ ,  $(d,d)=1$  и используются действующие значения знакомых величин

$$\begin{aligned} u_S &= U_S \cdot a(t) && ; (a) \\ i_S &= I_{Sa} \cdot a(t) + I_{Sb} \cdot b(t) && ; (б) \\ i_k &= I_{ka} \cdot a(t) + I_{kb} \cdot b(t) + I_{kc} \cdot c(t) && ; (в) \\ u_k &= U_{ka} \cdot a(t) + U_{kb} \cdot b(t) + U_{kc} \cdot c(t) + U_{kd} \cdot d(t). && (г) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Но надо помнить, что это коэффициенты, а не обычные действующие значения. Так, если правые члены  $U_S$ ,  $I_{Sb}$ ,  $I_{kc}$ ,  $U_{kd}$  всегда положительны, то остальные могут иметь любой знак.

В книге [1] есть формулы для прямых  $K$  и обратных  $k$  коэффициентов в (4.2) и (4.3), но они уже частично приведены в (4.5). Ниже будет показано, что почти нет необходимости в использовании этих формул, так как:

1) аппаратно эти составляющие проще находить в виде последовательной процедуры, чем реализовать сложные формулы для коэффициентов с большими номерами ( $K_{11}$  – простая формула,  $K_{33}$  – очень сложная);

2) при дальнейшем изложении материала эти коэффициенты вообще не потребуются.

Определители систем уравнений получили название определителей Грама. Для двух функций  $u_S$ ,  $i_S$  определитель имеет вид (4.7), для четырех  $u_S$ ,  $i_S$ ,  $u_k$ ,  $i_k$  – (4.8).

$$D_2 = \begin{vmatrix} (u_s, u_s) & (u_s, i_s) \\ (u_s, i_s) & (i_s, i_s) \end{vmatrix} = \quad (a)$$

$$= (u_s, u_s)(i_s, i_s) - (u_s, i_s)(u_s, i_s) = \quad (b) \quad (4.7)$$

$$= [u_s, i_s]^2 = \quad (в)$$

$$= U_S^2 \cdot I_S^2 - P_S^2 = S_S^2 - P_S^2 = P_{Sn}^2; \quad (г)$$

$$D_4 = \begin{vmatrix} (u_s, u_s) & (u_s, i_s) & (u_s, u_k) & (u_s, i_k) \\ (u_s, i_s) & (i_s, i_s) & (u_k, i_s) & (i_s, i_k) \\ (u_s, u_k) & (u_k, i_s) & (u_k, u_k) & (u_k, i_k) \\ (u_s, i_k) & (i_s, i_k) & (u_k, i_k) & (i_k, i_k) \end{vmatrix}. \quad (4.8)$$

В формуле (4.7 в) впервые встречается новое обозначение  $[x, y]$  векторного произведения функций времени, но пояснения этому будут даны ниже. Формула (4.7 г) определяет квадрат пассивной мощности по Фризе.

Нулевой определитель Грама означает, что одна из функций является линейной комбинацией остальных функций. Наиболее физично это видно на примере определителя  $D_2$ , нулевое значение которого указывает на отсутствие пассивной мощности, что получается при линейной зависимости тока и напряжения или, когда ток имеет форму напряжения. Преобразование Грама-Шмидта напоминает решение систем линейных уравнений методом Гаусса. В обоих случаях результат имеет треугольный вид (4.2),... (4.6), в обоих случаях не надо считать определители, а получение конечного результата говорит о ненулевых значениях определителей при решении методом определителей. Таким образом, если после преобразований член  $U_k$  в (4.6) будет не нулевым, то определитель Грама (4.8) – также не нулевой.

Интересно, что ортогонализацию можно проводить в любом порядке, например,  $u_s, i_s, u_k, i_k$  с исчезновением шага Замараева, или  $i_k, u_s, i_s, u_k$  с исчезновением шага самого Фризе. Это никак не повлияет на полученный ниже результат. Вот уж действительно: «Мавр сделал свое дело и может уйти». Более того, ортогонализацию Грама-Шмидта можно рассматривать как один из алгоритмов нахождения коэффициентов при нормированных функциональных ортах. Это удобный для аппаратной реализации алгоритм. Здесь важно получить первую систему представления типа (4.6), далее линейными преобразованиями типа умножения всего на комплексный коэффициент (3.19) из нее можно получить множество других. Например, от нормированных функциональных ортов  $a(t), b(t)$  можно перейти к ортам (4.9 а), также нормированным (4.9 б) и взаимно ортогональным (4.9 в).

$$\begin{aligned}
 a'(t) &= \{a(t) + b(t)\}/2; & b'(t) &= \{a(t) - b(t)\}/2; & (a) \\
 (a', a') &= \{(a, a) + 2 \cdot (a, b) + (b, b)\}/2 = \{1 + 0 + 1\}/2 = 1; & (б) & & (4.9) \\
 (a', b') &= \{(a, a) - (b, b)\}/4 = \{1 - 1\}/4 = 0. & (в) & & 
 \end{aligned}$$

Вообще, подобные преобразования очень просто выполняются на ЭВМ и даже калькуляторе, сложнее сделать первый переход от реальных аналоговых сигналов к этому небольшому количеству чисел. Общая форма записи системы будет иметь вид (4.10) и даже без намеков на «активность», «пассивность», «балансируемость» некоторых членов в сравнении с (4.6).

$$\begin{aligned}
 u_S &= U_{S1} \cdot a(t) + U_{S2} \cdot b(t) + U_{S3} \cdot c(t) + U_{S4} \cdot d(t) + \dots; & (a) \\
 i_S &= I_{S1} \cdot a(t) + I_{S2} \cdot b(t) + I_{S3} \cdot c(t) + I_{S4} \cdot d(t) + \dots; & (б) \\
 u_k &= U_{k1} \cdot a(t) + U_{k2} \cdot b(t) + U_{k3} \cdot c(t) + U_{k4} \cdot d(t) + \dots; & (в) \\
 i_k &= I_{k1} \cdot a(t) + I_{k2} \cdot b(t) + I_{k3} \cdot c(t) + I_{k4} \cdot d(t) + \dots. & (г)
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Более того! Формы представления четырех сигналов через четыре орта – минимально возможные. От них просто перейти к формам большим числом ортов. Далее можно перейти и к бесконечному базису, можно получить и бесконечные ряды Фурье, но теперь обязательно в фазировках с сетевыми сигналами!

#### 4.2. Генеральная идея новой теории.

Все написанное не позволяет еще сделать следующего шага в создаваемой теории, нужна генеральная идея. Такая идея начата формулой (2.4) индивидуальной ответственности электроприемника перед сетью. Ответственность пропорциональна произведению мгновенных токов сети и электроприемника  $(i_S, i_k)$ . Для цепи предлагается также искать ответственность в виде произведений каких-то сетевых и элементных функционалов  $X_S \cdot X_k$  при условии, что баланс всех  $X_k$  по цепи сходится к  $X_S$ . Тогда общий баланс будет  $X_S^2$ . А  $X_S^2$  – какая-то неопределенная ортогональная составляющая полной мощности  $S_S^2$ . Формула энергетического баланса или ответственности  $k$ -го элемента цепи перед сетью электроснабжения должна иметь вид

$$\begin{aligned}
 S_{Sk}^2 &= P_S \cdot P_k + Q_S \cdot Q_k + X_S \cdot X_k + Y_S \cdot Y_k + \dots & (a) \\
 S_S^2 &= P_S^2 + Q_S^2 + X_S^2 + Y_S^2 + \dots & (б)
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

На генеральную формулу (4.11) получен патент [53]. Интересно, что в практических расчетах потерь электроэнергии в системах электроснабжения компенсаторами можно найти члены  $Q_S \cdot Q_k$ , например, на стр. 224 в книге [35]. Это только подтверждает практичность теории.

Далее предлагается из полученных в результате ортогональных преобразований Грама-Шмидта членов сформировать комплексы и определить энергетический баланс в виде их произведений согласно патенту. То есть генеральной комплексной формулой энергетического баланса новой теории является ее запись

$$S_{sk}^2 = \operatorname{Re}\{\dot{S}_s \cdot \dot{S}_k^*\} = \operatorname{Re}\{(\dot{U}_s \cdot \dot{I}_s^*) \cdot (\dot{U}_k \cdot \dot{I}_k)\}. \quad (4.12)$$

Здесь «2» является верхним индексом, указывающим на размерность, а не квадрат. Функционал  $\operatorname{Re}\{\}$  выделяет реальную часть полученного комплекса. Баланс комплекса  $S_k^2$  по всем элементам цепи должен сходиться к  $S_s^2$ . Здесь по инерции оставлено понятие «сопряженного комплекса». В дальнейшем будут получены доводы в пользу отказа от этого понятия. Данное предложение первый раз опубликовано в 1989 г. в работе [23].

Непринятие данной генеральной идеи означает бессмысленность дальнейшего чтения данного пособия. Принявшим идею написанное поможет понять технология создания новой теории. Но потребовалось еще 10 лет на подбор требуемой системы гиперкомплексных чисел, которые удовлетворяли бы также трехфазным цепям. Это были годы «проб и ошибок», что отражено в ряде публикаций [24, 25, 26] и почти не описано в данном пособии, и только в 1996 году было опубликовано окончательное решение предложенной генеральной идеи для однофазной и трехфазной цепей [27, 28]. Как писал А.Ф. Иоффе: «Ученые обманывают читателей: они логично подают то, к чему сами пришли совсем не логическим путем».

### 4.3. Гиперкомплексные числа в математике и в ТОЭ

В вузовском курсе слово «гиперкомплексный» не встречается, но применяемые в нем «комплексные числа» входят в это более широкое понятие. В ТОЭ система «комплексных чисел» введена Ч.Штейнмецем. Это система с одной мнимой единицей и одной действительной. На такой системе определены операции сложения, вычитания, умножения и деления. В математике такая система называется «алгеброй с делением». Известны еще только две такие алгебры: «кватернионов» с тремя мнимыми единицами и «октав» с семью мнимыми единицами. Доказано, что не может существовать других алгебр с делением [10].

Корнями систем гиперкомплексных чисел являются только три возможных тождества: двух квадратов

$$\begin{aligned}
(U_1^2 + U_2^2) \cdot (I_1^2 + I_2^2) &= \text{(а)} \\
&= (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2)^2 + \text{(б)} \\
&\quad + (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1)^2, \text{ (в)}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

четырёх квадратов

$$\begin{aligned}
(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2) \cdot (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2) &= \text{(а)} \\
&= (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3 + U_4 \cdot I_4)^2 + \text{(б)} \\
&\quad + (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1 + U_3 \cdot I_4 - U_4 \cdot I_3)^2 + \text{(в)} \\
&\quad + (U_1 \cdot I_3 - U_2 \cdot I_4 - U_3 \cdot I_1 + U_4 \cdot I_2)^2 + \text{(г)} \\
&\quad + (U_1 \cdot I_4 + U_2 \cdot I_3 - U_3 \cdot I_2 - U_4 \cdot I_1)^2 \text{ (д)}
\end{aligned} \tag{4.14}$$

и восьми квадратов, которое здесь не приводится из-за громоздкости. Например, о выражении (4.14) математики говорят: «Произведение четырех квадратов есть сумма четырех квадратов. Само это выражение не понятно, но при взгляде на (4.14) становится понятным». Здесь вместо привычных математикам  $x$  и  $y$  применены обозначения ортогональных составляющих напряжений и токов. Теперь электрик увидит в строке (а) тождеств (4.13), (4.14) квадрат полной мощности, в строке (б) – квадрат активной мощности, в строке (в) только выражения (4.13) – квадрат реактивной мощности. Под каждое из трех тождеств создана своя система гиперкомплексных чисел (комплексных, кватернионов и октав), которые являются не более как удобным инструментом формирования математических операций под эти тождества. Сперва было тождество, а потом система гиперкомплексных чисел!

Теория комплексного энергетического баланса излагается в курсе ТОЭ. Казалось бы, теории кватернионного и октавного балансов не только возможны, но и не должны противоречить классическому курсу, так как каждая следующая система гиперкомплексных чисел включает в себя предыдущую. Приравняйте нулю все члены с индексами 3 и 4 в тождестве (4.14) и получите тождество (4.13). Автору пособия удалось получить ряд красивых формул в этом направлении [24, 25, 26], но всегда потом находилось «исключение, проверяющее правило».

Неудачей закончилась и попытка автора создать какое-то подобие гиперкомплексного сопротивления элемента цепи. Ниже показано, что новая теория позволяет получить комплексный энергетический баланс после того, как известными методами рассчитаны напряжения и токи всех элементов, но не позволяет рассчитать эти токи и напряжения. Это не получилось даже для обычной системы комплексных чисел, когда все токи и напряжения в системе разложены только по двум функциональным ортам, но произвольной формы.

Только для синусоидальной формы получался и классический комплексный энергетический баланс, и использование комплексных сопротивлений для расчетов сигналов. Опять эта удивительная синусоида! Опять возникает чувство качественного раздвоения понимания сути даже общепринятой системы с одной мнимой единицей. Для расчета сигналов – это одна единица, для баланса мощностей – это другая единица. И только на синусоиде обе сути сливаются.

#### 4.4. Тождества квадратов и формула баланса новой теории

Упомянутая попытка применения кватернионов и октав или, что-то же самое, тождеств четырех и восьми квадратов в электротехнике была сделана формально, без физического обоснования. Неудача заставляет заняться обоснованием тождеств (4.13), (4.14). Со строками (а) и (б) все понятно, но о строке (4.13 в), определяющей пассивную (реактивную для синусоиды) мощность, следует поговорить особо.

Член (4.13 в) количественно оценивает взаимодействие двух сигналов 1-й и 2-й взаимно ортогональных форм. При этом, если форму 1 имеет напряжение, то это будет один знак, а если форму 1 имеет ток, то знак станет противоположным. Такое взаимодействие напряжения и тока известно в электротехнике и не только в энергетическом балансе. Достаточно вспомнить дуальные цепи или экзотические в реализации, но теоретически обоснованные гираторы (трансформаторы тока в напряжение такой же формы). Обычное активное сопротивление обладает эффектом гирации: напряжение на нем имеет форму тока через него, а действие напряжения стремиться уменьшить этот ток, то есть отрицательно по знаку.

Под член (4.14 в) не удастся подвести какое-то физическое обоснование, не известны электротехнические процессы, связывающие между собой четыре разные формы сигналов в элементах цепи. Остается только привлекательное математическое тождество четырех квадратов (4.14). Все сказанное тем более относится к членам тождества восьми квадратов.

Все проблемы решаются, если заменить тождество (4.14) качественно другим (4.15). На математическом жаргоне это тождество может прозвучать не столь красиво: «Произведение четырех квадратов есть сумма семи квадратов».

$$\begin{aligned}
& (U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2) \cdot (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2) = (S^2) \\
& = (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3 + U_4 \cdot I_4)^2 + (P^2) \\
& \quad + (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1)^2 + (1-2) \\
& \quad + (U_1 \cdot I_3 - U_3 \cdot I_1)^2 + (1-3) \\
& \quad + (U_1 \cdot I_4 - U_4 \cdot I_1)^2 + (1-4) \\
(4.15) \quad & \quad + (U_2 \cdot I_3 - U_3 \cdot I_2)^2 + (2-3) \\
& \quad + (U_2 \cdot I_4 - U_4 \cdot I_2)^2 + (2-4) \\
& \quad + (U_3 \cdot I_4 - U_4 \cdot I_3)^2. (3-4)
\end{aligned}$$

Из записи (4.15) сразу становится понятным алгоритм тождества из любого числа квадратов. При этом тождество для двух квадратов в форме записи (4.15) совпадает с классическим тождеством (4.13). Надо еще подумать, является ли это тождество корнем «кустика из трех математических квадратов» или «дерева бесконечных квадратов Лохова». Позже я обнаружил, что «тождество Лохова» (4.15) несколько раньше предложил Лагранж [1]. В печати я публично извинился. Но (4.16) – мое! Всем нижним «пассивным» членам записи (4.15) соответствуют члены энергетического взаимодействия любых пар взаимно ортогональных форм сигналов, что имеет описанное выше физическое объяснение в теории цепей. Теперь могут быть записаны тождества 3-х, 5-ти и т.д. квадратов. Этим тождествам будут соответствовать свои специфические гиперкомплексные числа, в которые входит известная система «комплексных чисел» с одной мнимой единицей, но нет места «кватернионам» и «октавам». Надо как-то иначе назвать эти другие «гиперкомплексные числа». Это сделано ниже. Всегда классическими остаются члены квадратов полной ( $S^2$ ) и активной ( $P^2$ ) мощностей, но появляется сколь угодно много членной в форме записи пассивной (реактивной) мощности (4.13 в). Значит и ортогональный баланс полной мощности имеет запатентованную форму (4.11 б), а форме (4.11 а) должна соответствовать формула энергетического баланса через любое число ортогональных составляющих. В процедуре Грама-Шмидта это число равно четырем, а выражение (4.11 а) примет вид

$$\begin{aligned}
& S_{Sk}^2 = (u_S, i_S) \cdot (u_k, i_k) + [u_S, i_S] \cdot [u_k, i_k] = \\
(4.16) \quad & = (U_{S1} \cdot I_{S1} + U_{S2} \cdot I_{S2} + U_{S3} \cdot I_{S3} + U_{S4} \cdot I_{S4}) \cdot (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3 + U_4 \cdot I_4) + \\
& \quad + (U_{S1} \cdot I_{S2} - U_{S2} \cdot I_{S1}) \cdot (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1) + (1-2) \\
& \quad + (U_{S1} \cdot I_{S3} - U_{S2} \cdot I_{S1}) \cdot (U_1 \cdot I_3 - U_3 \cdot I_1) + (1-3) \\
& \quad + (U_{S1} \cdot I_{S4} - U_{S2} \cdot I_{S1}) \cdot (U_1 \cdot I_4 - U_4 \cdot I_1) + (1-4) \\
& \quad + (U_{S2} \cdot I_{S3} - U_{S3} \cdot I_{S2}) \cdot (U_2 \cdot I_3 - U_3 \cdot I_2) + (2-3) \\
& \quad + (U_{S2} \cdot I_{S4} - U_{S4} \cdot I_{S2}) \cdot (U_2 \cdot I_4 - U_4 \cdot I_2) + (2-4) \\
& \quad + (U_{S3} \cdot I_{S4} - U_{S4} \cdot I_{S3}) \cdot (U_3 \cdot I_4 - U_4 \cdot I_3). (3-4)
\end{aligned}$$

Формы записи (4.15), (4.16) найдена автором «методом проб и ошибок» (не логическим путем) при попытках получить комплексный энергетический баланс трехфазной цепи, а потом уже перенесена и на однофазные цепи, опубликована в работах [27, 28].

#### 4.5. Варианты формулы энергетического баланса

После того, как формула энергетического баланса через ортогональные составляющие исходно написана (4.16), остается только проверить, действительно ли получается этот баланс, создать под формулу систему новых гиперкомплексных чисел, найти другие интересные формы записи и соответствующие интегральные формулы этого баланса.

Будем доказывать «от противного», и если где-то споткнемся, откажемся от доказанного. Если формула (4.16) – абсолютная истина, то ее результат не должен зависеть от каких-то субъективных действий, например, от количества функциональных ортов, по которым разлагаются все сигналы цепи. Значит можно воспользоваться формой (4.6), когда сетевые сигналы разложены по двум ортам, а сигналы элемента цепи – по четырем. Тогда в формуле (4.16) из нижних «пассивных» членов только (1-2) будет ненулевым из-за левых сетевых множителей и 3-й и 4-й члены комплексного представления элементного сигнала можно отбросить. В энергетическом балансе принимают участие только сетевые формы сигналов! Это дает право без нарушения общности применить к решению систему «комплексных чисел» с одной мнимой единицей

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= U_{S1} + U_{S2} \cdot i; & (a) \\ \dot{I}_s &= I_{S1} + I_{S2} \cdot i; & (б) \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\dot{U}_k = U_{k1} + U_{k2} \cdot i; \quad (в)$$

$$\dot{I}_k = I_{k1} + I_{k2} \cdot i. \quad (г)$$

Далее комплексные мощности находятся по правилам курса ТОЭ (3.12)

$$\begin{aligned} \dot{S}_s &= (U_{S1} + i \cdot U_{S2}) \cdot (I_{S1} - i \cdot I_{S2}) = \\ &= (U_{S1} \cdot I_{S1} + U_{S2} \cdot I_{S2}) - i \cdot (U_{S1} \cdot I_{S2} - U_{S2} \cdot I_{S1}); \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_k &= (U_1 + i \cdot U_2) \cdot (I_1 - i \cdot I_2) = \\ &= (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) - i \cdot (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1). \end{aligned} \quad (4.19)$$

По формуле (4.12)

$$\begin{aligned}
 S_{sk}^2 &= (U_{S1} \cdot I_{S1} + U_{S2} \cdot I_{S2}) \cdot (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) + & (a) \\
 &+ (U_{S1} \cdot I_{S2} - U_{S2} \cdot I_{S1}) \cdot (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1) = & (б) \\
 &= (u_s, i_s) \cdot (u_k, i_k) + & (в) \\
 &+ [u_s, i_s] \cdot [u_k, i_k] = & (г) \\
 &= P_s \cdot P_k + Q_s \cdot Q_k. & (д)
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Этот результат можно было бы вырезать из формулы (4.16), но здесь показано, что он может быть получен в результате известных в ТОО комплексных преобразований, которые по теореме Ланжевена дают сходящийся к сетевым баланс всех элементных мощностей. Вторые «пассивные» слагаемые балансов сходятся к сетевым значениям, которые в параграфе 2.5 названы «реактивными» с новых позиций. Поэтому в (д) и использованы «реактивные» обозначения.

Если формулами (а) и (в) определены скалярные произведения периодических функций (2.3), то формулами (б) и (г) – векторные. В векторном анализе векторные произведения имеют направление по субъективно принятому правилу, в приведенной форме записи каждое из них в отдельности должно иметь субъективно принятый знак (как и у реактивной мощности). Вообще конкретный расчет векторного произведения всегда проблематичен. Исключение составляет тривиальный случай векторного произведения функции самой на себя

$$[x, x] = 0. \tag{4.21}$$

Но в формулах (4.16), (4.20) векторные произведения присутствуют только парами! Какое бы правило ни было принято для одного члена пары, оно будет таким же и для другого. Поэтому «субъективность» всегда сокращается и знак пары всегда будет получен объективно. В любом случае векторные произведения красиво записываются на бумаге, но аппаратное их определения вызывает большие сложности. В данном пособии нигде не поднимается вопрос о знаках пассивных и реактивных составляющих в отдельности.

Интересные результаты дают алгебраические преобразования формулы (4.20 а, б)

$$\begin{aligned}
 S_{sk}^2 &= \\
 &= (U_{S1} \cdot U_1 + U_{S2} \cdot U_2) \cdot (I_{S1} \cdot I_1 + I_{S2} \cdot I_2) + & (a) \\
 &+ (U_{S1} \cdot U_2 - U_{S2} \cdot U_1) \cdot (I_{S1} \cdot I_2 - I_{S2} \cdot I_1) = \\
 &= (u_s, u_k) \cdot (i_s, i_k) + [u_s, u_k] \cdot [i_s, i_k] = & (б) \\
 &= (U_{S1} \cdot U_1 + U_{S2} \cdot U_2) \cdot (I_{S1} \cdot I_1 + I_{S2} \cdot I_2) - & (в) \\
 &- (U_{S1} \cdot I_1 + U_{S2} \cdot I_2) \cdot (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) + \\
 &+ (U_{S1} \cdot I_1 + U_{S2} \cdot I_2) \cdot (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) = & (4.22) \\
 &= (u_s, u_k) \cdot (i_s, i_k) - (u_s, i_k) \cdot (u_k, i_s) + (u_s, i_s) \cdot (u_k, i_k). & (г)
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

В формулах (4.22 в, г) присутствуют только скалярные произведения, что позволяет выразить значение любой векторной пары через просто измеряемые (2.3) скалярные произведения

$$[v,w] \cdot [x,y] = [x,y] \cdot [v,w] = (x,v) \cdot (y,w) - (x,w) \cdot (y,v). \quad (4.23)$$

Интересным следствием является формула квадрата векторного произведения или нахождение квадрата ее модуля

$$[x,y]^2 = (x,x) \cdot (y,y) - (x,y)^2 = X^2 \cdot Y^2 - (x,y)^2. \quad (4.24)$$

Теперь следует еще раз выписать три интегральные формулы энергетического баланса ответственностей перед однофазной сетью каждого элемента произвольной цепи

$$\begin{aligned} S_{Sk}^2 &= \\ &= (u_S, i_S) \cdot (u_k, i_k) + [u_S, i_S] \cdot [u_k, i_k] = (a) \\ &= (u_S, u_k) \cdot (i_S, i_k) + [u_S, u_k] \cdot [i_S, i_k] = (б) \\ &= (u_S, u_k) \cdot (i_S, i_k) - (u_S, i_k) \cdot (u_k, i_S) + (u_S, i_S) \cdot (u_k, i_k). \quad (в) \end{aligned} \quad (4.25)$$

Формулы (а) и (б) выглядят красиво, но требуют применения преобразования (4.23) для получения значения произведения векторной пары. После этого все равно получается главная интегральная формула (4.25 в). Она впервые опубликована в работе [23].

Сеть в принятом здесь понимании является частным случаем цепи. Если в формулы (4.25) подставить  $u_k = u_S$  (в сети на всех элементах сетевое напряжение), то получится уже известная формула энергетического баланса для «сети» (2.4).

#### 4.6. Энергетические балансы при разложениях по двум ортам

Для линейной схемы (рис.6) уже рассчитаны составляющие энергетического баланса, которые получились одинаковыми при разложениях (3.17) и (3.18). Поэтому из всех формул проще воспользоваться формой (4.20 д) или (4.25 а)

$$\begin{aligned}
S_{S1}^2 &= 10.24 \cdot 34.8 + 17.28 \cdot 14.4 = 356.35 + 248.83 = 605.18 \\
S_{S2}^2 &= 10.33 \cdot 34.8 - 5.76 \cdot 14.4 = 359.14 - 82.94 = 276.19 \\
S_{S3}^2 &= 10.23 \cdot 34.8 + 2.88 \cdot 14.4 = 495.55 + 41.47 = 537.02 \\
(4.26)
\end{aligned}$$

$$S_S^2 = 34.8 \cdot 34.8 + 14.4 \cdot 14.4 = 1211.04 + 207.36 = 1418.4.$$

Видно, что баланс ответственностей (1418.4) получается одинаковым при суммировании и по столбцам элементных ответственностей, и по нижней строке ответственности всей цепи. Второй элемент  $Z_2$  имеет внутри компенсирующую емкость и формуле составляющих его ответственности появился член реактивного баланса с минусом (-82.94). Подстановка составляющих напряжений и токов из (3.17) или (3.18) в другие формулы, например, (4.20 а, б), (4.22 а, в) дает тот же конечный результат (4.26), хотя (3.17) отличается от (3.18).

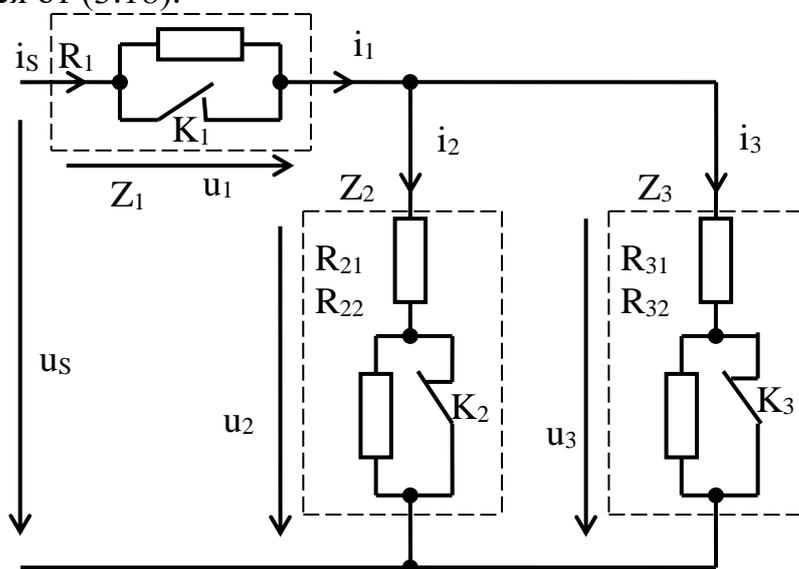


Рис. 8

Для схемы с ключевыми искажениями (рис. 8) расчеты выполнены при том же действующем напряжении сети  $U_S = 6$ , что и синусоидальное напряжение в схеме (рис. 6), но постоянной формы, тех же активных сопротивлений (3.16), но при замене реактивных элементов идеальными ключами  $K_1 - K_3$ . Для простоты все сигналы имеют кусочно прямоугольную форму (рис. 9), указаны амплитуда и длительность каждого прямоугольника. На рис. 9а ключи работают так, чтобы обеспечить полную энергетическую эквивалентность двух схем (рис. 6) и (рис. 8). Длительности прямоугольников на рисунке подобраны такими, чтобы без калькулятора брались корни:  $0.64 \rightarrow 0.8$ ;  $0.36 \rightarrow 0.6$  и т.д., при  $0.64 + 0.36 = 1$ . Это сделано для легкой проверки результатов расчета, когда действующее значение прямоугольного сигнала пропорционально произведению амплитуды на корень квадратный из относительной длительности.

Самым сложным является первый этап перехода от аналоговых сигналов к ортогональным ортам по процедуре Грама-Шмидта в любом удобном

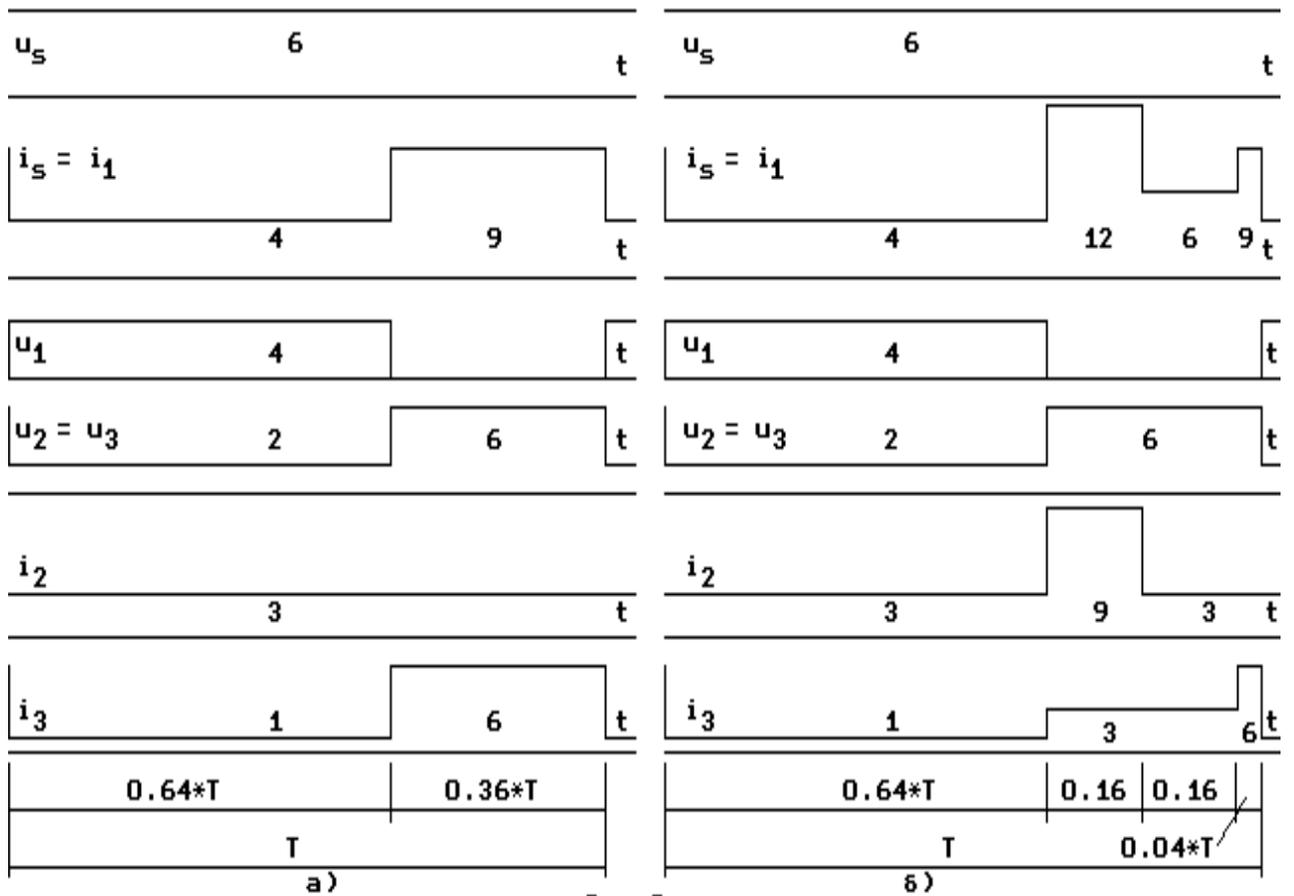


Рис. 9

исследователю порядке. Потом можно преобразовать результаты к любой другой форме. Для (рис. 9 а) проще выбрать два функциональных орты прямоугольными с длительностями  $0.64 \cdot T$  и  $0.36 \cdot T$ . Эти сигналы нигде не пересекаются, так как на участке существования одного другой равен нулю, и их даже мгновенное произведение всегда равно нулю, а не только интеграл на периоде этого произведения. То есть такие сигналы всегда взаимно ортогональны. Далее остается только представить все сигналы на (рис. 9) в виде суммы прямоугольников. Например, для  $u$  имеем только один прямоугольник с амплитудой 4 и длительностью 0.64, его среднеквадратичное значение  $4 \cdot 0.8 = 3.2$  находится среди других в первом представлении сигналов схемы (4.27) и т.д.

$$\begin{aligned}
 u_1 &\rightarrow 3.2 \ 0, & i_1 &\rightarrow 3.2 \ 5.4, & (u_1, i_1) &= 10.24, & [u_1, i_1] &= 17.28; \\
 u_2 &\rightarrow 1.6 \ 3.6, & i_2 &\rightarrow 2.4 \ 1.8, & (u_2, i_2) &= 10.33, & [u_2, i_2] &= -5.76; \\
 u_3 &\rightarrow 1.6 \ 3.6, & i_3 &\rightarrow 0.8 \ 3.6, & (u_3, i_3) &= 10.23, & [u_3, i_3] &= 2.88;
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

---


$$u_s \rightarrow 4.8 \ 3.6, \quad i_s \rightarrow 3.2 \ 5.4, \quad (u_s, i_s) = 34.8, \quad [u_s, i_s] = 14.4.$$

Теперь можно провести вторую ортогонализацию Грама-Шмидта. Для этого все строки (4.27) надо представить комплексами и согласно (3.19) каждую строку умножить на нормированный сопряженный комплекс  $U_S = (4.8 - j \cdot 3.6)/6$ .

$$\begin{aligned} u_1 &\rightarrow 2.56 - 1.92j, \quad i_1 \rightarrow 5.8 + 2.4j, \quad (u_1, i_1) = 10.24, \quad [u_1, i_1] = 17.28; \\ u_2 &\rightarrow 3.44 - 1.92j, \quad i_2 \rightarrow 3 + 0j, \quad (u_2, i_2) = 10.33, \quad [u_2, i_2] = -5.76; \\ u_3 &\rightarrow 3.44 - 1.92j, \quad i_3 \rightarrow 2.8 + 2.4j, \quad (u_3, i_3) = 10.23, \quad [u_3, i_3] = 2.88; \end{aligned} \quad (4.28)$$

---


$$u_S \rightarrow 6 + 0j, \quad i_S \rightarrow 5.8 + 2.4j, \quad (u_S, i_S) = 34.8, \quad [u_S, i_S] = 14.4.$$

Сравнение (4.28) с (3.17) указывает на полную идентичность разложений с точностью до противоположного знака у второго орта сигнала  $i_S$ . Дело в том, что в треугольной форме процедуры Грама-Шмидта (4.6) все диагональные коэффициенты ( $U_S, I_{Sn}, I_{пнк}, U_{?k}$ ) положительны (объективно положительны). В (4.28) таким положительным диагональным членом является  $+2.4$  разложения тока  $i_S$ . В (3.17) этот член равен  $-2.4$  в соответствии с принятыми субъективными правилами. Прочие члены обязаны подстраиваться под эти знаки так, чтобы не изменился баланс предлагаемых ответственностей. Можно также каждую строку умножить на сопряженный нормированный комплекс своего напряжения, тогда получится запись типа (3.18) с другими знаками

$$\begin{aligned} u_1 &\rightarrow 3.2 + 0j, \quad i_1 \rightarrow 3.2 - 5.4j, \quad (u_1, i_1) = 10.24, \quad [u_1, i_1] = 17.28; \\ u_2 &\rightarrow 3.94 + 0j, \quad i_2 \rightarrow 2.62 - 1.46j, \quad (u_2, i_2) = 10.33, \quad [u_2, i_2] = -5.76; \\ u_3 &\rightarrow 3.94 + 0j, \quad i_3 \rightarrow 3.61 - 0.73j, \quad (u_3, i_3) = 10.23, \quad [u_3, i_3] = 2.88; \end{aligned} \quad (4.29)$$

---


$$u_S \rightarrow 6 + 0j, \quad i_S \rightarrow 5.8 - 2.4j, \quad (u_S, i_S) = 34.8, \quad [u_S, i_S] = 14.4.$$

Во всех случаях произведения активных и пассивных составляющих ответственностей получаются одинаковыми при всех разложениях (3.17), (3.18), (4.27), (4.28), (4.29). Поэтому интересно подставить результаты представлений в какие-то из еще не проверенные расчетом формулы. Подстановка в формулу (4.25 а) дает результаты

$$\begin{aligned} S_{Sk}^2 &= [u_S, i_S][u_k, i_k] + (u_S, i_S)(u_k, i_k) = \quad (a) \\ &= \{(u_S, u_k)(i_S, i_k) - (u_S, i_k)(u_k, i_S)\} + (u_S, i_S)(u_k, i_k); \quad (б) \\ S_{S1}^2 &= 605.18 - 356.35 + 356.35 = 248.83 + 356.35 = 605.18; \\ S_{S2}^2 &= 359.14 - 442.08 + 359.14 = -82.94 + 359.14 = 276.19; \quad (в) \\ S_{S3}^2 &= 454.08 - 412.61 + 495.55 = 41.47 + 495.55 = 537.02; \quad (4.30) \\ S_S^2 &= 1418.4 - 1211.04 + 1211.04 = 207.36 + 1211.04 = 1418.4. \quad (г) \end{aligned}$$

Подстановка в формулу (4.25 б), дает результаты

$$S_{Sk}^2 = (u_s, u_k)(i_s, i_k) + [u_s, u_k][i_s, i_k] = \quad (a)$$

$$= (u_s, u_k)(i_s, i_k) + \{- (u_s, i_k)(u_k, i_s) + (u_s, i_s)(u_k, i_k)\}; \quad (б)$$

$$S_{S1}^2 = 605.18 + 0 = 605.18;$$

$$S_{S2}^2 = 359.14 - 82.94 = 276.19; \quad (в)$$

$$S_{S3}^2 = 454.08 + 82.94 = 537.02; \quad (4.31)$$

---


$$S_S^2 = 1418.4 + 0 = 1418.4. \quad (г)$$

Про баланс ответственностей (4.30) можно сказать, что элемент цепи участвует в общей нагрузке своей активной и пассивной (реактивной) мощностью, что соответствует обыденному сознанию электрика. Новым является относительность этих ответственностей, что должно быть уже приемлемым дочитавшим до этого места пособие.

Про формулу (4.31) можно сказать, что элемент участвует в общей нагрузке своим напряжением и током. Это – новое качество мировоззренческого уровня. Можно иначе переписать саму формулу полной мощности цепи, добавив справа нули согласно тождеству (4.21),

$$S_S^2 = (u_s, u_s)(i_s, i_s) + [u_s, u_s][i_s, i_s] = U_S^2 \cdot I_S^2 + 0 \cdot 0, \quad (4.32)$$

и убедиться, что баланс по всей цепи составляющей векторного произведения  $[u_s, u_k][i_s, i_k]$  всегда получается нулевым. Таким образом, скалярное произведение сигналов  $(u_s, u_k)(i_s, i_k)$  определяет баланс ответственностей по всей цепи, а векторное – только справедливо перераспределяет эти ответственности между элементами. Теперь получается и новая форма комплексной записи (4.12) энергетического баланса ответственностей

$$S_{Sk}^2 = \text{Re}\{\dot{S}_s \cdot \dot{S}_k^*\} = \text{Re}\{(\dot{U}_s \cdot \dot{U}_k^*) \cdot (\dot{I}_k \cdot \dot{I}_s^*)\}, \quad (4.33)$$

и по аналогии с (4.16) – другая форма записи

$$\begin{aligned} S_{Sk}^2 &= (u_s, u_k)(i_s, i_k) + [u_s, u_k][i_s, i_k] = \\ &= (U_{S1} \cdot U_1 + U_{S2} \cdot U_2 + U_{S3} \cdot U_3 + U_{S4} \cdot U_4) \cdot (I_{S1} \cdot I_1 + I_{S2} \cdot I_2 + I_{S3} \cdot I_3 + I_{S4} \cdot I_4) + \\ &\quad + (U_{S1} \cdot U_2 - U_{S2} \cdot U_1) \cdot (I_{S1} \cdot I_2 - I_{S2} \cdot I_1) + \quad (1-2) \\ &\quad + (U_{S1} \cdot U_3 - U_{S3} \cdot U_1) \cdot (I_{S1} \cdot I_3 - I_{S3} \cdot I_1) + \quad (1-3) \\ &\quad + (U_{S1} \cdot U_4 - U_{S4} \cdot U_1) \cdot (I_{S1} \cdot I_4 - I_{S4} \cdot I_1) + \quad (1-4) \\ (4.34) &\quad + (U_{S2} \cdot U_3 - U_{S3} \cdot U_2) \cdot (I_{S2} \cdot I_3 - I_{S3} \cdot I_2) + \quad (2-3) \\ &\quad + (U_{S2} \cdot U_4 - U_{S4} \cdot U_2) \cdot (I_{S2} \cdot I_4 - I_{S4} \cdot I_2) + \quad (2-4) \\ &\quad + (U_{S3} \cdot U_4 - U_{S4} \cdot U_3) \cdot (I_{S3} \cdot I_4 - I_{S4} \cdot I_3). \quad (3-4) \end{aligned}$$

Формулы (4.25 б), (4.31),... (4.34) появились здесь, как незаметные млекопитающие в эпоху динозавров. Звездный час этих формул еще наступит во второй части пособия. Однако, если сравнить между собой формулы (4.30 б) и (4.31 б), то они отличаются друг от друга только расстановкой фигурных скобок. Какие маленькие отличия и какие мировоззренческие последствия!

Без доказательства, но на основе экспериментов можно предложить усиление формулировок теорем Ланжевена и Телледжена: «Если все сигналы произвольной нелинейной электрической цепи с одним источником питания разложены только по двум функциональным взаимно ортогональным ортам, для этих сигналов выполняются законы Кирхгофа, то для таких сигналов выполняются все написанные формулы балансов ответственностей элементов за полную мощность источника питания. Если затем сигналы каждого элемента разложить по двум другим взаимно ортогональным функциональным ортам, различным для каждого элемента, но полученным как различные линейные комбинации первых двух ортов, то для новых представлений сигналов формально не будут выполняться законы Кирхгофа, но значения ответственностей элементов и их составляющих по написанным формулам не изменяться.» При линейных преобразованиях синуса и косинуса получают совсем другие функции, но глаз человека воспринимает их опять как синус и косинус (рис. 7 а). Линейные же преобразования несинусоидальных ортов, типа верхний и нижний прямоугольники на рис. 7 б, каждый раз будут приводить к новым для глаза формам. Предлагается студентам преобразовать эти два орта по формулам (4.9 а) и посмотреть, что получится.

#### 4.7. Энергетические балансы при разложениях по четырем ортам

Сигналы в простейшей трехэлементной цепи (рис.8) можно сделать четырехортными, если организовать несинхронную работу ключей, как показано на (рис. 9 б). На этом рисунке относительные длительности включений также подобраны удобными для извлечения корня квадратного:  $0.64 \rightarrow 0.8$ ,  $0.16 \rightarrow 0.4$ ,  $0.04 \rightarrow 0.2$ . Для человека проще разбить графики на 4 непересекающихся прямоугольника и, как описано выше, определить все ортогональные составляющие в таблице 1. После этого можно произвести ортогонализацию Грама-Шмидта (4.6) на ЭВМ и свести результаты в таблицу 2. Далее расчеты по разным формулам.

Цепь до ортогонализации.				Таблица 1	
Сигнал	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	3	Сеть
$u$	3.2	1.6	1.6		4.8
	0	2.4	2.4		2.4
	0	2.4	2.4		2.4
	0	1.2	1.2		1.2
$i$	3.2	2.4	0.8		3.2
	4.8	3.6	1.2		4.8
	2.4	1.2	1.2		2.4
	1.8	0.6	1.2		1.8

Цепь после ортогонализации.				Таблица 2	
Сигнал	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	3	Сеть
$u$	2.56	3.44	3.44		6
	-1.57	1.57	1.57		0
	-1.11	1.11	1.11		0
	0	0	0		0
$i$	5.8	3.96	1.84		5.8
	2.94	2.02	0.91		2.94
	0	-0.65	0.65		0
	0	0.57	-0.57		0

Обе таблицы по формуле (4.25 в). Таблица 3				
Функция	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	Сеть
$+(u_s, u) (i_s, i)$				
$-(u_s, i) (u, i_s)$	649.42	596.91	275.75	1522.1
$+(u, i) (u_s, i_s)$	-	-	-	-
	356.35	583.55	271.14	1211.04
			295.1	
	356.35	559.58		1211.04
$S_{sk}^2$	649.42	572.95	299.71	1522.1

Таблица 1 по формуле (4.16).		Таблица 4		
Функция	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	Сеть
$(u, i)$	10.24	16.08	8.48	34.8
$[u, i]$		0	0	15.36
(1-2)	15.36	-3.84	0	3.84
		-1.92	0.96	4.8
(1-3)	7.68	-5.76	0	-5.76
		-2.88	1.44	-1.44
(1-4)	5.76	0	1.44	1.44
	0			
(2-3)	0			
	0			
(2-4)				
(3-4)				
$(u, i) (u_s, i_s)$	356.35	559.58	295.1	1211.04

$[u, i] \cdot$	235.93	0	0	
(1-2)		-14.75	0	235.93
$\cdot [u_s, i_s]$ (1-	29.49	-		
3)		9.22	4.61	14.75
	27.65		0	
(1-4)	0	33.18	-	23.04
	0		2.07	
(2-3)	0	4.14		33.18
	293.07	0	2.07	
(2-4)				2.07
		13.36	4.61	
(3-4)				2.07
Итого				311.04
Сумма	649.42	572.95	299.71	1522.1

Таблица 2 по формуле (4.16).

	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	Сеть
$(u, i)$	10.24	16.08	8.48	34.8
$[u, i]$	16.617	0.76	0.26	17.636
(1-2)	6.43	-6.61	0.18	0
	0	1.95	-1.95	0
(1-3)	3.26	-3.26	0	0
	0	0.89	-0.89	0
(1-4)	0	0.63	-0.63	0
(2-3)				
(2-4)				
(3-4)				
$(u, i) (u_s, i_s)$	356.35	559.58	295.1	1211.04
$[u, i] \cdot [u_s, i_s]$	293.07	13.36	4.61	311.04
	0	0	0	0
(1-2)	293.07	13.36	4.61	311.04
(1-3) ... (3-4)				
Итого				
Сумма	649.42	572.95	299.71	1522.1

Таблица 5

Таблица 1 по формуле (4.34).

	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	Сеть
$(u_s, u_k) \cdot (i_s, i_k)$	15.36·42.	20.64·28.92=	20.64·13.36	
	28=	=	=	1522.
	=	596.91	275.75	1
	649.42			
$[u_s, u_k] \cdot [i_s, i_k]$	-7.68·0=0	7.68·0	7.68·0	= 0
	-7.68·0=0	= 0	0	0
(1-2)	-3.84·0=0	7.68·(-	7.68·1.92=1	0
	0·0	1.92)=-14.75	4.75	0
(1-3)	=0	3.84·(-2.4)	3.84·2.4	0
	0·0	=-9.22	=9.22	0
(1-4)	=0	0·(-2.88)	0·2.88	0
	0·0	=0	=0	
(2-3)	=0	0·(-3.6)	0·3.6	
		=0	=0	
(2-4)	0	0·(-0.72)	0·0.72	
		=0	=0	
(3-4)				
Итого		-23.96	23.96	
Сумма	649.42	572.95	299.71	1522.
				1

Таблица 6

Параметры источника питания:

$$S_S^2 = U_S^2 \cdot I_S^2 = 36 \cdot (33.64 + 8.644) = 36 \cdot 42.28 = 1522.1; \quad (4.35)$$

$$P_S = (u_s, i_s) = 6 \cdot 5.8 = 34.8.$$

Из таблиц еще раз видно, что баланс по всей цепи обеспечивает член  $(u_s, u_k)(i_s, i_k)$ , а остальные члены только перераспределяют ответственность элементов.

	Таблица 2 по формуле (4.34).			Таблица 7
	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	Сеть
$(u_s, u_k) \cdot (i_s, i_k)$	$15.36 \cdot 42 = 649.42$	$20.64 \cdot 28.92 = 596.91$	$20.64 \cdot 13.36 = 275.75$	1522.1
$[u_s, u_k] \cdot [i_s, i_k]$	$-9.41 \cdot 0 = 0$	$9.41 \cdot 0.1 = 0.98$	$9.41 \cdot (-0.1) = -0.98$	0
(1-2)	$0 \cdot 0 = 0$	$6.65 \cdot (-3.75) = -24.94$	$6.65 \cdot 3.75 = 24.94$	0
(1-3)	$0 \cdot 0 = 0$	$0 \cdot 3.28 = 0$	$0 \cdot (-3.28) = 0$	0
(1-4)	$0 \cdot 0 = 0$	$0 \cdot (-1.9) = 0$	$1.9 \cdot 0 = 0$	0
(2-3)	$0 = 0$	$1.66 \cdot 0 = 0$	$-1.66 \cdot 0 = 0$	0
(2-4)	$0 = 0$	$0 \cdot 0 = 0$	$0 \cdot 0 = 0$	0
(3-4)				
Итого		-23.96	23.96	
Сумма	649.42	572.95	299.71	1522.1

Таблица 5 и результаты двухортного анализа предыдущего параграфа показывают, что в произвольной нелинейной цепи входные сигналы могут быть разложены по двум функциональным ортам, из сигналов элементов могут быть выделены составляющих этих форм, а остатки отброшены. После этого на полученных сигналах выполняется предлагаемый баланс ответственностей. Далее над полученными двухортными сигналами могут быть произведены любые линейные преобразования, приводящие к нарушениям законов Кирхгофа для данной цепи, но составляющие ответственностей при этом не изменятся. Так можно уточнить теорему Ланжевена.

Получается, что, если ортогонализацию Грама-Шмидта для цепи начинать с сигналов элемента, то полученные формулы будут четырех ортными и дадут правильные результаты. Если ортогонализацию начинать с сетевых сигналов, то можно остановиться на втором шаге и полученные формулы дадут такие же результаты, но при двухортных представлениях сигналов. Последнее однако не означает, что предлагаемая теория является двухсигнальной. В описанной процедуре преобразования участвуют сигналы двух напряжений и двух токов сети и элемента.

Здесь не приведены результаты расчетов с применением кватернионов с формулой четырех квадратов (4.14). Они дали не только другие значения ответственностей элементов при выполнении общего баланса, но и разные

значения ответственности одного и того же элемента по данным разных таблиц 1 и 2. Попытку применения кватернионов следует признать неудачной, хотя автор пособия сам предлагал их ранее [23,... 26].

Таким образом весь набор предложенных формул энергетического баланса в произвольной однофазной цепи дает одинаковые результаты и дело вкуса, на какой из них остановиться. Однако интегральная формула (4.25 в) является самой простой и практически реализуемой [23].

#### 4.8. Двучленный энергетический баланс

Хотелось бы иметь одну формулу энергетического баланса с двумя привычными членами активной и реактивной мощности, пусть в новой форме записи (4.11), (4.25)

$$\begin{aligned} S_{Sk}^2 &= P_S \cdot P_k + Q_S \cdot Q_k = (u_S, i_S)(u_k, i_k) + [u_S, i_S][u_k, i_k]; \quad (a) \\ S_S^2 &= P_S^2 + Q_S^2. \quad (б) \quad (4.36) \end{aligned}$$

Для этого надо свести количество членов векторного произведения к одному. Можно в ортогональном представлении сигналов оставить только балансируемые члены ортогонализации Грама-Шмидта (4.6), тогда получим формулу

$$S_{Sk}^2 = P_S \cdot P_k + (U_S \cdot I_{Sn}) \cdot (U_{ak} \cdot I_{пбк} - U_{пбк} \cdot I_{ak}). \quad (4.37)$$

Здесь  $U_S, I_{Sn}$  – действующие значения, они всегда положительны, поэтому одночленная реактивная мощность сети  $Q_S = U_S \cdot I_{Sn}$  всегда положительна при объективном подходе Грама-Шмидта

$$Q_S = \sqrt{[U_S^2 \cdot I_S^2 - P_S^2]}. \quad (8)$$

Можно искусственно вмешаться в процесс ортогонализации и искусственно в (4.6) сделать  $I_{Sn}$  отрицательным, тогда  $Q_S$  станет отрицательной. Но это тут же изменит знаки членов под  $I_{Sn}$  в (4.6), то есть  $U_{пбк}, I_{пбк}$  и знак последних скобок в (4.37) или  $Q_k$ . Произведение  $Q_S \cdot Q_k$  не поддается субъективному воздействию. Поэтому автора пособия не интересуют научные споры о знаке  $Q_S$ , он готов присоединиться к любому мнению, конечный результат произведения не изменится. Далее проще всего воспользоваться главной интегральной формулой энергетического баланса (4.25 в) и получить второй сомножитель

$$Q_k = \frac{(u_s, u_k)(i_s, i_k) - (u_s, i_k)(u_k, i_s)}{\sqrt{(U_s I_s)^2 - P_s^2}}. \quad (4.39)$$

Формула (4.38) интересна тем, что предложена очень давно и многими авторами, включая Фризе. Но теперь эта формула идет в паре с (4.39) и эта пара впервые стала балансируемой по всей цепи (4.36 а). К сожалению, большинство не представляют суть концепции Фризе и говорят нем: «Это тот, который предложил формулу реактивной мощности (4.38)».

Еще раз! Формула (4.38) определяет реактивную мощность как ортогональную невязку полной (по нагрузке сетевого трансформатора) и активной мощностей и по старым, и по новым понятиям. По новым понятиям еще формируются взаимно ортогональные сетевые функциональные орты, в базисе которых и определяется реактивная мощность сети. Строго говоря, она всегда положительна. Формула (4.39) определяет реактивную мощность k-го элемента цепи В СЕТЕВОМ БАЗИСЕ и только поэтому обладает свойством балансируемости по всей цепи к формуле (4.38). Так можно с новых позиций защитить давно известную формулу (4.38). Сейчас полезно перечитать параграф 2.5 и вспомнить, что в больших системах сетевой ток и напряжение синусоидальны. Тогда  $Q_s$  можно определять прямо по курсу ТОЭ с любым знаком, но с этим знаком подставлять в знаменатель формулы (4.39). Тогда баланс по цепи всегда сойдется к  $Q_s$  выбранного знака.

#### 4.9. Частотные формы в курсе ТОЭ и по новой теории

Балансы с двумя и несколькими членами рассмотрены, теперь можно перейти к формам с бесконечным числом членов при разложении всех сигналов в ряды Фурье. В «пракниге» всех учебников ТОЭ К.А.Круга [13] этому вопросу уделено до обидного мало. Вот это в новой терминологии, чтобы не затруднять чтение (полная мощность вместо кажущейся и т.д.):

«Корень квадратный из разности квадрата полной мощности и суммы квадрата активной мощности и квадрата СУММЫ (выделено автором пособия) реактивных мощностей всех гармоник называют мощностью искажений:

$$T = \sqrt{[S^2 - (P^2 + Q^2)]}. \quad (4.40)$$

... $S$  может быть представлена в виде

$$S^2 = [\sum (U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k)]^2 + \quad (a)$$

$$+ [\sum (U_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k)]^2 + \quad (б)$$

(4.41)

$$+ \sum [U_k^2 \cdot I_n^2 + U_n^2 \cdot I_k^2 - 2 \cdot U_k \cdot I_k \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_n)]. \quad (в)$$

Мощность искажений равняется нулю лишь... в цепи с одним активным сопротивлением». То есть здесь (4.41 а) – активная мощность  $P$ , (б) – реактивная мощность  $Q$ , (в) – мощность искажений  $T$ . Последняя получена как часто употребляемая здесь «невязка» полного баланса формулы (4.41) без какого-то пояснения «физического смысла».

К.А.Кругу и большинству последователей такое определение реактивной мощности (4.41 б) казалось очевидным, отсюда и краткость изложения. Зачем много писать про  $2 + 2 = 4$ ! Очевидность зиждется на симметрии записей формул (а) и (б) и не надо никакого физического смысла! Отсюда и произросла самая модная ветвь дерева энергетических теорий, закончившаяся преобразованиями Гильберта (это интегральный переход от (а) к (б) для сигналов произвольной формы, очень красивый переход, но реализуемый только по прошлым регистрациям сигналов). Убедительная критика такому подходу дана в обзоре [40], но эту критику просто игнорируют, кроме того критика без конструктивных предложений плохо воспринимается.

Теперь у нас имеется возможность воспользоваться формулой (4.16) при произвольном числе членов. Ограничимся двумя гармониками ( $I_1, I_2, \dots$ ). Гармоники разных частот всегда взаимно ортогональны. Каждая гармоника разлагается на синусную ( $I_{1c}, \dots$ ) и косинусную ( $I_{1k}, \dots$ ) составляющие, которые между собой взаимно ортогональны. В итоге получается четыре орта точно, как в выражении (4.16). После несложных тригонометрических преобразований получается формула

$$S_{Sk}^2 = P_S \cdot P_k +$$

$$= (U_{S1} \cdot I_{S1} \cdot \cos \varphi_{S1} + U_{S2} \cdot I_{S2} \cdot \cos \varphi_{S2}) \cdot (U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2) + \quad (a)$$

$$+ U_{S1} \cdot I_{S1} \cdot \sin \varphi_{S1} \cdot U_{S2} \cdot I_{S2} \cdot \sin \varphi_1 + \quad (б)$$

$$+ U_{S2} \cdot I_{S2} \cdot \sin \varphi_{S2} \cdot U_{S1} \cdot I_{S1} \cdot \sin \varphi_2 +$$

(4.42)

$$+ (U_{S1c} \cdot I_{S2c} - U_{S2c} \cdot I_{S1c}) \cdot (U_{1c} \cdot I_{2c} - U_{2c} \cdot I_{1c}) +$$

$$+ (U_{S1c} \cdot I_{S2k} - U_{S2k} \cdot I_{S1c}) \cdot (U_{1c} \cdot I_{2k} - U_{2k} \cdot I_{1c}) + \quad (в)$$

$$+ (U_{S1k} \cdot I_{S2c} - U_{S2c} \cdot I_{S1k}) \cdot (U_{1k} \cdot I_{2c} - U_{2c} \cdot I_{1k}) +$$

$$+ (U_{S1k} \cdot I_{S2k} - U_{S2k} \cdot I_{S1k}) \cdot (U_{1k} \cdot I_{2k} - U_{2k} \cdot I_{1k}).$$

Здесь участвуют углы между током и напряжением первой гармоники сети,

током и напряжением первой гармоники элемента и т.д. Баланс формулы (4.42) по всей цепи сходится к

$$S_S^2 = (U_{S1} \cdot I_{S1} \cdot \cos\varphi_{S1} + U_{S2} \cdot I_{S2} \cdot \cos\varphi_{S2})^2 + \quad (\text{а})$$

$$+ (U_{S1} \cdot I_{S1} \cdot \sin\varphi_{S1})^2 + \quad (\text{б}) \quad (4.43)$$

$$+ (U_{S2} \cdot I_{S2} \cdot \sin\varphi_{S2})^2 +$$

$$+ (U_{S1c} \cdot I_{S2c} - U_{S2c} \cdot I_{S1c})^2 +$$

$$+ (U_{S1c} \cdot I_{S2k} - U_{S2k} \cdot I_{S1c})^2 + \quad (\text{в})$$

$$+ (U_{S1k} \cdot I_{S2c} - U_{S2c} \cdot I_{S1k})^2 +$$

$$+ (U_{S1k} \cdot I_{S2k} - U_{S2k} \cdot I_{S1k})^2.$$

Формулы (4.41) и (4.42) вообще нельзя сравнивать, так как в формуле (4.42) качественно иначе поставлен вопрос о балансе ответственности элемента перед сетью. Об этом был весь предыдущий материал пособия. Однако формулы (4.41) и (4.43) можно сравнить. Изначальную мысль, заложенную в формулу (4.41) можно сформулировать так: взаимодействия гармоник одинаковых частот определяют активную и реактивную мощности, взаимодействия гармоник разных частот определяют мощность искажений. Тогда члены (а), (б), (в) в формулах (4.41), (4.43) и определяют соответствующие три мощности. Совпадает только член (а) активной мощности. Далее в первой формуле идет квадрат суммы, а во второй сумма квадратов и т.д.

В пособии последовательно излагается новая теория, которая пока еще нигде не зашла в тупик. Критика существующих теорий заняла бы больше места, чем изложение новой. Например, сейчас надо предложить варианты мыслей К.А.Круга, когда он писал очевидную для него формулу (4.41). Критика имеется в упоминаемых здесь обзорах.

Частным случаем формулы (4.42) является случай линейной цепи с чисто синусоидальным питанием, когда индексы сигналов элементов цепи исчезают

$$S_{Sk}^2 = P_S \cdot P + Q_S \cdot Q = (\text{а})$$

$$= (U_S \cdot I_S \cdot \cos\varphi_S)(U \cdot I \cdot \cos\varphi) + (U_S \cdot I_S \cdot \sin\varphi_S)(U \cdot I \cdot \sin\varphi) = (\text{б}) \quad (4.44)$$

$$= U_S \cdot I_S \cdot U \cdot I \cdot (\cos\varphi_S \cdot \cos\varphi + \sin\varphi_S \cdot \sin\varphi) = (\text{в})$$

$$= U_S \cdot I_S \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi_S - \varphi). \quad (\text{г})$$

Особенно красиво выглядит формула (г). Новая теория позволяет найти неожиданное даже в простейших досконально изученных случаях. Автор пособия считает данный параграф незаконченным и, учитывая удивительные свойства синусоид гармоник, формулу (4.42) можно попытаться преобразовать к красивому виду.

#### 4.10. Искажения и другие составляющие

Ортогонализация Грама-Шмидта (4.6) дает минимально возможное количество взаимно ортогональных членов разложения 4-х сигналов. Больше членов вплоть до бесконечности (ряды Фурье) всегда можно получить, меньше – в общем случае нет. Каждый функциональный орт разложения (4.6) можно представить суммой любого числа удобных нам ортов, но при условии их взаимной ортогональности. Выберем в качестве удобных ортов синус и косинус частоты сети, увеличенные в корень из двух раз для нормализации. Для сокращения записи обозначим соответствующие функции  $sn() = \sqrt{2} \cdot \sin()$  и  $cs() = \sqrt{2} \cdot \cos()$ . Искажения форм синусоид пометим волнистым верхним индексом  $u_s^{\sim}$ . Тогда расширенная форма ортогонализации примет вид (4.45), а соответствующая ей запись мгновенных сигналов (4.46).

$$\begin{aligned}
 U_S &= U_{S1} \cdot sn(\omega t) + U_s^{\sim} \cdot a(t) && ; \text{ (а) } . \\
 i_S &= I_{S1a} \cdot sn(\omega t) + I_{Sa}^{\sim} \cdot a(t) + I_{S1p} \cdot cs(\omega t) + I_{Sp}^{\sim} \cdot b(t) && ; \text{ (б) } (4.45) \\
 u_k &= U_{1a} \cdot sn(\omega t) + U_a^{\sim} \cdot a(t) + U_{1p6} \cdot cs(\omega t) + U_{p6}^{\sim} \cdot b(t) + \dots && ; \text{ (в) } . \\
 i_k &= I_{1a} \cdot sn(\omega t) + I_a^{\sim} \cdot a(t) + I_{1p6} \cdot cs(\omega t) + I_{p6}^{\sim} \cdot b(t) + \dots , && \text{ (г) } . \\
 \\ 
 u_s &= u_{s1} + u_s^{\sim} && ; \text{ (а) } . \\
 i_S &= i_{S1a} + i_{Sa}^{\sim} + i_{S1p} + i_{Sp}^{\sim} && ; \text{ (б) } (4.46) \\
 u_k &= u_{1a} + u_a^{\sim} + u_{1p6} + u_{p6}^{\sim} + \text{(не балансируемо)} && ; \text{ (в) } . \\
 i_k &= i_{1a} + i_a^{\sim} + i_{1p6} + i_{p6}^{\sim} + \text{(не балансируемо)} . && \text{ (г) } .
 \end{aligned}$$

Здесь опущены небалансируемые члены. Например, строка (б) формируется следующим образом. Из мгновенного тока сети выделяется его 1-я гармоника и по первой гармонике напряжения сети – ее активная синусная составляющая. Невязка до первой гармоники будет реактивной (косинусной) составляющей. Функция  $cs()$  должна быть взята как плюс или минус увеличенный косинус так, чтобы коэффициент  $I_{S1p}$  был всегда положителен (по Граму-Шмидту), но можно субъективно задать орт в виде минус увеличенная косинусоида под положительность реактивной мощности индуктивной нагрузки. Ток искажений всех гармоник разлагается на две составляющие, также названные активной и реактивной. Известная ранее пассивная составляющая тока теперь определяется  $i_{Sn} = i_{S1p} + i_{Sp}^{\sim}$  и т.д. Формулу относительной ответственности можно получить, глядя на (4.16)

$$\begin{aligned}
S_{Sk}^2 &= P_S \cdot P_k + & (a) & . \\
+ (U_{S1} \cdot I_{S1p} - 0)(U_{Sa} \cdot I_{1p6} - U_{1p6} \cdot I_{1a}) + & (б) & . \\
+ (U_{S1} \cdot I_{Sp} - 0)(U_{1a} \cdot I_{p6} - U_{p6} \cdot I_{1a}) + & (в) & (4.47) \\
+ (U_{S1} \cdot I_{Sa} - U_S \cdot I_{S1a})(U_{1a} \cdot I_a - U_a \cdot I_{1a}) + & (г) & . \\
+ (U_S \cdot I_{S1p} - 0)(U_S \cdot I_{1p6} - U_{1p6} \cdot I_a) + & (д) & . \\
+ (U_S \cdot I_{Sp} - 0)(U_S \cdot I_{p6} - U_{p6} \cdot I_a). & (е) & .
\end{aligned}$$

На разбор физического смысла каждого члена формулы (4.47) потребуется много времени, поэтому стоит ограничиться частным, но частым случаем чисто синусоидального напряжения сети, когда остаются только члены (а), (б), (в) и формула запишется в универсальной форме с новым членом мощности искажений, как в формуле К.А.Круга (4.40),

$$\begin{aligned}
S_{Sk}^2 &= P_S \cdot P_k + & (a) & (4.48) \\
&+ Q_{S1} \cdot Q_{1k} + & (б) & . \\
&+ T_{S1} \cdot T_{1k}. & (в) & .
\end{aligned}$$

Обзор [40] начинается со ссылки на классическую теорию, предложенную К.Будеану, согласно которой полная мощность  $S$  содержит активную мощность  $P$ , реактивную  $Q$  и мощность искажений  $T$  ( $D$  – в зарубежной литературе)

$$S^2 = P^2 + Q^2 + T_2. \quad (4.49)$$

Реактивная мощность при несинусоидальном напряжении определяется, как в раскритикованной формуле (4.41 б) в учебнике К.А.Круга [13]. Теперь с новых позиций можно попытаться «омолодить» эту старую энергетическую составляющую искажений и написать для нее универсальный баланс (4.48), когда реактивная мощность определяется только по выделенным чисто синусоидальными сигналами.

Изложенная в данном параграфе методика позволяет субъективно вводить любые другие удобные эталонные формы, сохраняя предложенную формулу универсального энергетического баланса (4.11). Введение таких форм защищено авторским свидетельством 1972 года [50].

## 5. КОМПЛЕКСНЫЙ БАЛАНС ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЦЕПИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

### 5.1. Комплексные размерности

Процедура Грама-Шмидта позволяет разложить сигналы по минимально возможному числу функциональных ортов. Но далее число этих ортов может быть доведено до бесконечности. Нужен какой-то простой и понятный метод обращения с любым числом таких составляющих. Все балансы имеют квадратичный характер, под такие балансы в математике разработаны системы гиперкомплексных чисел [10]. Но предлагаемые квадратичные балансы имеют необычный вид (4.15), значит и соответствующие им гиперкомплексные числа должны быть необычными. Автор пособия предлагает свое решение задачи.

В математике сперва определяются свойства элементов (чисел) какого-то множества, далее определяются действия (сложения, умножения и т.д.) над этими элементами, в результате которых должны получиться элементы из этого же множества. Следующие действия над результатами будут идти по тем же правилам и так до бесконечности. Такие элементы ведут себя как числа, то есть как безразмерные единицы. Предлагаемые формы (4.12), (4.33) являются «четвертичными» или дважды квадратичными. Их удастся реализовать, если первое перемножение вести по одним правилам, а второе - по другим. Иначе, после первого перемножения комплексных чисел появляются другие числа с другими правилами. В природе это обыденное явление, когда исходные величины имеют размерность. Действия с «метрами» отличаются от действий с «квадратными метрами». Поэтому числа, позволившие реализовать формы (4.12), (4.33) названы «комплексными размерностями» и обозначены латинскими буквами под Амперы, Вольты и Ватты. Эти величины введены только под энергетические балансы при известных сигналах, но не для расчета этих сигналов.

Уже отмечалось, что применяемая в ТОЭ мнимая единица имеет двойственный характер: при расчете сигналов в цепи по законам Кирхгофа это одна единица, в комплексном балансе мощностей (3.12) это другая единица. Из-за свойств синусоиды эти различия стираются. Автор пособия был приучен физиками к простому правилу: «Если сомневаешься в правильности формулы, проверь ее сперва по размерностям». Когда в курсе ТОЭ он впервые узнал про формулу (3.12), возникло чувство, что тут что-то не так с размерностями. Мнимая единица сперва сопровождала электрические сигналы в первой степени, потом она же стала сопровождать сигналы во второй степени.

Попытки спросить об этом преподавателя не имели успеха, тот просто не мог понять, чего от него хотят. Потом это все забылось. Когда через 30 лет автор пособия после мучительного периода «проб и ошибок» предложил комплексные размерности, вспомнилось это первое впечатление чистого сознания, еще не прошедшего курса ТОЭ.

Число комплексных размерностей бесконечно, так как членов в формах (4.16), (4.34) также может быть бесконечно. Поэтому правила первого произведения (табл. 8) и второго (табл. 9) описаны только для двух для токов и двух для напряжений. Производных после первого произведения получается больше. Бесконечное число размерностей нумеруется нижними индексами, в качестве верхнего индекса используется только цифра «2», указывающая на квадратичность. Этот индекс имеют только «глобальные» размерности, не связанные ни с каким номером бесконечного ряда. Исходные сигналы сопровождаются малыми буквами,  $a_1$  сопровождает первый сигнал тока,  $v_2$  – второй сигнал напряжения. Первые и вторые произведения обозначены большими буквами. Эти результаты могут быть или глобальными  $a_1 \cdot a_1 = A^2$ , или локальными  $v_2 \cdot a_1 = -W_{12}$ . В последнем случае индекс «12» содержит информацию, что размерность получена перемножением каких-то сигналов «1» и «2». Последние произведения не коммутативны, то есть зависят от порядка сомножителей  $a_1 \cdot v_2 = W_{12}$ . Последнее свойство взято от кватернионов и октав. Поэтому в таблицах умножения указаны 1-й и 2-й сомножители.

Таблица 8					Таблица 9					
1-й \ 2-й	$v_1$	$v_2$	$a_1$	$a_2$	1-й \ 2-й	$A^2$	$W^2$	$A_{12}$	$V_{12}$	$W_{12}$
$v_1$	$V^2$	$V_{12}$	$W^2$	$W_{12}$	$v_1$					
$v_2$	$-V_{12}$	$V^2$	$-W_{12}$	$W^2$	$v_2$	$S^2$				
$a_1$	$-W^2$	$W_{12}$	$A^2$	$A_{12}$	$a_1$		$S^2$			
$a_2$	$-W_{12}$	$-W_{12}$	$-A_{12}$	$A^2$	$a_2$			$S^2$		
									$S^2$	
										$S^2$

В последней таблице даны только одни диагональные результаты, так как прочие не используются для решения поставленной задачи. Применение для формулы (4.61) выглядит следующим образом

$$\begin{aligned} \dot{U}_s \cdot \dot{I}_s &= (U_{S1} \cdot v_1 + U_{S2} \cdot v_2) \cdot (I_{S1} \cdot a_1 + I_{S2} \cdot a_2) = \\ &= (U_{S1} \cdot I_{S1} + U_{S2} \cdot I_{S2}) \cdot W^2 + (U_{S1} \cdot I_{S2} - U_{S2} \cdot I_{S1}) \cdot W_{12} ; \quad (\text{а}) \end{aligned}$$

$$\dot{U}_k \cdot \dot{I}_k = (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) \cdot W^2 + (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1) \cdot W_{12} ; \quad (\text{б})$$

$$\begin{aligned} (\dot{U}_s \cdot \dot{I}_s) \cdot (\dot{U}_k \cdot \dot{I}_k) &= (U_{S1} \cdot I_{S1} + U_{S2} \cdot I_{S2}) \cdot (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) \cdot S^2 + \\ &+ (U_{S1} \cdot I_{S2} - U_{S2} \cdot I_{S1}) \cdot (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1) \cdot S^2 + \quad (\text{в}) \\ &+ \{ (U_{S1} \cdot I_{S1} + U_{S2} \cdot I_{S2}) \cdot (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1) - \\ &- (U_{S1} \cdot I_{S2} - U_{S2} \cdot I_{S1}) \cdot (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) \} \cdot W^2 \cdot W_{12} . \quad (\text{г}) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Для получения искомого результата надо из (5.1) изъять (экстрактировать) члены с множителем  $S^2$ , то есть избавиться от членов (г):

$$S_{Sk}^2 = \text{Ex} \{ (\dot{U}_s \cdot \dot{I}_s) \cdot (\dot{U}_k \cdot \dot{I}_k) \}. \quad (5.2)$$

Предложенные комплексные размерности избавили нас от применения понятия «сопряженный комплекс». Он был введен в комплексные числа из-за коммутативности обычной и мнимой единиц  $1 \cdot i = i \cdot 1$ . Если бы сразу их сделать не коммутативными  $1 \cdot i = -i \cdot 1$ , как во всех гиперкомплексных числах, то не потребовалось бы введения этой операции сопряжения. Для формулы (4.34)

$$\begin{aligned} \dot{U}_s \cdot \dot{U}_k &= (U_{S1} \cdot v_1 + U_{S2} \cdot v_2) \cdot (U_1 \cdot v_1 + U_2 \cdot v_2) = \\ &= (U_{S1} \cdot U_1 + U_{S2} \cdot U_2) \cdot V^2 + (U_{S1} \cdot U_2 - U_{S2} \cdot U_1) \cdot V_{12} ; \quad (\text{а}) \end{aligned}$$

$$\dot{I}_s \cdot \dot{I}_k = (I_{S1} \cdot I_1 + I_{S2} \cdot I_2) \cdot A^2 + (I_{S1} \cdot I_2 - I_{S2} \cdot I_1) \cdot A_{12} ; \quad (\text{б})$$

$$\begin{aligned} (\dot{U}_s \cdot \dot{U}_k) \cdot (\dot{I}_s \cdot \dot{I}_k) &= \{ (U_{S1} \cdot U_1 + U_{S2} \cdot U_2) \cdot (I_{S1} \cdot I_1 + I_{S2} \cdot I_2) + \\ &+ (U_{S1} \cdot U_2 - U_{S2} \cdot U_1) \cdot (I_{S1} \cdot I_2 - I_{S2} \cdot I_1) \} \cdot S^2 + \quad (\text{в}) \\ &+ \{ (U_{S1} \cdot U_1 + U_{S2} \cdot U_2) \cdot (I_{S1} \cdot I_2 - I_{S2} \cdot I_1) - \\ &- (U_{S1} \cdot U_2 - U_{S2} \cdot U_1) \cdot (I_{S1} \cdot I_1 + I_{S2} \cdot I_2) \} \cdot W^2 \cdot W_{12} . \quad (\text{г}) \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$S_{Sk}^2 = \text{Ex} \{ (\dot{U}_s \cdot \dot{U}_k) \cdot (\dot{I}_s \cdot \dot{I}_k) \}. \quad (5.4)$$

Эксперименты на ЭВМ показали одинаковые результаты формул (4.16), (4.34) при представлениях сигналом гораздо большим числом составляющих. Чтобы получить их, проще всего еще усложнить законы работы ключей схемы (рис.8). В формулах (4.16), (4.34) при этом резко возрастает число членов (1-2), (1-3)..., соответствующих разложениям векторных пар [.,.][.,.] на составляющие. Предложенные комплексные размерности (табл. 8, 9) формировали все эти члены. Пока не получены какие-то ошибочные или неприемлемые результаты. Но при этом не обнаружены и какие-то

преимущества: работать с формулами балансов (4.16), (4.34) можно и не прибегая к дополнительным, по сути промежуточным, комплексным представлениям (5.1), (5.3).

Теперь о «размерности» комплексных размерностей. В выражениях (5.1), (5.3) они ведут себя как безразмерные величины, из-за чего их следует называть «числами». Термин «размерности» показался удобным автору пособия по двум причинам. Первая уже упоминалась: размерные величины в первом и втором произведениях подчиняются разным законам, также ведут себя предлагаемые числа. Затем в предлагаемых формулах одни числа «тяготеют» к сигналам напряжений, другие – к токам и т.д. Слово «размерность» подчеркивает эту тягу. Если предлагаемая новая теория балансов энергетических ответственностей будет признана, надо будет доработать данное предложение. Может быть, удастся избавиться от этой «тяги» и ввести новые комплексные числа, а не «размерности».

## 5.2. Векторное произведение

Первый раз термин «векторное произведение» встретился в формуле (4.7), где квадрат этого произведения оказался очень важным для всей теории определителем Грама. Далее в тексте постоянно встречаются «векторные пары», они вошли в две из трех форм записи главной формулы энергетического баланса (4.25). При синусоидальных сигналах в курсе ТОЭ через него определяют реактивную мощность

$$Q = [u, i] = U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1 \quad (5.5)$$

с точностью до знака этой формулы, о котором не могут договориться. Уже отмечалось, что вряд ли когда можно будет вообще договориться об определении одного векторного произведения, в предлагаемой теории оно всегда представлено «векторными парами» или «векторным квадратом», как в первой формуле (4.7). Известно уже и скалярная форма нахождения численного значения этой пары (4.23). Подробнее разобраться во всем этом помогают комплексные размерности.

Выражение (5.1 б) можно переписать так

$$\begin{aligned} \dot{U}_k \cdot \dot{I}_k &= (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) \cdot W^2 + (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1) \cdot W_{12} = (a) \\ &= (u_k, i_k) \cdot W^2 + [u_k, i_k] \cdot W_{12}. \quad (б) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Из выражений (5.5), (5.6) кажется, что ясно, «кто есть кто». Однако запись для трех функциональных ортов показывает, что не все так просто

$$\begin{aligned}
\dot{U}_k \cdot \dot{I}_k &= (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3) \cdot W^2 + (a) \\
&+ (U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1) \cdot W_{12} + (1-2) \\
&+ (U_1 \cdot I_3 - U_3 \cdot I_1) \cdot W_{12} + (1-3) \\
&+ (U_2 \cdot I_3 - U_3 \cdot I_2) \cdot W_{12} = (2-3) \\
&= (u_k, i_k) \cdot W^2 + [u_k, i_k] \cdot ? \quad (б)
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Проблема состоит в том, что оба выражения написаны для одних и тех же сигналов одного и того же элемента, но в первом случае исследователь разложил эти сигналы по двум ортам, а во втором – по трем. То есть (5.6) и (5.7) – разные формы записи абсолютно одного и того же! Далее можно провести разложение по бесконечному числу ортов. Что же тогда называть векторным произведением  $[u_k, i_k]$  и какую комплексную размерность при нем ставить в выражении (5.7 б)? Проблема оказывается качественно сложнее, чем определение договорного знака в выражении (5.5). И не надо думать, что все это проблемы цепей с несинусоидальными сигналами. Исследователь имеет право преобразовать синусоидальный и косинусоидальный орты в любое число других функциональных ортов и тогда уже будет много членов в выражении реактивной мощности (5.5) и надо будет их отделять какими-то комплексными единицами.

Описанная свобода действий исследователя носит одноразовый характер. После достаточно свободного выбора функционального базиса, он обязан придерживаться этого базиса для всех элементов цепи! Тогда каждый элемент в представлениях (5.5), (5.6), (5.7) будет иметь конкретную запись и конкретное числовое значение. Таким образом, векторное произведение – понятие относительное даже по числу элементов, оно в значительной мере зависит от выбранного функционального базиса. Выбор базиса осуществляет исследователь под требования решаемой им задачи. Например, ему требуется разобраться с балансом внутри цепи какой-то формы сигнала. Тогда эта форма принимается за первый функциональный орт и т.д.

Если считать, что внутри записи  $[u_k, i_k]$  содержатся комплексные члены, то и произведении двух векторных произведений должны появиться разные комплексные члены. Так в произведении (5.1) появились не нужные нам члены с неопределенными в таблице 9 произведениями  $W_2 \cdot W_{12}$  (5.1 г). Они были просто отброшены, то надо это формализовать! Поэтому правильнее будет дополнить запись для векторной пары операцией экстракции. Для трех ортов получится запись

$$\begin{aligned}
\text{Ex}\{ [v,w] \cdot [x,y] \} &= & \text{(а)} \\
&= (V_1 \cdot W_2 - V_2 \cdot W_1) \cdot (X_1 \cdot Y_2 - X_2 \cdot Y_1) + \\
&\quad + (V_1 \cdot W_3 - V_3 \cdot W_1) \cdot (X_1 \cdot Y_3 - X_3 \cdot Y_1) + & \text{(б)} \quad (5.8) \\
&\quad + (V_2 \cdot W_3 - V_3 \cdot W_2) \cdot (X_2 \cdot Y_3 - X_3 \cdot Y_2) = \\
&= (V_1 \cdot X_1 + V_2 \cdot X_2 + V_3 \cdot X_3)(W_1 \cdot Y_1 + W_2 \cdot Y_2 + W_3 \cdot Y_3) - & \text{(в)} \\
&\quad - (V_1 \cdot Y_1 + V_2 \cdot Y_2 + V_3 \cdot Y_3)(W_1 \cdot X_1 + W_2 \cdot X_2 + W_3 \cdot X_3) = \\
&= (v,x) \cdot (w,y) - (v,y) \cdot (w,x). & \text{(г)}
\end{aligned}$$

И ранее, и в дальнейшем векторная пара будет пониматься как число (скаляр), получаемое по формулам (4.23), (5.8), а операции экстракции будет опускаться. Векторный квадрат – это тоже число, получаемое по формуле (4.24). Это – модуль векторного произведения, никакой новый базис не может его изменить!

А как же до этого понятие векторного произведения  $[x,y]$  использовали не только в электротехнике, но и в механике без всяких оговорок? В том то и дело, что использовали, но с большими оговорками. В механике брали базис из двух графических векторов (две мнимые единицы  $i, j$ ) и определяли векторное произведение третьим, перпендикулярным к ним вектором, то есть вводили третью мнимую единицу ( $k$ )! В электротехнике начали также: были заданы два функциональных орта (синусоида и косинусоида), определены соответствующие им единицы, но одну единицу взяли действительной и расплатились за это введением странной функции сопряжения. Далее как в механике определили модуль векторного произведения (5.5), но забыли дать этому вектору перпендикулярное направление! Надо было вводить третью мнимую единицу в формулу (3.12), но кто-то (Ч.Штейнмец?) этого не сделал, а на практике все «вроде» получалось (см. эпиграф к пособию). Ошибка вошла в обыденное сознание.

В механике введено векторное произведение  $[x,y]$  как одно число с одной мнимой единицей. Многомерные пространства в механике рассматривают только фантасты. Электрики любят ряды Фурье, знают, что им соответствует бесконечно мерное пространство. Но когда дело доходит до векторного произведения, хотят видеть его одним числом, по аналогии с механикой. Но там не более трех измерений! Автор пособия вводит в электротехнику свое понятие векторного произведения в многомерном пространстве и не знает, будет ли этому какое-то соответствие в механике. Все зиждется на том, что в цепи форма 1 напряжения взаимодействует с формой 2 тока как минус форма 2

напряжения с формой 1 тока. Взаимодействия получаются только парными. Есть ли что-то подобное в механике?

Это не означает, что нельзя пользоваться квадратными скобками векторного произведения без описанных многочисленных оговорок. В следующей части пособия они широко используются для всевозможных доказательств в трехфазной цепи, например,

$$[u_A, u_A] = 0; \quad [u_A, u_B] = -[u_B, u_A] = [u_B, u_C]. \quad (5.9)$$

Если в результате преобразований сложной формулы множителем оказывается первая запись, то весь результат будет нулевым. Вторую запись можно дать в любой из трех форм, что поможет сделать красивыми алгебраические преобразования. И все это можно делать, не оговаривая в каком базисе определяются векторные произведения. Они делаются в одно и том же базисе и все!

### 5.3. Извращенное (гиперболическое) векторное произведение

По ходу изложения материала все чаще надо будет обращаться к форме (4.25 б) интегральной записи энергетического баланса. В этой форме баланс векторной пары по всей цепи всегда равен нулю (табл. 5, 6, 7). Этот член участвует только в перераспределении ответственности за полную мощность цепи между элементами, то есть решает вопросы справедливости. Если решить вопрос антисправедливо и поменять знак этой пары, то баланс по всей цепи не нарушится. Это можно записать, а затем произвести алгебраические преобразования

$$\begin{aligned} S_{S_{ki}}^2 &= (u_S, u_k)(i_S, i_k) - [u_S, u_k][i_S, i_k] = & (a) \\ &= \{ (u_S, u_k)(i_S, i_k) + (u_S, i_k)(u_k, i_S) \} - (u_S, i_S)(u_k, i_k) = & (b) \quad (5.10) \\ &= [[u_S, i_k]] \cdot [[u_k, i_k]] - (u_S, i_S)(u_k, i_k) = & (b) \\ &= Q_{S_{ki}} \cdot Q_{i_k} - P_S \cdot P_k. & (g) \end{aligned}$$

Читатель согласится, что (в жизни, природе, в этом пособие и т.д.) труднее всего доказать или опровергнуть справедливость распределения чего угодно, если общий баланс этого выполняется. Для опровержения предложения (5.10 а) надо принять его, преобразовать к различным формам и прийти к абсолютно неприемлемому выводу.

Введению в новую теорию баланса ответственностей в этом пособии началось с формулы (2.4) для случая сети. Отмечалось, что неприятие ее делает бессмысленным дальнейшее чтение. Теперь чтение зашло слишком далеко, значит эта формула «общепринята». Если формулу (5.10 а) применить для сети,

то векторная пара обнуляется из-за  $[u_s, u_s] = 0$  и она совпадает с формулой (2.4). Приемлемый результат!

При выполнении баланса по всей цепи, ответственности отдельных элементов будут различаться по формулам (4.25) и (5.10). Но можно предположить, что несправедливость заложена в формулу (4.25). Противоречий нет! Да и вообще в формулах (4.25 б), (5.10 а) можно отбросить векторные пары и оставить только член  $(u_s, u_k)(i_s, i_k)$ , который и обеспечивает баланс ответственностей по всей цепи. Вот вам и третья формула!

Можно раскрыть векторную пару формулами (4.23), (5.8), фигурными скобками в (5.10 б) выделить два члена, ввести в (5.10 в) для них новую форму записи «извращенного векторного произведения», обозначить каждый сомножитель через «извращенную реактивную мощность» (5.10 г). Тогда в последней форме записи появиться уже «привычный» нам член активного баланса ответственностей  $P_s \cdot P_k$ , но с противоположным знаком. Сперва так и хочется признать это абсолютно неприемлемым. Однако это «неприемлемое» выступает в паре с «извращенным» и отбросить такое сочетание будет не совсем строгим решением. Раз не удастся просто ликвидировать появившийся «извращенный мутант», надо его исследовать.

Переход от (б) к (в) в формуле (5.10) определяет формулу раскрытия извращенной векторной пары. Далее оказывается, что ее можно записать и через любое число ортогональных составляющих. Правила записи ясны из примера с тремя ортами

$$\begin{aligned}
 & [[v, w]] \cdot [[x, y]] = \quad (a) \\
 & = (v, x) \cdot (w, y) + (v, y) \cdot (w, x) \quad = (б) \\
 & = (V_1 \cdot W_1 + V_1 \cdot W_1) \cdot (X_1 \cdot Y_1) + \quad (5.11) \\
 & + (V_1 \cdot W_2 + V_2 \cdot W_1) \cdot (X_1 \cdot Y_2) + \quad (в) \\
 & + (V_1 \cdot W_3 + V_3 \cdot W_1) \cdot (X_1 \cdot Y_3) + \\
 & + (V_2 \cdot W_1 + V_1 \cdot W_2) \cdot (X_2 \cdot Y_1) + \\
 & + (V_2 \cdot W_2 + V_2 \cdot W_2) \cdot (X_2 \cdot Y_2) + \quad (г) \\
 & + (V_2 \cdot W_3 + V_3 \cdot W_2) \cdot (X_2 \cdot Y_3) + \\
 & + (V_3 \cdot W_1 + V_1 \cdot W_3) \cdot (X_3 \cdot Y_1) + \\
 & + (V_3 \cdot W_2 + V_2 \cdot W_3) \cdot (X_3 \cdot Y_2) + \quad (д) \\
 & + (V_3 \cdot W_3 + V_3 \cdot W_3) \cdot (X_3 \cdot Y_3) .
 \end{aligned}$$

Под формулу (5.11) можно разработать специфическую систему гиперкомплексных чисел и это частично будет сделано в следующей части.

Под форму (5.11) можно переписать правила раскрытия обычной векторной пары

$$\begin{aligned}
 [v,w] \cdot [x,y] &= \quad \quad \quad \text{(а)} \\
 &= (v,x) \cdot (w,y) - (v,y) \cdot (w,x) \quad = \text{(б)} \\
 &= (V_1 \cdot W_1 - V_1 \cdot W_1) \cdot (X_1 \cdot Y_1) + \quad \quad \quad \text{(5.12)} \\
 &+ (V_1 \cdot W_2 - V_2 \cdot W_1) \cdot (X_1 \cdot Y_2) + \quad \quad \quad \text{(в)} \\
 &+ (V_1 \cdot W_3 - V_3 \cdot W_1) \cdot (X_1 \cdot Y_3) + \\
 &+ (V_2 \cdot W_1 - V_1 \cdot W_2) \cdot (X_2 \cdot Y_1) + \\
 &+ (V_2 \cdot W_2 - V_2 \cdot W_2) \cdot (X_2 \cdot Y_2) + \quad \quad \quad \text{(г)} \\
 &+ (V_2 \cdot W_3 - V_3 \cdot W_2) \cdot (X_2 \cdot Y_3) + \\
 &+ (V_3 \cdot W_1 - V_1 \cdot W_3) \cdot (X_3 \cdot Y_1) + \\
 &+ (V_3 \cdot W_2 - V_2 \cdot W_3) \cdot (X_3 \cdot Y_2) + \quad \quad \quad \text{(д)} \\
 &+ (V_3 \cdot W_3 - V_3 \cdot W_3) \cdot (X_3 \cdot Y_3) .
 \end{aligned}$$

В каждой тройке (в), (г), (д) этой формы записи есть один член с нулевым множителем. Его трудно было бы получить обычными преобразованиями известных формул, он написан ради симметрии записи с формой (5.11). Только появление извращенной формы позволило увидеть внутреннюю красоту и симметрию прямой!

Извращенное (гиперболическое) векторное произведение появится в следующей части пособия.

## 6. ПАРАДОКСЫ КОМПЕНСАЦИИ И ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

### 6.1. Компенсация и снижение потерь энергии

Концепция Фризе рекомендует скомпенсировать пассивный ток прямо у места его появления, а не прогонять по всем длинным линиям электроснабжения, то есть пустить ток по пути в один метр, а не в тысячу километров, уменьшая этим потери... При всей очевидной правоте этой фразы ее конец ошибочен! Специалистам хорошо известно, что приведенное активное сопротивление мощных трактов передачи энергии ничтожно по сравнению с эквивалентным сопротивлением компенсатора. В компенсаторе, замыкающем на себя пассивный ток, так много теряется энергии, что при уменьшении потерь в сети общие потери увеличиваются.

Пусть к сети с эквивалентным сопротивлением  $r$  (это сопротивление обмоток фидерного трансформатора) был подключен один электроприемник с действующими значениями токов активной  $I_a$  и пассивной  $I_{\Pi}$  составляющих. Потери в сети определялись формулой

$$\Delta P_S = r \cdot I_S^2 = r \cdot (I_a^2 + I_{\Pi}^2). \quad (6.1)$$

После включения компенсатора с эквивалентным сопротивлением потерь  $r_k$  весь пассивный ток замкнулся через него и новые потери в сети и компенсаторе определяются формулами

$$\begin{aligned} \Delta P_{S1} &= r_1 \cdot I_a^2 ; & (a) \\ \Delta P_k &= r_k \cdot I_{\Pi}^2 . & (б) \end{aligned} \quad (6.2)$$

Уменьшение сетевого тока позволяет выбрать фидерный трансформатор меньшей номинальной мощности (экономия на капитальных затратах), который имеет другое эквивалентное сопротивление  $r_1$ . Связь общих потерь в трансформаторе с его полной номинальной мощностью  $S = U_H \cdot I_H$  описывается законом М. Видмара (известный электротехник и шахматист)

$$\Delta P_s = k \cdot S^a , \quad (6.3)$$

где  $a = 0.75$  [42]. Это значение является приближенным. Если предположить, что по такому же приближенному закону изменяются потери в меди трансформатора и приравнять формулы (6.1) и (6.2), выразить пассивный ток через активный и «тангенс фи» (1.23), то после преобразований получится выражение

$$K = \frac{\Delta P_s}{\Delta P_{S1} + \Delta P_k} = \frac{(1 + \operatorname{tg} 2\varphi)^{\frac{a}{2}}}{1 + \operatorname{tg}^a \varphi} . \quad (6.4)$$

При  $a = 0.75$  и типовом значении  $\operatorname{tg} \varphi = 0.4$

$$K = \frac{(1 + 0.16)^{0.375}}{1 + 0.503} = \frac{1.057}{1.503} = 0.703. \quad (6.5)$$

Из расчетов видно, что компенсация пассивного тока уменьшила бы потери в трансформаторе на 16%, но из-за установки трансформатора меньшей номинальной мощности с большим сопротивлением эти потери уменьшились только на 6%, но добавилось 50% потерь в компенсаторе, в итоге общие потери после компенсации возросли на 30%. Понятно, что приведенные значения процентов приближенные, так как надо оговаривать каждый раз, что взято за базу, но общая картина изменения потерь в расчете (6.5) хорошо видна. Для уменьшения общих потерь надо применять компенсатор с очень маленьким эквивалентным сопротивлением, но это означает увеличение его номинальной мощности, то есть увеличение капитальных затрат на него.

Материал данного параграфа находится «не в теме» учебного пособия, в пособии излагается энергетическая теория, позволяющая распределить ответственность за потери в сети электроснабжения между электроприемниками. Но читатели должны знать об этом «первом парадоксе» компенсации. Специалисты это тоже знают и предпочитают сразу создавать идеальные электроприемники и преобразователи энергии без пассивного тока.

## 6.2. Компенсатор как независимый электроприемник

Компенсаторы больше теряют в себе энергии, чем экономят в сети. Однако размер скидок с тарифа или премия за компенсацию часто превышает стоимость сэкономленной в сети электроэнергии. Может быть, тут играют роль субъективные факторы и отношение к неоправданным потерям всегда было хуже, чем к оправданным. Новая теория позволяет теперь не только объективно рассчитать потери в сети по вине конкретного электроприемника, но и только, например, из-за его реактивной составляющей. Появляется возможность введения отдельных тарифов за оправданные и неоправданные потери. Но тут возникает «второй парадокс» полной компенсации.

По формулам (4.11), (4.25) положительная ответственность означает загрузку сети и соответствующую плату, отрицательная соответствует компенсации и снижению тарифов. Пусть до установки компенсатора из сети потреблялась реактивная мощность потребителей  $Q_{\text{п}}$ , был установлен компенсатор на полную компенсацию так, что текущее значение реактивной мощности  $Q_{\text{с}} = Q_{\text{п}} + Q_{\text{к}} = 0$ . Доля относительного «реактивного» участия компенсатора составит  $Q_{\text{с}} \cdot Q_{\text{к}} = 0 \cdot Q_{\text{к}} = 0$ . Такова будет объективная премия за компенсацию, а из-за активных потерь компенсатора  $P_{\text{к}} > 0$  член  $P_{\text{с}} \cdot P_{\text{к}}$  будет положительным. То есть, если бы этот компенсатор был независимым электроприемником и даже частной собственностью, а его владелец хотел бы получать деньги по объективным показаниям счетчиков согласно формулам, то он понес бы одни убытки. При перекомпенсации – пришлось бы платить еще и за нее.

Прочувствовать это явление проще по другому члену относительного баланса  $P_{\text{с}} \cdot P_{\text{к}}$ , так как оба его сомножителя определяются понятными обыденному сознанию правилами. Если в цепи два элемента и  $P_1 = -P_2$ ,  $P_{\text{с}} = P_1 + P_2 = 0$ , то ответственность каждого элемента за загрузку сети активной мощностью будет нулевой  $P_{\text{с}} \cdot P_1 = 0 \cdot P_1 = 0$  согласно формуле объективного универсального баланса (4.11). Такой баланс является объективным, поскольку он учитывает реальную обстановку загрузки сети электроснабжения. Не

загружена сеть активной мощностью, нет от нее потерь, не загружен ей сетевой трансформатор, нет в сети затрат – и нечего брать с электроприемников, а тем более, платить им! Не надо платить не по первой, ни по второй ставке двухставочного тарифа.

Теперь можно согласиться, что при полной компенсации ( $Q_S = 0$ ) любое  $Q_k$  никак не участвует в воздействии на сеть и все потому, что на все энергопроцессы мы смотрим с точки зрения воздействия на тракт передачи энергии. Если теперь вернуться к владельцу компенсатора, то, если он хочет больше заработать, выступая как ЭЛЕКТРОПРИЕМНИК, он должен компенсировать  $Q_{\text{п}}$  ровно наполовину. Тогда  $Q_k = -Q_{\text{п}}/2$ , текущее значение  $Q_S = Q_{\text{п}} + Q_k = Q_{\text{п}}/2$  и  $Q_S \cdot Q_k = Q_{\text{п}} \cdot Q_{\text{п}}/4 = Q_{\text{п}}^2/4$  – это максимум, что может получить владелец по предлагаемой теории.

### 6.3. Компенсатор как... компенсатор

Эффект от компенсатора определяется разностью текущего значения полной мощности сети с включенным компенсатором  $S_S^2$  и до его включения  $S_S^2'$  (6.6 а). Строго говоря, данная задача не решается, так как по текущим сигналам  $u_S, i_S, u_k, i_k$  с работающим компенсатором надо предсказать новые значения сигналов цепи после отключения компенсатора. Для случая сети бесконечной мощности для обоих режимов  $u_S = u_k$ , ток сети без компенсатора ( $i_S - i_k$ ) и можно получить приближенную формулу (6.6 б,в):

$$\begin{aligned} \Delta S_k^2 &= S_S^2 - S_S^2' = & \text{(а)} & \quad (6.6) \\ &= U_S^2 \cdot \{ (i_S, i_S) - (i_S - i_k, i_S - i_k) \} = & \text{(б)} & \\ &= U_S^2 \cdot \{ 2 \cdot (i_S, i_k) - I_k^2 \}. & \text{(в)} & \end{aligned}$$

Эта формула замечательна тем, что формы токов могут быть произвольными (нелинейный компенсатор нелинейных режимов, но только в сети).

В случае цепи изменение режима работы одного элемента влияет на режимы всех элементов. Если пренебречь этим влиянием, то можно дать оценку эффективности работы компенсатора. Можно написать также приближенную формулу для тока произвольного элемента цепи (и компенсатора), приведенного ко входу питания

$$i_{Sk} = \frac{(u_S, u_k) \cdot i_k - (u_S, i_k) \cdot u_k + (u_k, i_k) \cdot u_S}{(u_S, u_S)}. \quad (6.7)$$

Действительно, если подставить эту формулу в (2.4), то получится основная формула энергетического баланса (4.25 в). Это доказывает, по крайней мере,

непротиворечивость формулы (6.7) базовым. Теперь формула (6.6 а) для цепи будет выглядеть

$$\Delta S_k^2 = U_S^2 \cdot \{ I_S^2 - (i_S - i_{Sk}, i_S - i_{Sk}) \}. \quad (6.8)$$

Дальше должны последовать алгебраические упрощающие преобразования. В результатах появляются члены  $I_k^2$ ,  $U_k^2$  при квадратировании формулы (6.7). В эти квадраты войдут и небалансируемые члены сигналов компенсатора (4.4), (4.6). Можно ли допустить это – вопрос философский. В любых скалярных произведениях с сигналами сети типа  $(u_S, i_k)$ ,  $(u_k, i_S)$  эти члены исчезают, но в  $(u_k, u_k)$ ,  $(i_k, i_k)$  появляются. Просто раньше в пособии мы с этим не сталкивались. Можно от небалансируемых составляющих полностью избавиться, представив сигналы  $u_k$ ,  $i_k$  в (6.7) только балансируемыми составляющими из формул (4.5 в, г). Но при отключении компенсатора могут измениться формы сетевых сигналов и тогда столь сложные преобразования будут напрасными. Читатели могут поработать в этом направлении.

Таким образом, представляется возможным оценка текущей эффективности работы компенсатора как КОМПЕНСАТОРА, а не как электроприемника. При этом такой режим должен быть заранее согласован с энергосистемой, а расчеты вестись по другим приближенным формулам. Эти формулы будут приближенными, так как нельзя предсказать сигналы в сети при отключенном компенсаторе в общем случае. Вопрос о том, кто кого компенсирует, может быть решен только субъективно.

#### 6.4. Виновники резонансов

Резонансные явления на высших гармониках значительно ухудшают качество напряжения сетей электроснабжения. Актуальна задача поиска виновников и наложения на них какой-то объективно оцененной ответственности. Поэтому автор пособия считает важным параллельное научное направление энергетической теории, в которой ущерб оценивается не по потерям, а по снижению качества напряжения. Но резонансные явления вызывают также резонансные токи в сетевом трансформаторе и дополнительные потери энергии. Возникает вопрос, не может ли предлагаемая теория по этим потерям выявить виновника резонанса?

На рис. 10 показана до предела упрощенная схема системы электроснабжения синусоидального напряжения с действующим значением  $E_S$  из трех элементов  $L$ ,  $C$  и генератора гармоники, представленного генератором тока с действующим значением  $I$ .

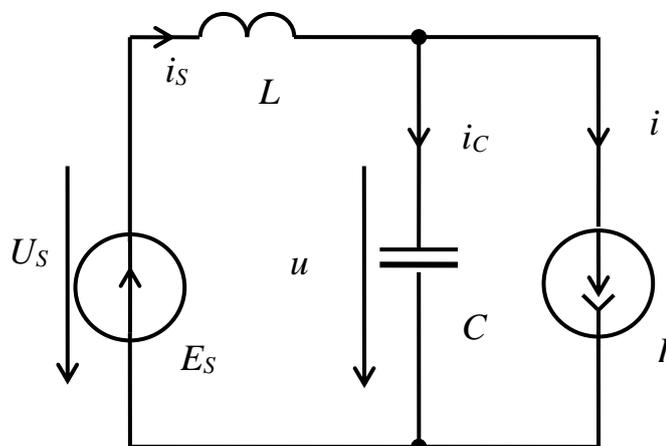


Рис. 10

Квадрат действующего тока сети

$$I_{S2} = \frac{E_s^2 \cdot \omega_s^2 \cdot C^2}{(\omega_s^2 \cdot L \cdot C - 1)^2} + \frac{I^2}{(\omega_r^2 \cdot L \cdot C - 1)^2} \quad (6.9)$$

показывает, что ток генератора гармоника проходит в сеть, а резонанс на частоте гармоника может многократно увеличить его значение.

Рассчитаем ответственность генератора гармоника перед сетью по формуле (4.25 в). Частоты сети  $\omega_s$  и генератора  $\omega_r$  различаются, значит  $(u_k, i_k) = 0$ . Индуктивность и емкость не потребляют энергии, в этих условиях не может потреблять энергию и генератор, значит  $(u_s, i_s) = 0$ . Для баланса остается только первый член в формуле (4.25 в). В итоге

$$(u_s, u) = - \frac{E_s^2}{\omega_s^2 \cdot L \cdot C - 1}; \quad (i_s, i) = - \frac{I^2}{\omega_r^2 \cdot L \cdot C - 1}; \quad (a) \quad (6.10)$$

$$S_{Si}^2 = \frac{E_s^2 \cdot I^2}{(\omega_s^2 \cdot L \cdot C - 1)(\omega_r^2 \cdot L \cdot C - 1)}. \quad (б)$$

Из формулы (6.10 б) видно, что резонансы могут возникать на частотах сети и генератора. При этом слева и справа от резонансных частот знак знаменателя меняется на противоположный. Значит, возможны и отрицательные знаки всего выражения. А отрицательный знак – это премия со стороны сети генератору за компенсацию. Для обыденного сознания этот генератор всегда останется виновником резонанса на его частоте, но предлагаемая теория дает оба знака. Это противоречащий обыденному сознанию парадокс.

### 6.5. Измерения индукционными счетчиками

Существующая система энергорасчетов построена на записях (регистрации с помощью центральной ЭВМ) показаний индукционных счетчиков электроэнергии или эквивалентных им электронных. Имея такие регистрации, ЭВМ, например, раз за пол часа, производит все расчеты, включая за получасовые максимумы. Таких систем еще мало, но они уже разработаны, представлены на рынке и внедряются. Такую регистрацию может организовать сам обслуживающий персонал только на основе существующих индукционных счетчиков и получасовых записей в журналы, то есть в любой из существующих систем электроснабжения. Обмотки индукционных счетчиков допускают нестандартные включения токовой обмотки на напряжение и обмотки напряжения на ток. Это описано в работе [4], это делал автор пособия, это доступно обслуживающему персоналу. Нужны специальные трансформаторы тока и напряжения и специальные шунты. Потери энергии в счетчике возрастают при этом в несколько раз, но это – десятки Ватт всего. Не надо электроники! Индукционные счетчики превращаются в измерители скалярного произведения  $(x, y)$  любых электрических сигналов  $x(t)$ ,  $y(t)$  за любой интервал времени.

Скалярное произведение функциональных сигналов – это усредненный за измеряемый период интеграл произведения мгновенных значений этих сигналов (2.3). Под периодом всегда понимался период напряжения сети. Хотелось бы избежать сложной операции деления на этот период. Далее потребуется подсчитать ответственность электроприемника перед сетью на получасовом максимуме, надо будет придумывать устройство интегрирования результата этого деления. Заманчиво получить формулы ответственности не в размерностях квадратов мощности, а в размерностях энергии, и попытаться применить для измерений индукционные счетчики. Тогда можно будет считать ответственность на произвольном промежутке

времени, избежать аппаратной реализации операции деления. Практика требует введения нового функционала – интеграла скалярного произведения на любом интервале времени. Определим его для сигналов  $x(t)$ ,  $y(t)$  на интервале от  $t$  до  $t_1$  формулой

$$(x,y.t-t_1) = \int_{t_1}^t x(t) \cdot y(t) dt. \quad (6.11)$$

При нулевом отсчете  $t=0$  упростим обозначение  $(x,y.t)$ . Введенное функциональное обозначение очень просто определяется на практике, а классическое скалярное произведение  $(x,y)$  легко написать на бумаге, но сложно измерить. Общая интегральная формула энергетического баланса (4.25 в) переписется в новых обозначениях

$$W_S^2 = (u_S, u_S.t)(i_S, i_S.t) = \sum_{k=1}^n W_{Sk}^2 = \quad (6.12)$$

$$= \sum_{k=1}^n [(u_S, i_S.t)(u_k, i_k.t) - (u_S, i_k.t)(u_k, i_S.t) + (u_S, u_k.t)(i_S, i_k.t)].$$

(1)
(2)
(3)

Здесь по аналогии с обозначением  $S_{Sk}^2$  с размерностью  $(В \cdot А)^2$  введено

обозначение  $W_{sk}^2$  с размерностью (В·А·с). Смысл этой формулы требует пояснения. Формулы балансов доказаны для периодических на периоде  $T$  сигналах, этот период имеется в скалярном произведении (2.3), на этот период определяются функциональные орты, после известных действий над которыми и появилась интегральная формула (4.25). После выноса из знаменателя этого периода и появляется формула (6.12). Формула как бы предполагает периодичность процесса с этим может быть очень большим периодом, то есть до и после периода следовал и последует такой же процесс с тем же периодом.

Формула (6.12) связывает между собой результаты регистраций восьми индукционных счетчиков на одном интервале времени, она имеет восемь членов в круглых скобках. Две регистрации являются общесетевыми, поэтому на каждый электроприемник требуется шесть счетчиков. После регистраций производятся расчеты по этой формуле, аппаратно делать эти расчеты не имеет смысла. Например, потери электроэнергии по вине  $k$ -го электроприемника за этот интервал времени определяются

$$\Delta W_{sk} = \frac{W_{sk}^2}{(u_s, u_s.t)} \cdot r, \quad (6.13)$$

где  $r$  – активное сопротивление сети. Баланс формулы (6.13) по всем электроприемникам приводит к результату  $(i_s, i_s.t) \cdot r$ , то есть интегралу квадрата сетевого тока за рассматриваемый интервал времени, умноженному на сопротивление, или сетевым потерям  $\Delta W_s$ . Формула (6.12) – трехчленная и позволяет найти не только полную ответственность  $k$ -го электроприемника, но и ответственность каждого члена формулы, включая потери из-за активной и реактивной мощностей.

#### 6.6. Главный парадокс поинтервального баланса

Теперь подходим к главному парадоксу этой «справедливой» балансировки. Например, для цепи (рис. 8) отдельно рассчитаем ответственности за потери при сигналах (рис. 9 а) на трех интервалах  $T_1 = 0.64$ ,  $T_2 = 0.36$  и суммарном  $T_{1-2} = T_1 + T_2 = 1$  по формулам (6.12), (6.13) при  $r = 1$ . Для последнего случая из-за единичности интервала  $T_1 + T_2 = 1$  значения  $W_{sk}^2$  будут численно совпадать с  $S_{sk}^2$ , которые уже рассчитаны ранее в (4.30 б,в). На первых двух интервалах все сигналы постоянны, что существенно упрощает расчеты  $W_{sk}^2$  по формуле (6.12), так как сумма членов, определяющих пассивные мощности (2) + (3) = 0, равна нулю, и в балансе участвуют только активные энергии  $(u_s, i_s.t) \cdot (u_k, i_k.t)$ . Расчеты сведены в таблицу 10.

Интервал	$T_1$	$T_2$	Сумма пот-ь	Таблица 10 $T_{1-2} (4.68)$
$(u_s, u_s \cdot t)$	23.04	12.96		36
$(u_s, i_s \cdot t)$	15.36	19.44		
	$16 \cdot 0.64 \cdot 15.36 =$	$0 \cdot 0.36 \cdot 19.44 =$		$605.18 =$
$\Delta W_{S1}$	23.04	12.96		36
	= 6.827	= 0	6.827	= 16.81
$\Delta W_{S2}$	2.56	9.72	12.28	7.67
$\Delta W_{S3}$	0.853	19.44	20.293	14.92
Сумма	10.24	29.16	39.4	39.4

Расчет для 1-го элемента дан подробно. Из таблицы видно, что, если платить дважды за интервалы  $T_1$  и  $T_2$ , то суммарная плата для каждого элемента будет отличаться от одновременной платы за весь суммарный интервал. Общий баланс при этом сохраняется. Под сомнение ставится «принцип справедливости», если «в коммунальной квартире введут плату за электроэнергию два раза в месяц и ваш сосед вдруг станет платить меньше за месяц, а вы на столько же больше».

Механизм парадокса заложен изначально в развиваемую теорию, когда на выбранном интервале  $T$  (рис. 9) сигналы представлялись суммами взаимно ортогональных ортов по любой процедуре ортогонализации. И... все! Что заложили, то и получили!

Период  $T$  означает, что влево и вправо картина сигналов будет повторяться через этот период. Когда мы проводим измерения на другом интервале  $T_1$ , это означает, что мы изменяем периодичность процессов. На интервале  $T_1$  на (рис. 9а) все сигналы постоянны, и мы предполагаем их постоянство на таком же уровне слева и справа до бесконечности. При постоянных сигналах в балансе участвуют только активные мощности, которые в любой момент одинаковы (и средние, и мгновенные). Если посмотреть на (рис. 9 а) и мысленно продолжить прямые линия интервала  $0.64 \cdot T$  влево и вправо, то получится картина нового процесса, для которого расчеты столбца  $T_1$  таблицы 10 абсолютно справедливы. Справедливы они будут и на интервале  $T_2$ , и на суммарном интервале  $T_1 + T_2$ , только сумма не сойдется. Надо сознавать, что, закладывая в разработанные формулы интервал измерения, мы закладываем период всех процессов. Надо тут же мысленно представить эти процессы и согласиться или нет с выбранным интервалом. Для (рис. 9 а) это должен быть  $T_1 + T_2$ .

Возможны мгновенные измерения, то есть много раз на нулевом интервале. Тогда все сигналы тут же превратятся в постоянные на зафиксированном на момент измерения уровне. Получится баланс мгновенных (активных) мощностей, как в таблице 10 кроме последнего столбца. Баланс сойдется, но исчезнет квадратичность этого баланса.

Не надо вскрытый механизм воспринимать революционным. Он всегда присутствовал в классическом балансе активных и реактивных мощностей в линейных цепях синусоидального напряжения. Период («два пи») там всегда был задан... по умолчанию. Как только делались попытки анализа переходных процессов, что означало либо их непериодичность, либо большой период, либо определить мгновенную реактивную мощность (за малый или нулевой период), так начиналась неразбериха. Объяснение данному механизму представляет несомненный теоретический интерес, может с выходом на практику. По крайней мере, теперь ясно, что нельзя принципиально определить мгновенную реактивную мощность, так как не будет сигналов различных форм для начала процесса взаимной ортогонализации. Именно на различиях форм сигналов строятся преобразования Грама-Шмидта и вся теория относительных балансируемых энергетических составляющих. Вот почему везде выше в заголовках подчеркиваются слова «периодического напряжения».

#### 6.7. Сеть электроснабжения – никаких парадоксов!

Из столь грустного вывода есть одно, но важное для практики исключение: сеть электроснабжения бесконечной мощности, то есть реальная сеть электроснабжения, когда мы пренебрегаем влиянием электроприемника на напряжение сети. Именно в такой сети Б.С.Замараев обнаружил балансируемые и небалансируемые составляющие пассивного тока [5, 7]. Первая же формула (2.4), где появилось обозначение  $S_{sk}^2$ , была выведена для такой сети, а ответственность по этой формуле получилась МГНОВЕННОЙ и измеряемой на любом интервале! Для измерения ее достаточно частая запись показаний только двух индукционных счетчиков. И опять это нестрого, так как возникают проблемы с определением  $U_s^2$ , но только при колебаниях напряжения. Этим тоже можно пренебречь. Тогда по отсчетам  $(i_s, i_k.t)$  полная ответственность каждого электроприемника рассчитывается за любой интервал времени! Значение же общей ответственности сети электроснабжения или общий баланс  $(i_s, i_s.t)$  предложил подсчитывать индукционными счетчиками еще Р.Дрехслер [4]. Сложнее делить эту полную ответственность на «активную» и «пассивную».

## 7. ВЫДЕЛЕНИЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ДООПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

### 7.1. Ортогональные анализаторы Фризе

Предлагаемая теория позволяет не только измерить интегральные значения всевозможных составляющих ответственных для экономических расчетов, но и выделить мгновенные значения различных составляющих в специальных «анализаторах». Проще всего прямо реализовать формулы сначала Фризе, потом Замараева, затем Лохова. Анализатор Фризе должен аппаратно умножить сигнал мгновенного напряжения сети на постоянный сигнал  $x$

$$i_a = x \cdot u, \quad (7.1)$$

значение, которого надо сформировать строго в соответствии с уравнением (1.8а). Измерительные преобразователи (датчики) мощности и среднеквадратичного напряжения известны, известны и аналоговые делители. Так что, формирование постоянного сигнала  $P/U^2$  возможно. В средствах вычислительной техники такая задача решается на программном уровне, нужны только аналого-цифровые преобразователи. Если считать напряжение сети мало изменяющимся, то можно отказаться от неприятной операции деления и аналоговый анализатор Фризе будет иметь вид (рис. 11 а).

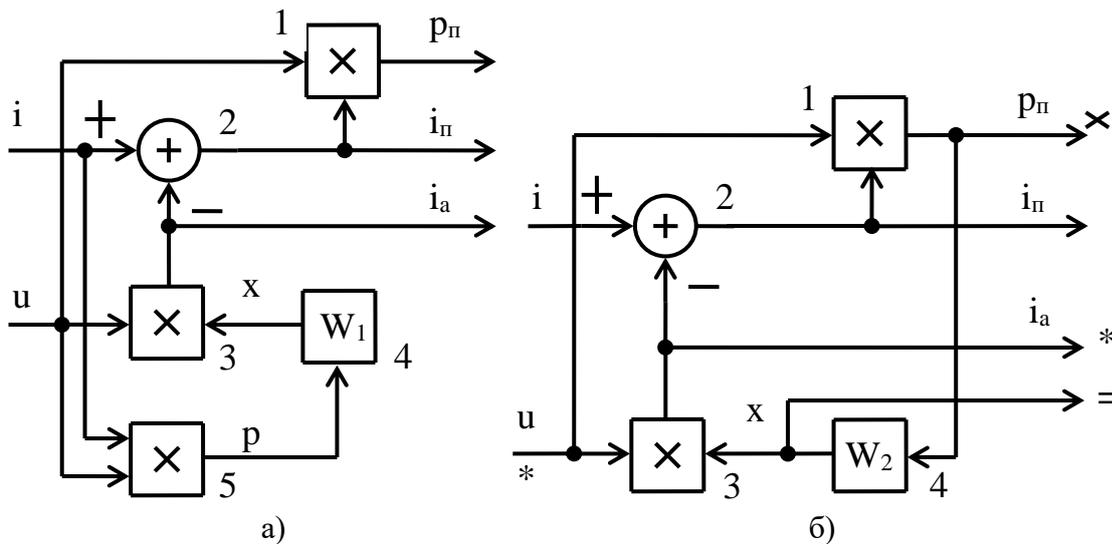


Рис. 11

В схеме использованы сумматор 2, умножители 1, 3, 5 и динамическое звено 4 (фильтр), например, апериодическое с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} \quad (7.2)$$

и постоянной времени  $T_1$  гораздо больше периода  $T$  измеряемых сигналов. Поэтому пульсации выходного сигнала  $x$  незначительны и он почти постоянен

на периоде сигналов. Диаграммы (рис. 2) поясняют работу. На выходе умножителя 5 получается сигнал мгновенной мощности (в) после перемножения сигналов напряжения (а) и тока (б) сети. Выходной сигнал фильтруется динамическим звеном 4, и на его выходе получается постоянный сигнал, пропорциональный средней мощности

$$x = k_1 \cdot P. \quad (7.3)$$

При настройке измерителя коэффициент  $k_1$  устанавливается равным требуемому коэффициенту в формуле Фризе (1.8 а) и не корректируется из-за малых колебаний напряжения сети. После умножения сигнала  $x$  на напряжение сети умножителем 3 получается сигнал активной составляющей тока (г) строго в соответствии с формулой (1.8 а). Далее активная составляющая в сумматоре 2 вычитается из сигнала тока и получается невязка или пассивная составляющая тока (д). Перемножение напряжения сети и пассивного тока определяет мгновенную пассивную мощность (ж). Для полноты картины на рис.2 е показано произведение напряжение сети и активного тока – сигнал мгновенной активной мощности.

Если учитывать колебания напряжения сети, то потребуются дополнительно: умножитель (для возведения в квадрат), динамическое звено типа (7.2) для усреднения и делитель. Тогда получится схема, сложнее (рис.11 а), работающая строго по формуле Фризе (1.8 а).

Проще получаются решения, реализующие суть идеи Фризе, а не конечные формулы. Ближе к этой сути подходят электромеханические измерители переменного напряжения компенсационного типа, в которых один электропривод (медленно) поворачивает вал фазовращателя, а другой – вал регулируемого трансформатора до получения нулевого разбаланса выходного и измеряемого напряжений по фазе и амплитуде. Такое решение (рис. 11 б) с медленным изменением постоянного сигнала  $x$  (7.1) в функции разбаланса активной и пассивной составляющих предложено автором пособия в 1972 году. В заявке на изобретение было 12 страниц текста, многозвенная формула, три схемы: две для однофазной сети (рис. 11) и одна для трехфазной [16], а также идея измерения ортогональных составляющих в переходных и длиннопериодических режимах через формирование медленно изменяющегося сигнала функцией фильтра  $W_2$  [15]. Из-за долгой переписки авторское свидетельство было опубликовано только в 1979 году [49] на половине страницы, с одним рисунком (рис. 11 б) и короткой формулой:

«Способ измерения пассивной составляющей тока путем определения разности полного тока и его активной составляющей, ОТЛИЧАЮЩИЙСЯ тем,

что, с целью упрощения измерения, умножают постоянный сигнал на напряжение сети, вычитают полученное произведение из полного тока, полученную разность сигналов умножают на напряжение сети, устанавливают среднее значение полученного произведения, равным нулю, регулировкой величины постоянного сигнала».

Экспертиза заявила, что фазность напряжения сети и полного тока не оговорена – значит и трехфазная, закон регулировки постоянного сигнала в переходных режимах не оговорен – значит, фильтры могут быть любые, обе схемы (рис. 11) охвачены. Хорошо, что другие публикации на измерение [15, 16] и на их применение [14, 50] могут как-то подтвердить заявленное. За время переписки схема (рис. 11 б) была повторена в Японии [46], схема (рис. 11 а) и трехфазная – в Польше [44], фильтрами занялись опять японцы [48] и т.д. Зарубежные публикации заставили экспертизу выдать авторское свидетельство вопреки только отрицательным рецензиям ведущих специалистов страны в области энергетических измерений. Их можно понять, они прошли через курс ТОЭ и связывали реактивную мощность только со сдвигами токов и с накоплением энергии. Время было упущено и сейчас цитируются эти зарубежные предложения. Вот лишний пример того, что «принцип справедливого перераспределения» чего угодно при «выполнении общего баланса» является самым трудно доказуемым.

В схеме (рис. 11 б) в качестве фильтра применен интегратор 4  $W(p) = 1/T_1 p$ . На его вход подается сигнал пассивной мощности (рис. 2 ж), в котором не должно быть постоянной составляющей. При отсутствии таковой на выходе интегратора поддерживается такой же, как и в (рис. 11 а), постоянный сигнал  $x$ , который в конечном итоге обеспечивает отсутствие постоянной составляющей в сигнале на входе интегратора 4. Схема (рис. 11 б) является системой автоматического регулирования (САР) со связью по отклонению и ликвидирует постоянную составляющую сигнала пассивной мощности при любых возмущениях, а (рис. 11 а) – САР по возмущению и ликвидирует постоянную составляющую только при возмущении со стороны тока. Другими словами, обе схемы обеспечивают разложение сигнала тока на две взаимно ортогональные составляющие, одна из которых повторяет форму напряжения сети и передает ту же активную мощность, а вторая является ортогональной невязкой. Схема (рис. 11 б) работает с любым напряжением, и получилась гораздо проще схемы (рис. 11а), которая работает только без колебаний напряжения сети и тогда требует начальной настройки.

Схема (рис. 11 б) пройдет через все пособие, будет кирпичиком многих других технических решений, поэтому для этого кирпичика применена специальная система обозначения выводов \*,  $x$ , = (рис. 12). Для запоминания: \* – вход и выход сигналов с эталонной формой; «пусто» – вход сигнала, из которого будет вычитаться этот эталон и выход – результат вычитания; = постоянный медленно изменяющийся сигнал, он же – коэффициент при эталонном сигнале;  $x$  – произведение переменных сигналов, поэтому и обозначено знаком произведения.

## 7.2. Ортогональные анализаторы Грама-Шмидта

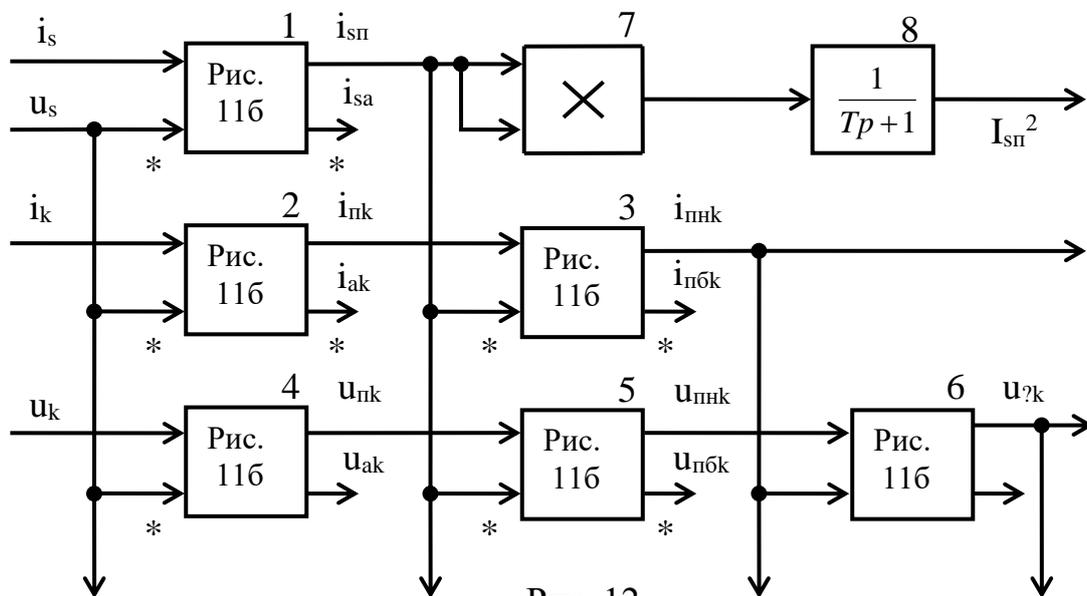


Рис. 12

Аппаратную реализацию (рис. 12) процедуры Грама-Шмидта проще всего произвести с помощью измерительных преобразователей (рис. 11 б). Для упрощения пояснений выбран порядок действий, как в системе уравнений (4.4), а на рисунке проставлена нумерация (б), (в), (г) в соответствии с теми же строками, что и в системе. Видно, что на входы эталонного сигнала (помечены \*) первого левого столбца подается напряжение сети  $u_s$  и выделяются сигналы с этой эталонной формой  $i_{sa}$ ,  $i_{ak}$ ,  $u_{ak}$  из входных (на выходах \* синфазных сигналов) и получают ортогональные к  $u_s$  невязки  $i_{sn}$ ,  $i_{nk}$ ,  $u_{nk}$ . Далее сигнал ортогональной невязки  $i_{sn}$  подается на входы сигнала эталонной формы второго укороченного столбца и т.д. В итоге получают мгновенные сигналы всех составляющих (4.4). Схему и соответствующую ей систему уравнений можно продолжать вправо и вниз до бесконечности, выполняя процедуру Грама-Шмидта для любого числа сигналов.

Модули 7 и 8 возводят в квадрат и усредняют, получая среднеквадратичное значение. Эту цепочку можно подключить к любому из сигналов. Со знаками этих значений помогут разобраться не показанные на рисунке выходы « $\Rightarrow$ »

постоянного сигнала  $x$  (рис. 11). Да и значения этого сигнала соответствуют коэффициентам (4.5) и представляют самостоятельный интерес. Если возникает потребность в выделении какой-то одной составляющей, то схема (рис. 12) может быть упрощена. Для этого надо использовать свойства взаимных ортогональностей различных составляющих (2.10), дополнив их новыми соотношениями для  $u_k$ . Часто достаточно один вход цепочки 7, 8 подключить к одному сигналу, другой – к другому, а число модулей 1... 5 может быть уменьшено. Да и сами модули могут подключаться в разнообразных комбинациях. Возникает большое число технических решений! Одно из них на элементах 1, 2, 3 позволяет выделить ортогональные составляющие Б.С.Замараева в сети, оно защищено авторским свидетельством [52].

### 7.3. Энергетические составляющие однофазной сети в переходных и длиннопериодических режимах

С.Фризе определил свои формулы на любом периоде рассмотрения  $T$ , что теоретически позволяет применять их для любых режимов и получить все соотношения. Обычно под  $T$  понимается период напряжения сети. Но при импульсном регулировании (рис. 2) это может быть уже несколько периодов напряжения сети. Но сколько? Десять, сто периодов, минута, год? При любом значении периода, если включение активной нагрузки составит ровно половину периода, коэффициент мощности составит 0.707. В основах электроснабжения вводится понятие коэффициента графика нагрузки. Если активная нагрузка будет пол года включена, а половину нет, то годовой коэффициент графика составит 0.707. То есть при каких-то значениях периода надо пользоваться одним коэффициентом, при каких-то – другим. Остается найти границу перехода: 50 периодов – это еще коэффициент мощности, 51 период – это уже коэффициент графика. Смешно? А как конструктивно выйти из этой ситуации? Назовем ее «Парадоксом длинного периода».

Фризе начал свою теорию не как все с определения «реактивного тока», а с определения активного тока. Надо продолжить такой путь и расширить толкование «активной составляющей тока» как передающей ту же активную мощность при том же напряжении сети, но... оптимально, с «энергетически оптимальной формой». И все! Оптимизация должна вестись по отношению к источнику питания, а не по отношению к самому элементу. Для абстрактного источника это минимум среднеквадратичного тока (1.7) и получаем формулы Фризе. Но и в эту формулу входит период  $T$ . Что же надо реальным источникам питания?

Способность электростанций быстро реагировать на колебания нагрузки характеризуется их маневренностью. На практике соизмеримые колебания нагрузки и электростанций возникли в случае наличия в энергосистеме ветроэлектростанций. Из-за этих специфических объектов пришлось изучать маневренность обычных станций и в первую очередь атомных. Системы регулирования таких энергосистем настраиваются на 10-минутный интервал, колебания мощности порядка 2% в минуту считаются уже быстрыми, а с 6% в минуту при колебаниях 0.01 Гц система стабилизации АРЧМ (автоматическое регулирование частоты мощностью) уже не справляется [43, 47]. Если электростанции не справляются с колебаниями мощности, значит, требуется включение каких-то компенсаторов (накопителей), которые сгладят эти колебания или невязку между активной и пассивной составляющими тока по Фризе. Энергетически оптимальная форма или активная составляющая должна определяться по формуле (7.1), в которой  $x$  должен быть медленно изменяющимся сигналом. Приведенные цифры полезны для оценки величины допустимой плавности изменения «медленно изменяющегося сигнала». Активная составляющая тока должна быть идеально согласована с маневренностью конкретной энергосистемы и быть различной для различных энергосистем.

Энергетически оптимальная форма может не совпадать с напряжением сети. Это фундаментальное понятие введено авторским коллективом в 1972 году [50] через 17 дней после заявки [49] (идея рождает идею) и подтверждено независимыми исследованиями в Японии в 1977 г. [48]. К сожалению, все это введено на основе убеждения в практической целесообразности предложения, это «практическое доопределение» фундаментальных понятий. А если у кого-то это вызовет усмешку, то пусть он сперва предложит свое решение «парадокса длинного периода».

Концепция Фризе и предлагаемое ее развитие применимы для сети с любой формой напряжения, в том числе – с постоянным напряжением. Для таких сетей формы медленно изменяющегося сигнала, активной составляющей тока  $i_a$  и мощности электростанции вырождаются в прямую линию (рис. 13 а). График пассивного тока  $i_n$  совпадает с графиком мощности компенсатора  $Z_n$  в эквивалентной схеме (рис. 1 б). То есть на (рис. 13 а) компенсатор создает идеальные условия работы для электростанции, которая вообще не обладает маневренностью.

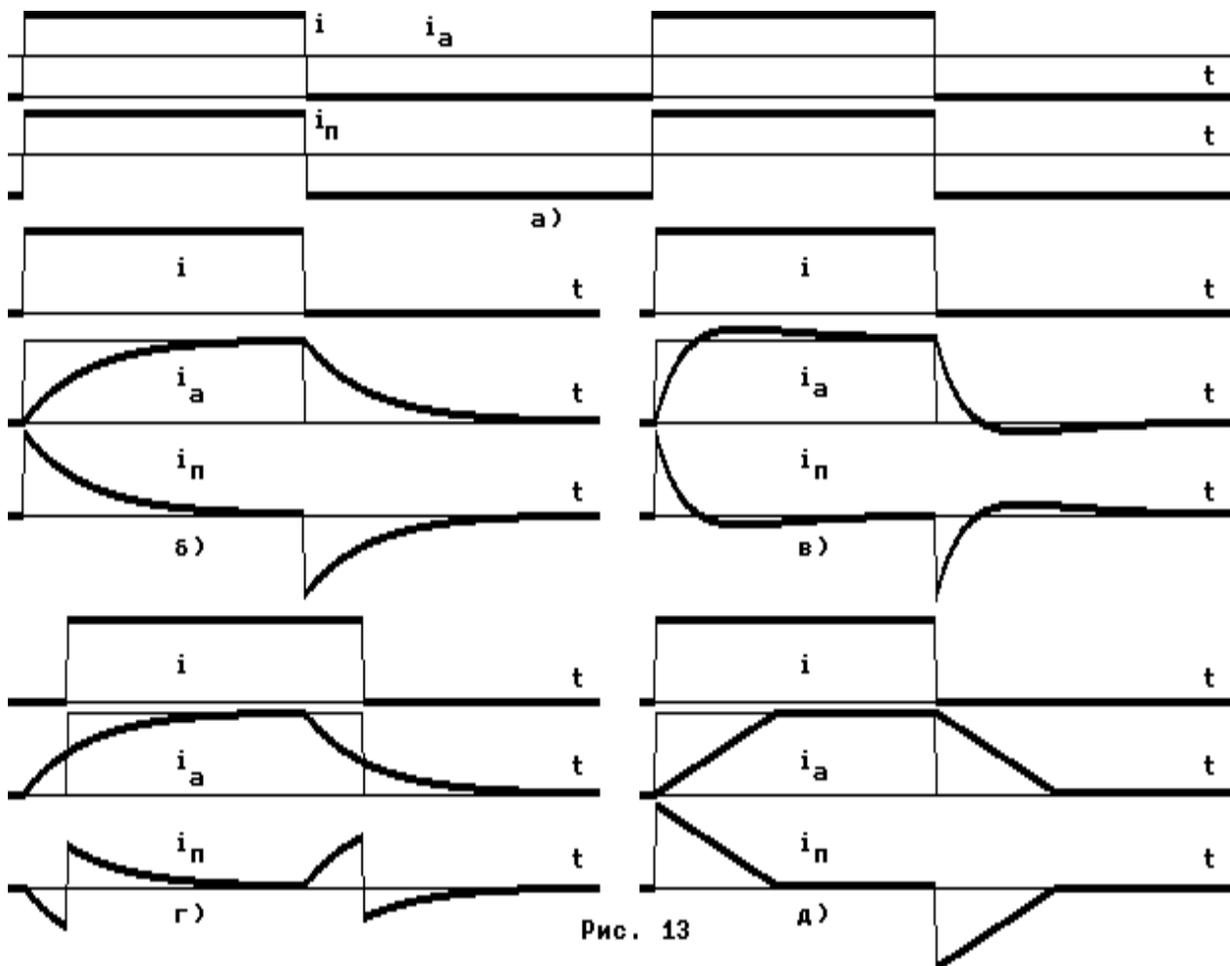


Рис. 13

Концепция Фризе и предлагаемое ее развитие применимы для сети с любой формой напряжения, в том числе – с постоянным напряжением. Для таких сетей формы медленно изменяющегося сигнала, активной составляющей тока  $i_a$  и мощности электростанции вырождаются в прямую линию (рис. 13 а). График пассивного тока  $i_p$  совпадает с графиком мощности компенсатора  $Z_p$  в эквивалентной схеме (рис. 1 б). То есть на (рис. 13 а) компенсатор создает идеальные условия работы для электростанции, которая вообще не обладает маневренностью.

При набросе мощности на реальную электростанцию она начинает плавно поднимать свою мощность, а первый скачок берет на себя компенсатор с накопителем (вращение турбин – тоже неявный компенсатор). Этот плавный подъем и затем спад логично отождествить с «энергетически оптимальной формой» или с активной составляющей  $i_a$  в переходных процессах (рис.13 б). Плавная форма получается на выходе фильтра низших частот (термин из заявок [49, 50]), частным случаем которого является апериодическое звено (7.2). Остается только договориться о передаточной функции этого фильтра. Для практической реализации уже имеется схема измерения (рис. 11 б), в которой нужно подобрать фильтр  $W_2$ . Интересны варианты подбора.

В главном варианте автор пособия предлагает использовать интегратор. Тогда схема (рис. 11 б) представляет собой САР с астатизмом первого порядка, то есть с нулевой средней ошибкой на входе интегратора, а переходный процесс получается апериодическим  $i_a$  (рис. 13 б). Такой процесс близок к оптимальному для источника питания, но не для компенсатора  $i_n$ . Для компенсатора желательно:

- 1) иметь минимальную емкость накопителя энергии;
- 2) иметь минимальную «длительность хранения» запаса энергии.

Из графика  $i_n$  видно, что длительность цикла запасаения – возврата энергии составляет время между набросом и сбросом нагрузки. Длительность хранения оказалось привязанной к конкретному технологическому процессу, а это плохо для компенсатора.

В работе [48] рассматриваются два варианта реакций на скачок (рис.13 в, г). Случаю (в) соответствует система с астатизмом второго порядка. Среднее значение пассивной мощности стремится к нулю при любом знаке скачка тока, то есть длительность хранения энергии в компенсаторе может определяться теперь компенсатором. Недостатком такого предложения можно считать то, что исходно мы оптимизировали режим работы источника питания, теперь надо еще оптимизировать режим работы компенсатора. Получается двухкритериальная задача. Может к этому надо привыкать?

Случаю (г) соответствует САР с прогнозированием скачков. Как видно, прогноз позволяет даже уменьшить емкость накопителя! Однако такое предложение не соответствует принципу «реализуемости».

Наконец, в работах [44, 46] рассмотрены подобные динамические звенья с фиксаторами на период переменного напряжения сети. Автор пособия скептически относится к импульсному подходу, так как теория должна отражать объективные законы природы, а импульсность в последней не наблюдается кроме процессов в микромире. Однако в расчетах это создает определенные удобства, на каждом периоде можно использовать понятные из курса ТОЭ формулы типа (1.5), (1,6).

Интересный фильтр предложен это для мгновенной интегральной оценки мощности в работе [12]

$$P(t) = \frac{k}{T} \int_{t-T}^t u(t) \cdot i(t) dt. \quad (7.4)$$

Проще всего его применить в схеме (рис. 11 а). Тогда графики соответствующих сигналов будут иметь вид (рис. 13 д), что близко к (рис. 13 б). Данный фильтр очень сложен в реализации, но прост для графического

анализа человеком. Надо на графике выделить интервал  $T$ , мысленно найти среднее значение графика на этом интервале и поставить точку на правом крае интервала. Затем сдвинуть интервал и получить еще одну точку и т.д.

Предлагается следующий простой алгоритм доопределения различных составляющих в сложных не поддающихся простому осмыслению режимах. Надо определить простейшую из возможных схему реализации, какой является (рис. 11 б), задать простейшую из возможных передаточную функцию фильтра  $W_2$ , какой является интегратор, процессы в такой схеме и будут определяющими новые понятия. Это называется алгоритмом «практического доопределения»! Он будет использован и в других случаях. По крайней мере, все полученные таким образом решения будут отвечать «принципу реализуемости».

В случае интегратора с постоянной времени  $T$  схеме (рис. 11 б) соответствуют интегральное или равноценное дифференциальное уравнения

$$i_a = u \cdot \frac{k}{T} \int_0^t u \cdot (i - i_a) dt; \quad (7.5)$$

$$\frac{T}{k} \cdot \frac{di_a}{dt} + (u^2 - \frac{T}{ku} \cdot \frac{du}{dt}) \cdot i_a = u^2 \cdot i. \quad (7.6)$$

Здесь коэффициент  $k$  введен для баланса размерностей. При постоянном напряжении сети уравнение (7.6) превращается в простейшее уравнение апериодического звена, но при произвольном напряжении – аналитическое решение этого уравнения затруднительно. Интегральное уравнение (7.5) смотрится приятнее, но решать их математики рекомендуют переходом к соответствующему дифференциальному.

При синусоидальном напряжении сети  $u = U_m \cdot \sin(\omega t)$  для импульсного регулирования активной нагрузки (рис.2) при включении  $i = I_m \cdot \sin(\omega t)$ , при отключении  $i = 0$ . Тогда решения уравнения с разделяющимися переменными (7.6) для включенного и отключенного состояний соответственно имеют вид [15]

$$i_a = I_m \cdot [1 - C_1 \cdot a(t)] \cdot \sin(\omega t); \quad i_a = C_2 \cdot a(t) \cdot \sin(\omega t), \quad (7.7)$$

где  $C$  – определяется начальными условиями, а

$$a(t) = e^{-\frac{t}{T} + \frac{\sin(2\omega t)}{4\omega T}} \quad (7.8)$$

Далее для импульсного регулирования с равными интервалами включенного и отключенного состояний при периоде  $T_i$  (рис. 2) определены начальные условия  $C$ , среднеквадратичное значение активной составляющей и коэффициент мощности по формуле (1.22). Результаты расчетов на ЭВМ для

различных соотношений периода тока  $T_i$  и постоянной интегрирования  $T$  приведены на (рис. 14).

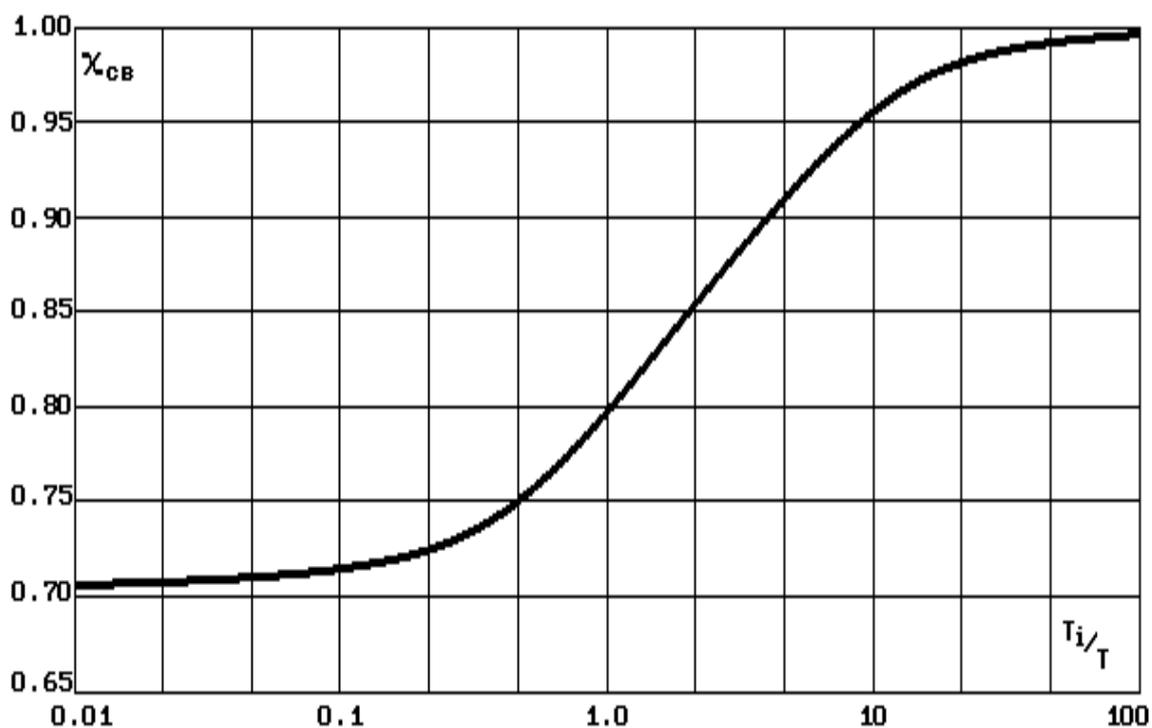


Рис. 14

Видно, как плавно значение коэффициента мощности от 0.707 для равноинтервального включения активной нагрузки переходит к 1. Также плавно, но в противоположную сторону, должен изменяться соответствующий коэффициент графика нагрузки. Произведение этих коэффициентов всегда будет 0.707. Между двумя подходами теперь оказался плавный буфер в виде (рис. 14). Теперь можно договориться от величине постоянной времени интегратора и ответить на поставленный вопрос, чему будут равны значения коэффициентов мощности и графика при периоде в 50 периодов сети, а чему при 51. Так предлагается решить парадокс длиннопериодического режима для единственного электроприемника сети. Это есть расширенное по времени решение задачи Фризе. В схеме (рис. 12) для измерений в цепи применяются модули (рис. 11 б) с теперь «согласованной» постоянной времени интегрирования. Согласно предложенному алгоритму «практического доопределения» схема (рис. 12) определит все энергетические составляющие в переходных режимах. Процессы будут сложны для аналитического описания, но их можно увидеть на экране осциллографа в простой реальной схеме измерения, их можно увидеть на экране дисплея ЭВМ при простом цифровом моделировании схемы (рис. 12).

#### 7.4. Экономический подход к определениям среднеквадратичного тока и полной мощности сети

Фундаментальное общепринятое понятие среднеквадратичного (действующего) тока вводится через эквивалентность постоянному току по усредненным потерям или тепловому эффекту в чисто активном элементе для короткопериодического режима, что и приводит к известной интегральной формуле для тока (1.7), а через него и для полной мощности (1.14). Описанный подход, с одной стороны, является элементарным, а не принятым в данном пособии сетевым, когда учитываются «потери» и «тепловой эффект» в сетевом трансформаторе с элементом на вторичной стороне, а не в самом элементе. Эквивалентирование производится не по энергопроцессам в элементе, а по энергопроцессам в сетевом трансформаторе, к которому подключена единственная нагрузка – рассматриваемый элемент! С другой стороны, слова «потери» или «тепловой эффект» воспринимаются в общепринятом определении как технические синонимы, однако только их противопоставление позволило автору предложить определение полной мощности в длиннопериодических и переходных режимах [19].

В конечном итоге общество непрерывно расплачивается за потери в сетевом трансформаторе и один раз за стоимость выбранного по потерям трансформатора. Теперь остается определить эквивалентный постоянный ток с такими же приведенными экономическими затратами, что и анализируемый с произвольным периодом. Такая переформулировка постановки задачи сразу приводит к мысли привлечения в теоретическую электротехнику экономических методов. Забегая вперед, надо сказать, что все используемые приближенные экономические коэффициенты в конце преобразований сокращаются, поэтому остается только сам подход без неточностей и приближений экономической науки. Возникают и противопоставляются друг другу две эквивалентности: 1) по издержкам; 2) по капитальным затратам.

##### Эквивалентность по издержкам

Как принято у экономистов, надо сравнить варианты. Эквивалентный постоянный ток  $I_3$  в варианте 1 за короткий период  $T_i$  приводит к появлению издержек  $I_1$  за дополнительные потери электроэнергии в сетевом трансформаторе с приведенным активным сопротивлением  $r$ , а реальный ток в варианте 2 аналогично приводит к появлению издержек  $I_2$ . Необходимо знать одноставочный тариф платы за электроэнергию  $C$ .

Тогда по вариантам

$$I_1 = C \cdot r \cdot I_{s2} \cdot T_i; \quad I_2 = C \cdot r \cdot \int_0^{T_i} i^2 dt. \quad (7.9)$$

После приравнивания вариантов коэффициенты  $C$  и  $r$  сокращаются, и получается известное выражение для среднеквадратичного тока (1.7) при короткопериодических режимах. Совпадение подтверждает возможность экономического подхода, но ничего нового пока не дает.

Общепринятый в энергосистемах метод разовых расчетов за фиксированный интервал времени (месяц) технически эквивалентен подключению к выходу квадратичного преобразователя интегрирующего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с фиксированным временем усреднения. Вообще дискретное время платежей органически присуще экономике, а это есть линейная цифровая фильтрация в технике. Уменьшение периода дискретизации позволяет плавно перейти к непрерывным линейным фильтрам или к непрерывным платежам с точки зрения экономики.

В случае переходных режимов возникает задача синтеза фильтра с реальным  $i^2(t)$  сигналом на входе и эквивалентным  $I_s^2(t)$  на выходе. Принято мгновенные сигналы обозначать малыми буквами, а какие-то их интегральные оценки – большими. Сигнал  $I_s^2(t)$ , с одной стороны является мгновенной функцией времени, с другой стороны, – интегральной оценкой (какой буквой его обозначать?) с одинаковым средним значением с сигналом  $i^2$ . При этом символ квадрата органически входит в обозначение так, что  $i^2$  – это один символ так же, как одним символом обозначается сигнал мощности, хотя является произведением двух сигналов. Простейшим линейным динамическим фильтром является апериодическое звено или его цифровой эквивалент. Техническая реализация его предельно проста (RC-цепочка или звено 8 на рис. 12) и всеми применяется на практике, осталось только признать в теории, что выход апериодического звена и есть мгновенная оптимальная интегральная оценка. Математически это звено описывается простейшим дифференциальным (а) или разностным (б) уравнениями

$$T \frac{dI_s^2}{dt} + I_s^2 = i^2; \quad (a) \quad (7.10)$$

$$T \frac{\Delta I_s^2}{\Delta t} + I_s^2 = i^2. \quad (б)$$

Последнему разностному уравнению соответствует оригинальная, но вполне приемлемая в экономике система платежей: в момент отсчета заплати только

половину (при соответствующем  $T$ ) интегральной оценки последнего дискретного интервала, половину недоплаты предыдущего интервала, половину недоплаты еще раз предыдущего и т.д. То есть экономически можно обосновать применения апериодического звена.

По мнению автора, причина непринятия столь очевидного решения (7.10) для определения понятий мгновенных интегральных оценок (среднеквадратичного тока, мощности, ее составляющих и т.п.) чисто субъективная: человеку хочется посмотреть на осциллограмму сигнала, мысленно ее усреднить, нарисовать среднюю линию или поставить точку в центре картинке. Но усреднять так, как это делает  $RC$ -цепочка, человеку тяжело. Компромиссом может быть применение уже упомянутого линейного фильтра с конечной памятью (7.4), когда под знаком интеграла стоит не мощность, а квадрат тока. При таком фильтре человек должен проделать описанные действия, но поставить точку на правом срезе картинке. Переходный процесс будет как на (рис. 13 д – кривая  $i_a$ ), а от него уже недалеко до принятия апериодического переходного процесса (рис. 13 б).

Можно подвести итог, что экономический подход с эквивалентированием издержек вполне допустим, он нигде не вступил в противоречие с другими методами доказательства, но и не выявил каких-то новых закономерностей или соотношений. Высказанные подходы к анализу переходных режимов могли быть получены и при неэкономическом подходе. Стрелка любого измерительного прибора обладает механической инерцией и усредняет измеряемую величину в первом приближении как апериодическое звено (7.10 а). Предлагается простая мысль: «Мгновенные показания такой стрелки и есть мгновенная интегральная оценка измеряемой величины». Также в экономике можно было бы ввести мгновенные интегральные платы за издержки согласно уравнениям (7.10) для любых величин. Общий баланс при этом сохраняется.

#### Эквивалентность по капитальным затратам

Капитальные затраты определяются стоимостью сетевого трансформатора с оптимально согласованной нагрузкой в виде одного элемента на его вторичной стороне. Полная мощность элемента в установившемся короткопериодическом режиме должна равняться номинальной расчетной мощности трансформатора, а она соответствует его номинальному перегреву и номинальному сроку службы. В длиннопериодических режимах температура колеблется, что влияет на срок службы изоляции и всего трансформатора. Какое-то эквивалентирование можно произвести только при привлечении какого-то

закона влияния температуры на срок службы изоляции. Не все, но большинство принимает закон Аррениуса экспоненциального снижения срока службы изоляции от температуры, когда он уменьшается в два раза на каждые 8...10 градусов перегрева. Капитальные затраты переводятся в издержки через коэффициент амортизации на реновацию  $N$ , который обратно пропорционален текущему (при существующем перегреве) сроку службы трансформатора. По закону Аррениуса каждой температуре соответствует определенный «мгновенный» срок службы, а его обратная величина определит мгновенное значение коэффициента амортизации  $n$  [19]

$$n = N_0 \cdot e^{A \cdot \theta}, \quad (7.11)$$

где  $Q$  – величина перегрева в градусах,  $A$  – коэффициент показательной функции Аррениуса, при номинальном перегреве должен получиться номинальный срок службы, что позволяет вычислить коэффициент  $N_0$  (он сократится ниже и его не надо вычислять). Если принять, что перегрев 10 градусов снижает срок службы в два раза, то  $A=0.07$  1/град. Через общепринятое годовое значение коэффициента амортизации экономисты вычисляют эквивалентные годовые издержки, через мгновенное значение коэффициента амортизации можно вычислить мгновенные издержки, а после интегрирования – их интегральную оценку. Теперь можно найти интегральные издержки по вариантам как интеграл от произведения стоимости сетевого трансформатора  $K$  на мгновенный коэффициент амортизации (7.11) на интервале времени  $T_i$ : для экономически эквивалентного постоянного тока  $I_s$  с эквивалентной постоянной температурой  $\theta_s$  и для анализируемого тока  $i(t)$  с графиком температуры  $\theta(t)$ , а, приравняв издержки, – эквивалентную температуру:

$$И_1 = K \cdot N_0 \cdot \int_0^{T_i} e^{A \cdot \theta_s} dt = K \cdot N_0 \cdot e^{A \cdot \theta_s} \cdot T_i; \quad И_2 = K \cdot N_0 \cdot \int_0^{T_i} e^{A \cdot \theta(t)} dt; \quad (7.12)$$

$$\theta_s = \frac{1}{A} \ln(J); \quad J = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} e^{A \cdot \theta(t)} dt. \quad (7.13)$$

Приятно, что в уравнениях (7.13) сократились весьма неопределенные экономические параметры, а остался только «экономический подход». Для дальнейших выкладок нужны какие-то математические модели перехода от тока к температуре изоляции. Простейшая модель строится на основе следующих допущений: 1) установившаяся температура  $\theta_{yc}$  пропорциональна

квадрату постоянного установившегося тока  $I_{yc}$ ; 2) динамические изменения температуры описываются апериодическим звеном; 3) неравномерность нагрева по объему трансформатора не учитывается. Третье допущение уже заложено в формулы (7.12), (7.13), иначе в трансформаторе надо будет выделять «слабые звенья» с разными сроками службы, экономические параметры в общем случае не сократятся, а расчеты все дальше будут отходить от общетеоретических и все ближе подходить к расчетам ресурса конкретной конструкции сетевого трансформатора. При первом допущении примем, что номинальный срок службы соответствует номинальному перегреву 70 градусов и соответствует квадрату номинального тока  $I_n$ . Тогда току  $I_{yc}$  соответствует установившаяся температура перегрева и для относительного тока  $I_{yc}^*$ , вообще, и относительного эквивалентного тока из (7.13), в частности:

$$A \cdot \theta_{yc} = 0.07 \cdot 70 \cdot (I_{yc}/I_n)^2 = 5 \cdot I_{yc}^{*2}; \quad (7.14)$$

$$I_{yc}^{*2} = 0.2 \cdot \ln(J). \quad (7.15)$$

Второе допущение применим к частному случаю равных включений и отключений типа импульсного регулирования на (рис.2). Половину периода  $T_i$  происходит нагрев с эквивалентной постоянной времени  $T$  от значения граничных температур  $\theta_{min}$  до  $\theta_{max}$ , а затем – остывание от  $\theta_{max}$  до  $\theta_{min}$ :

$$\theta = \theta_{yc} + (\theta_{min} - \theta_{yc}) \cdot e^{-t/T}; \quad \theta = \theta_{max} \cdot e^{-t/T}. \quad (7.16)$$

Здесь  $\theta_{yc}$  – установившаяся величина перегрева после бесконечно длительного включения без отключений (7.14). Для упрощения записей формул процессы нагрева и остывания привязаны к нулевому моменту времени и длятся  $T_i/2$ . Приравнивание конечных и начальных значений обоих уравнений определяет граничные значения температур

$$\theta_{max} = \theta_{yc} / (1 + e^{-T_i/(2T)}); \quad \theta_{min} = \theta_{max} \cdot e^{-T_i/(2T)}. \quad (7.17)$$

Записи формул (7.16) немного упрощаются

$$\theta = \theta_{yc} - \theta_{max} \cdot e^{-t/T}; \quad \theta = \theta_{max} \cdot e^{-t/T}. \quad (7.18)$$

Теперь для нахождения эквивалентного тока (7.15) надо взять интеграл (7.13)

$$J = \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^{T_i/2} \{e^{A[\theta_{yc} - \theta_{max}e^{-t/T}]} + e^{A\theta_{max}e^{-t/T}}\} dt = \quad (a) \quad (7.19)$$

$$= \frac{T}{T_i} \int_{e^{-T_i/T}}^1 \frac{e^{A\theta_{yc}} e^{-A\theta_{max}y} + e^{+A\theta_{max}y}}{y} dy = \quad (б) \quad (7.19)$$

$$= \frac{T}{T_i} [e^{A\theta_{yc}} E_i(-A\theta_{max}y) + E_i(A\theta_{max}y)]_{y=e^{-T_i/(2T)}}^1 \cdot \quad (в) \quad (7.19)$$

Здесь в процессе преобразований в уравнении (а) применена подстановка

$$t = -T \cdot \ln(y) \quad \text{или} \quad y = e^{-t/T}, \quad (7.20)$$

а в уравнении (в)  $E_i(y)$  означает интегральную показательную функцию, которая для расчетов на ЭВМ может быть представлена в виде быстросходящегося ряда с постоянной Эйлера  $C=0.577\dots$ , величина которой не влияет на расчет определенного интеграла (постоянные сокращаются):

$$E_i(x) = C + \ln|x| + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^k}{kk!}. \quad (7.21)$$

Теперь для указанных конкретных значений можно рассчитать на ЭВМ  $I_3^*$  по формуле (7.15) с подстановкой в нее формул (7.14), (7.17), (7.19 в) и извлечения корня квадратного. Сведение же всех формул в одну дает громоздкую формулу без надежд на ее упрощение. Произведение  $I_3^*$  на относительное действующее напряжение сети  $U^*=1$  определяет искомую относительную полную мощность  $S^*$  в равноинтервальном длиннопериодическом режиме. Все кривые рассчитаны на ЭВМ (рис. 15). При анализе кривую с  $I_{yc}^* = 1$  полезно сравнить с кривой (рис. 14). Обе кривые качественно похожи, слева начинаются при 0.707 и 0.707, но заканчиваются при 0.929 и 1.0 справа. «Не единица» получилась потому, что по формуле Аррениуса изоляция стареет и у выключенного трансформатора. Из (7.15), (7.19) получается простая формула для правых предельных значений кривых, включая 0.929 при  $I_{yc}^* = 1$ , для выбранных параметров:

$$I_{\text{э беск}}^2 = 0.2 \cdot \ln \left[ \frac{e^{5I_{yc}^2} + 1}{2} \right]. \quad (7.22)$$

Чем меньше относительная загрузка трансформатора на участке времени полного включения, тем меньше даже относительный перепад изменения полной мощности при широком изменении периода включений и отключений. Похожей особенностью повышения динамической маневренности при уменьшении относительной мощности колебаний потребителя

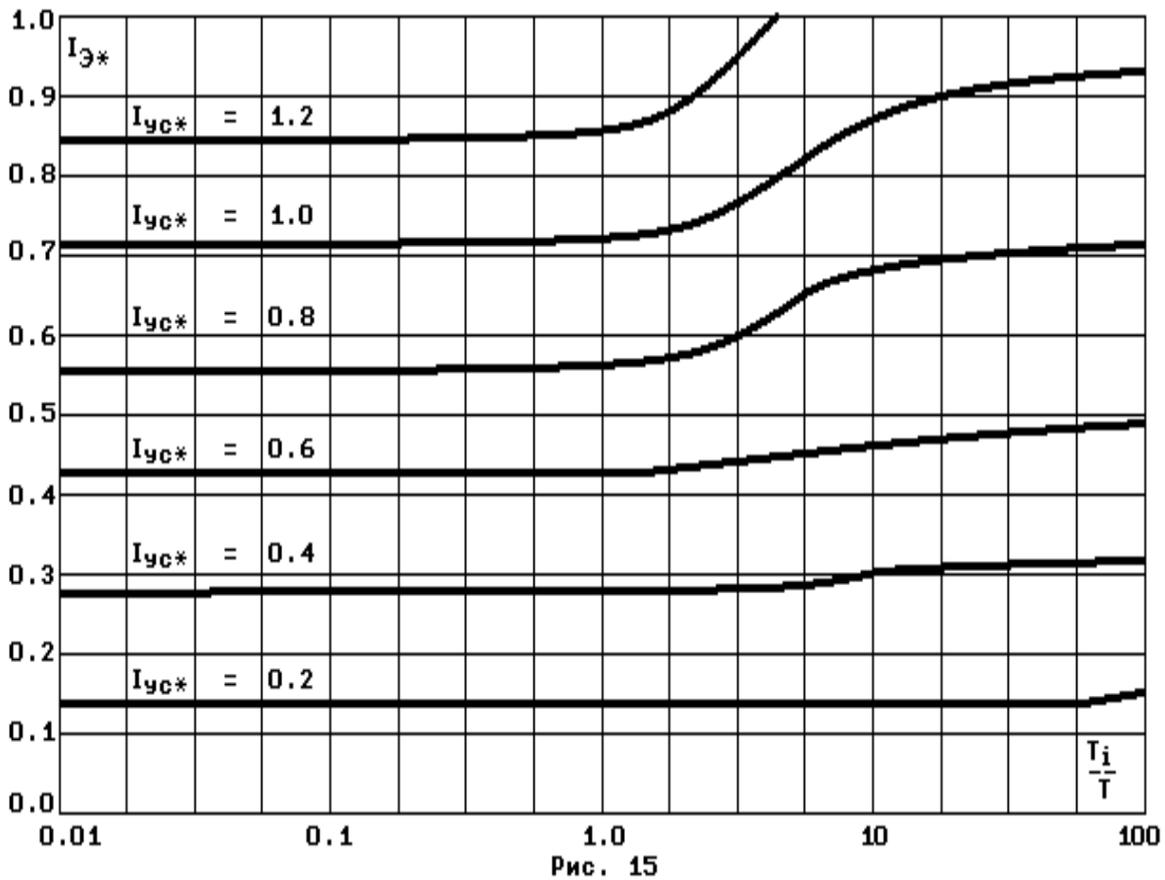


Рис. 15

обладают и энергосистемы [47, стр.155]. Тогда представляется, что при дальнейшем развитии концепции Фризе надо учитывать и относительную мощность потребителя при определении всех его энергетических составляющих, а не только полной мощности.

Если дальше придерживаться экономической концепции, что потребители по второй ставке должны рассчитаться за амортизацию всего оборудования в тракте энергоснабжения, то появляется задача учета ресурса этого оборудования и распределения ответственности за расход этого ресурса между потребителями. Тут-то и должны появиться счетчики ПОЛНОЙ ЭНЕРГИИ или счетчики ресурса. Практическая реализация таких счетчиков гораздо проще решения приведенных систем трансцендентных уравнений на ЭВМ. Сигнал квадрата тока преобразуется в сигнал температуры простейшим апериодическим звеном ( $RC$ -цепочкой) вместо уравнений (7.16). Далее экспоненциальное нелинейное звено (7.11) преобразует его в сигнал мгновенной амортизации по закону Аррениуса, а далее стоит обычный электромеханический счетчик или электронный интегратор. Практика гораздо

проще теории! Наверное, подобное можно найти в научных разработках по счетчикам ресурса электрических аппаратов. Новая теория только говорит, что это счетчики полной энергии!

Как начнут улыбаться практики систем электроснабжения, прочитав эти строки. Они приведут примеры из своей жизни, когда один трансформатор сгорает сразу, а другой отработает десяток своих сроков. Но наука начинается там, где начинают измерять. Нужно подобрать под реальные процессы максимально простые, но достоверные модели и работать с ними. Есть критерии статистической достоверности моделей. Примеры разного срока работы трансформаторов должны удовлетворять этим критериям.

Сейчас регламентируется уровень получасового максимума активной и реактивной мощностей в часы максимума энергосистемы. Для этого через каждые пол часа показания специального счетчика сравниваются с зафиксированным максимумом и сбрасываются до следующей фиксации через полчаса. Такой способ фильтрации близок к (7.4) и (рис. 13 д), но хуже их, так как выделяется не максимальный получасовой максимум, а максимальный из зафиксированных со случайных моментов начал отсчетов. Такой подход гораздо лучше всего, что было раньше, но критики ему можно высказать предостаточно (и измеряет не совсем то, и реализовать измерения точно сложно). Если перейти на описанную схему измерений с постоянной времени и экспоненциальным звеном (7.11), останется только обосновать величину постоянной времени и показатель экспоненты. То есть и измерения будут ближе к реальному ущербу, и реализация упростится.

Главный качественный вывод этого параграфа заключается в том, что в переходных режимах на больших интервалах времени разрывается «зеркальная связь» определений понятий «активная составляющая тока» и «полная мощность». Первая связана с «эксплуатационными издержками», а вторая – с «капитальными затратами», и результаты получаются качественно разными. Не надо связывать рост полной мощности с дополнительными потерями энергии, надо связывать ее с увеличением стоимости оборудования и его ресурсом.

#### 7.5. «Технические» энергетические составляющие

Под «техническими» составляющими автор понимает такие составляющие мгновенного тока, которые могут быть технически выделены, скомпенсированы и т.п. на данном этапе развития науки и техники. Отсюда следует, что таких составляющих может быть большое множество, но все они

технически обеспечены в отличие, например, составляющих Гильберта и др. В этом смысле вышеописанные составляющие также можно назвать техническими, так как выделение их аппаратно обеспечено, но эти составляющие еще являются предельно оптимальными, по крайней мере, на принятых моделях. Поэтому в этом параграфе пойдет речь о составляющих, не оптимальных, но выделение которых полезно.

Следует особо выделить составляющие с формой тока емкости или индуктивности, подключаемых к сети с произвольным напряжением, то есть с формами примерно дифференциала или интеграла напряжения сети. При синусоидальном напряжении получается косинусоидальная форма – это и послужило доказательство правоты направления «на практике». Последний подход поддерживается таким большим числом авторов, что следует упомянуть только обзорную литературу [8, 30, 39, 40], подход может быть признан направлением не по внутренней сути, а по широте поддержки. Далее предлагается выделять из токов элементов цепи составляющие с формой дифференциалов или интегралов напряжений на элементах цепи. Доказательством правильности предлагаемого является выполнение баланса полученных результатов по всем элементам цепи [30]. Если вспомнить теорему Теллеждена, то баланс псевдомощностей по всем элементам цепи выполняется, когда для напряжений и токов выполняются законы Кирхгофа (3.13), (3.14). Если над упомянутыми балансами выполнить любые, но линейные преобразования, то для полученных результатов выполняются законы Кирхгофа, а значит и баланс псевдомощностей. Линейных преобразований существует бесконечное множество, надо только выделить из них опять бесконечное множество преобразований, преобразующих синусоиду в косинусоиду на определенной частоте (фазочастотная характеристика любой линейной системы где-нибудь пересекает уровень плюс или минус 90 град. эл. – приведите эту точку к 50 Гц и все). Преобразования Гильберта соответствуют линейной системе с нереализуемой фазочастотной характеристикой на уровне 90 град. эл. на всех частотах – это одно из решений. Теорий с таким свойством существует бесконечность [20, 21, 22], непонятно, почему ученые выделили только две реальные с дифференцированием и интегрированием и одну нереальную. Почему-то нет ни одной публикации, где бы было сказано, что, при одинаковом выполнении общего баланса, значения элементных составляющих будет различным по разным теориям. Это нарушение «принципа справедливости».

Гораздо интереснее другой подход к подключению емкости на несинусоидальное напряжение сети. Предлагается подобрать такую емкость, чтобы при ее включение общий ток сети был бы минимальным. Здесь возможны варианты предположения сети бесконечной мощности или учета внутренних сопротивлений реальной сети с резонансными явлениями. Это классический пример определения «технической» формы сигнала, по мнению автора пособия! Дальнейшее развитие этого интересного предложения не выдерживает критики. Предлагают дальше, как бы включать емкость параллельно элементам уже цепи и получить что-то похожее на баланс.

Предлагаемые в пособии технические решения в состоянии выполнить «социальный заказ» на выделение составляющих любых «технических форм». В схеме (рис. 12) на вход  $u_s$  надо подать сигнал дифференциала (интеграла) напряжения сети и на выходах  $i_a$  получить соответствующие выделения. Также можно подавать сигналы любых других форм, если в этом имеется «техническая потребность». Баланс псевдомощностей будет всегда обеспечен. Но перераспределение этого баланса между элементами каждый раз будет индивидуальное.

### 7.6. Регулярные и случайные энергетические составляющие

Концепция Фризе и все написанное выше является энергетическим обоснованием возможности компенсации пассивной составляющей. Сейчас появились преобразователи (особенно транзисторные), которые могут формировать ток любой управляемой формы, поэтому реализация таких компенсаторов технически возможна [8, 14, 46, 50]. Однако не стоит ожидать полной компенсации. Пассивный ток можно рассматривать как возмущение на сеть, а недокомпенсацию этого тока компенсатором – как ошибку. В теории САУ давно поставлена задача создания инвариантных систем управления, работающих без ошибки, и показано, что невозможно создать такие САУ без получения упреждающей информации. Получение такой информации называется прогнозированием, остается только проблема достоверности прогноза.

В сетях переменного напряжения все электроприемники синхронизированы этим напряжением. Поэтому именно в них создание упредителей на основе прогнозаторов – возможно [14, 17, 51].

На рис. 16 показан вариант выполнения подобного прогнозатора с управляемым от него преобразователем-компенсатором [50, 51], а на рис. 17

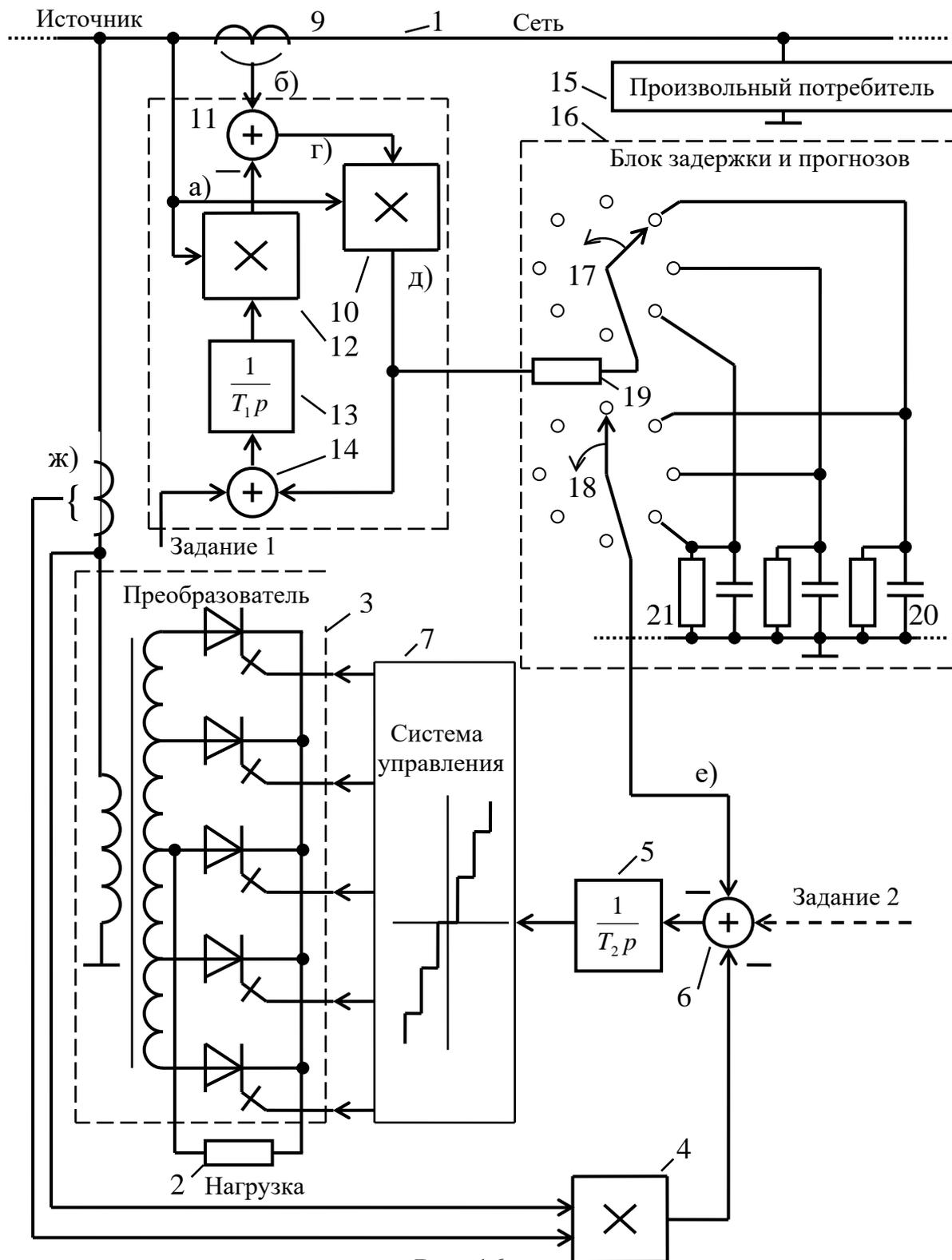
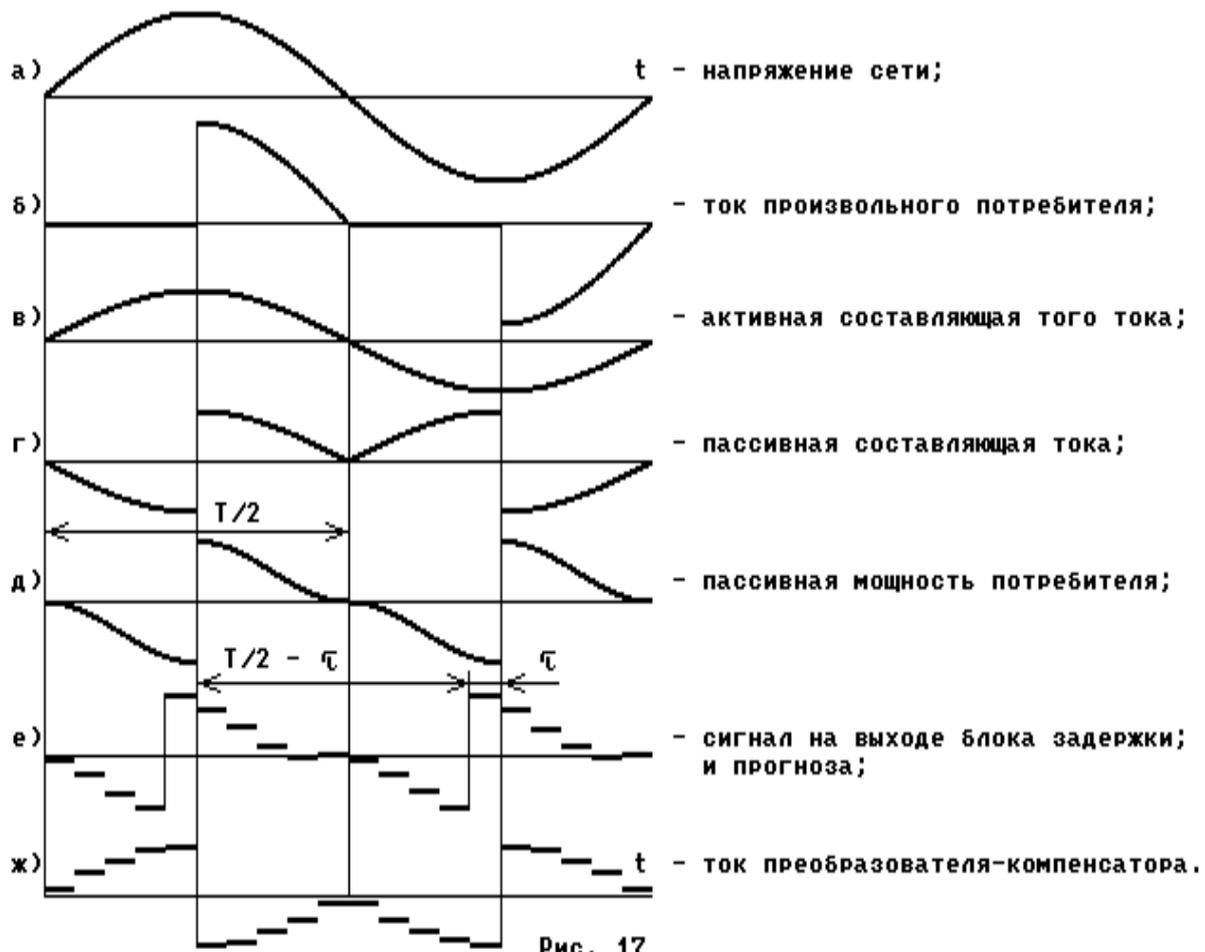


Рис. 16

– диаграммы сигналов при его работе. Прогнозатор представляет собой дискретный синхронный с напряжением сети фильтр. На рисунке для простоты понимания он представлен в электромеханическом аналоговом варианте с синхронно вращающимися переключателями 17, 18 и большим числом устройств выборки и хранения на  $RC$ -цепочках 20, 21. Конечно, сейчас



подобный прогнозатор будут выполнять на микро-ЭВМ, но суть обработки информации останется неизменной. Из-за синхронности вращения переключателя 17 каждая отдельная цепочка подключается к сети через резистор 19 на короткое время и при строго определенной фазе. Полный поворот синхронного переключателя соответствует периоду напряжения сети, так что все моменты этого периода привязаны к определенным цепочкам. Каждая цепочка фильтрует большую последовательность предыдущих моментов в определенной фазе как аperiodическое динамическое звено (как  $RC$ -цепочка). В результате случайные неповторяющиеся флуктуации фильтруются и остаются только повторяющиеся каждый период значения. Синхронный переключатель 18 синхронно снимает информацию с этих цепочек с опережением по фазе вращения. В результате выходной сигнал (е) получается опережающим к входному сигналу (д) для регулярной (повторяющейся, детерминированной) составляющей. Если резистор 19 закоротить, то  $RC$ -цепочка будет хранить информацию об одном предыдущем

периоде без фильтрации всех предыдущих периодов. Тогда прогнозатор превращается в устройство задержки на  $T/2 - t$ , но картина (рис.17) не изменится, потому что на ней показаны детерминированные сигналы. Таким образом, упреждение в данном устройстве осуществляется на основе задержки меньше, чем на период.

Очевидно, что в сетях постоянного тока прогнозом может быть ближайшее прошлое состояние (биржевики говорят, что текущий курс акций является лучшим прогнозом на будущее) или какая-то динамическая фильтрация прошлых состояний, например, одним апериодическим звеном. В системах управления на выходе измерительного преобразователя постоянного тока для фильтрации ставят RC-цепочку, не подозревая, что осуществляют этим хороший прогноз. Получается, что в сетях постоянного тока прогнозаторы применяются давно.

На рис. 16 регулярная составляющая выделяется из сигнала пассивной мощности на выходе известного измерительного преобразователя (рис. 11). Однако из любого сигнала  $x(t)$  вообще можно выделить регулярную составляющую  $x_{\text{рег}}(t)$  описанным прогнозатором и случайную составляющую  $x_{\text{сл}}(t)$ , как невязку регулярной составляющей до полного сигнала

$$x(t) = x_{\text{рег}}(t) + x_{\text{сл}}(t). \quad (7.23)$$

Эти две составляющие ортогональны на большом периоде, то есть среднеквадратичные значения на этом периоде связаны уравнением

$$X^2 = X_{\text{рег}}^2 + X_{\text{сл}}^2. \quad (7.24)$$

Мы имеем дела с еще одним вариантом разложения на «технические ортогональные составляющие»! Можно из пассивной составляющей выделить регулярную часть (рис. 17), а можно из всего тока выделить регулярную составляющую, а потом из нее выделять активную и др. Может быть, со временем будут приняты термины типа «случайная составляющая реактивной составляющей».

Интересно, что результаты выделения схемой (рис.16) будут зависеть от постоянной времени RC-цепочек или от значения резистора 19. Сама схема представляет собой вариант нерекурсивного импульсного фильтра. Как и схемы (рис.11, 12) она глубже отражает процессы прогноза, чем это делает человек при своем упрощенном подходе.

## 7.7. Практическое измерение индивидуальных ответственностей

Для измерений относительных энергетических составляющих требуется наличие в одном месте четырех мгновенных сигналов сети и электроприемника. Учет ответственности имеет смысл для достаточно мощных одиночных электроприемников типа клетки прокатного стана, дуговой сталеплавильной печи. Такие электроприемники имеют отдельный ввод и свои индукционные счетчики на главной понизительной подстанции (ГПП) завода. Все счетчики собраны на общих щитах, где имеются счетчики ввода высокого напряжения ГПП. То есть все необходимые сигналы имеются на общем поле. Часто необходимые сигналы оказываются разнесенными на большое расстояние. Тогда два сигнала должны быть переданы на это расстояние, например, средствами телемеханики. Точная и быстрая передача переменной аналоговой информации – сложная и дорогая техническая проблема. Интересны предложения, уменьшающие требуемый объем передаваемой информации.

Отмечалось, что чем выше уровень ГПП, которую можно условно назвать «наблюдателем» тем синусоидальнее сигналы  $u_s$  и  $i_s$ , тем дальше находится эта ГПП от электроприемника. Поэтому при измерениях относительно этого далекого наблюдателя допустимо принять сетевые сигналы чисто синусоидальными. Тогда можно синусоидальные сигналы первой гармоники  $u_{s1}$  и  $i_{s1}$  восстанавливать у электроприемника по минимальной передаваемой информации об амплитудах и фазах сетевых сигналов. Более того! Благодаря удивительным свойствам синусоиды (рис.7а) не надо даже обеспечивать синфазность сетевых и восстанавливаемых сигналов. Это следует из сравнения результатов расчетов (3.17) и (3.18), где в (3.18) каждый элемент фазу своего напряжения принимал за нуль, тем не менее мощности не изменились по сравнению с (3.17), где строго соблюдалась синфазность. Несинхронная схема передачи сигналов первых гармоник приведена на рис. 18. Использована уже известная схема (рис.11б) выделения из сигнала на непомеченном входе сигнала эталонной формы на входе, помеченном «\*». На входы эталонных форм подаются квадратурные сигналы синуса и косинуса стабилизированной амплитуды, частотой сети, свободной фазировки с сетью от генератора синусоидального напряжения (ГСН). Первые каскады выделяют синусную составляющую, вторые – из остатка косинусную. После второго каскада остаются только невязки или сигналы высших и низших гармоник  $u_{s\sim}$  и  $i_{s\sim}$  (выделение первых гармоник поставило нас и в дальнейшем на общепринятый

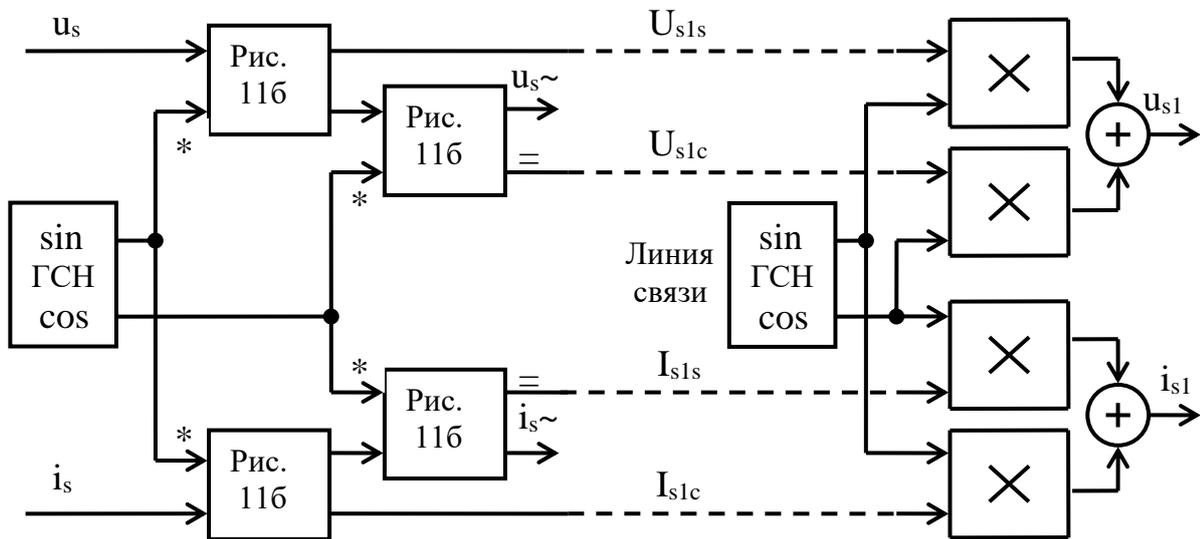


Рис. 18

язык гармонического анализа). На выходах « $\Rightarrow$ » медленно изменяющегося сигнала формируется сигнал множителя перед эталоном, то есть амплитуда синусоиды или косинусоиды. Этот сигнал можно получить на непоказанном на рис.18 выходе «\*». Четыре амплитуды в виде медленно изменяющихся сигналов передаются по линиям связи. Из-за медленности изменений передача может быть предельно упрощена. У электроприемника сигналы используются как амплитуды при синусоидах и косинусоидах. Фазировка двух ГСН не требуется. При этом будут восстановлены сигналы первых гармоник с той же взаимной фазировкой между напряжением и током, но без фазировки с сигналами сети. Как выше описано, эта фазировка не требуется. Очевидно, что можно предложить еще более простые технические решения поставленной проблемы в рамках предлагаемой теории четырехсигнального энергетического баланса (4.11), (4.25).

Восстановленные сигналы первых гармоник сети используются в любой описанной измерительной аппаратуре, например, на базе индукционных счетчиков. После этого энергосистеме остается только разработать систему оплаты за ее загрузку. При этом система должна получиться гораздо проще существующей! Сейчас действуют тарифы на дневную и ночную электроэнергию, система контроля за превышением заявленного максимума в определенные часы, более десяти режимов работы электроприемников, заставляющих потребителя отключать часть из них, есть предложения по дальнейшему усложнению системы оплаты. В предлагаемую систему оплаты (4.11) уже заложен квадратичная связь с загрузкой энергосистемы и плата будет автоматически повышаться с ее ростом. Можно будет ограничиться

только двумя ставками (две узаконенные цифры!): за потребленную электроэнергию (за уголь – обычная ставка) и за загрузку мощностей (предлагаемая ставка) без оговорок на время года и суток. Далее энергосистеме вообще можно будет отказаться от участия в регулировании режимов электроприемников и забыть о «тангенсе фи». В новых условиях потребители сами договорятся между собой, создадут какой-то свой картель, который переведет часть предприятий в режим работы «компенсатора» активной нагрузки и компенсирует неудобства этим предприятиям, вспомнит о разработках в области компенсированных преобразователей. Да и в квартирах рачительные хозяева сами найдут выгодные для себя часы включения электронагревателей. Конечно, это все начнет действовать в условиях рынка, когда неплательщики будут просто отключаться.

Реализация счетчиков полной энергии или ресурса описана в параграфе 7.4. Вряд ли целесообразно их установка у индивидуальных электроприемников, так как реализация вышеописанных мер уже будет заставлять их снижать нагрузку при общей перегрузке.

К сожалению, за пределами теории остается вопрос ответственности за загрузку большого числа источников питания, что имеет место в реальных энергосистемах. Как быть с формулой (4.25), если у первого источника  $Q_{S1} > 0$ , а у второго  $Q_{S2} < 0$ ? Но надо понять, что данная проблема не решалась и раньше через счетчики реактивной энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беллман Р. Введение в теорию матриц.– М.: Наука, 1969. – 368 с.
2. Гельман М.В., Лохов С.П. Тиристорные регуляторы переменного напряжения. – М.: Энергия, 1975. – 104 с.
3. Гноенский Л.С., Каменский Г.А., Эльсгольц Л.Э. Математические основы теории управляемых систем. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
4. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке.– М.: Энергоатомиздат, 1985. –112 с.
5. Замараев Б.С., Солодухо Я.Ю. Обобщенные энергетические показатели систем с вентильными преобразовательными устройствами// Современные задачи преобразовательной техники. – Киев: ИЭД АН УССР, 1975.–Ч.4. –С.21–26.
6. Замараев Б.С., Райхман Э.Н. Влияние тиристорных электроприводов на электроснабжающие сети. Итоги науки и техники. Электропривод и автоматизация промышленных установок.–М.:ВИНИТИ, 1977.–Т.5.–93 с.

7. Замараев Б.С. Критерии минимума потерь энергии в электроснабжающей сети// Электромагнитное совмещение силовых полупроводниковых преобразователей. – Таллин: АН ЭССР, 1981, С.29–33.
8. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. –Новосибирск: Изд. НГУ, 1990. – 220 с.
9. Калантаров П.Л., Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. –М.–Л.: Госэнергоиздат, 1951. –464 с.
10. Кантор И.Л., Солодовников А.С. Гиперкомплексные числа. –М.: Наука, 1973. – 144 с.
11. Кирпатовский С.И.Обоснование теории полной мощности многофазной цепи// Известия вузов. Энергетика, 1959. –N2. – С.30–41.
12. Коробицын Ю.А., Непопалов В.Н., Чечушков В.Г. Быстродействующий преобразователь мощности// Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Современные методы и средства быстродействующего преобразования режимных параметров энергосистем». –Челябинск: УДНТП общества «Знание», 1990.– С.24.
13. Круг К.А. Основы электротехники. Теория переменных токов. –М.–Л.: Госэнергоиздат, 1946.–Т.2. –636 с.
14. Лохов С.П.,Гельман М.В. Повышение качества электроэнергии в автономных системах управляемой компенсацией отклонений тока от энергетически оптимальной формы// Вопросы управления в автономных электроэнергетических системах. Труды семинара «Кибернетика электроэнергетических систем». Труды ЧПИ N157. – Челябинск: ЧПИ, 1975.– Вып. 1– С.274–279.
- 15 Лохов С.П. Определение и измерение активной и пассивной составляющих тока однофазной сети// Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. Сборник научных трудов N158. –Челябинск: ЧПИ, 1975. – С.174–179.
16. Лохов С.П. О разложении несимметричного несинусоидального изменяющегося тока на составляющие и определении понятия «коэффициент мощности»// Современные задачи преобразовательной техники. –Киев: ИЭД АН УССР, 1975.–Ч. 5. –С.270–275.
17. Лохов С.П. О возможности компенсации регулярной составляющей пассивного тока систем с вентильными преобразователями// Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. Сборник научных трудов N196. –Челябинск: ЧПИ, 1977. –С.125–127.
18. Лохов С.П. Энергетические показатели вентильных преобразователей и поверхностный эффект// Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. Сборник научных трудов N270. –Челябинск: ЧПИ, 1982. –С.77–81.

19. Лохов С.П. Некоторые основы экономической теории энергетических показателей// Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: ЧПИ, 1985. –С.125–134.
20. Лохов С.П. Основы теории относительных симметричных энергетических показателей// Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей. Тезисы докладов Третьего Всесоюзного научно-технического совещания. –Таллин: АН ЭССР, 1986. –Ч. 1. –С.160–161.
21. Лохов С.П. Интегральные энергетические показатели сложных электрических систем// Первая всесоюзная конференция по теоретической электротехнике. Секция 1,2. –Ташкент: АН СССР, 1987.– С.18–19.
22. Лохов С.П. Балансируемые относительные энергетические составляющие в электрических цепях// Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. Тематический сборник научных трудов. –Челябинск: ЧПИ, 1987. –С.87–94.
23. Лохов С.П. Энергетические составляющие в сетях с вентильными преобразователями// Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве (Тезисы докладов). –Челябинск: ЧПИ, 1989.–С.155–156.
24. Лохов С.П. Гиперкомплексные составляющие полной мощности в трехфазных цепях// Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Современные методы и средства быстродействующего преобразования режимных параметров энергосистем». –Челябинск: УДНТП общества «Знание», 1990. –С.12–13.
25. Лохов С.П. Концепция теории балансируемых составляющих полной мощности трехпроводной сети// V Всероссийская научно-техническая конференция «Пути улучшения энергетических и массо-габаритных показателей полупроводниковых преобразователей электрической энергии». –Челябинск: ЧГТУ, 1993. –С.52–54.
26. Лохов С.П. Относительные балансируемые энергетические составляющие полной мощности нелинейных электрических цепей и их измерение// Силовая электроника и решение проблем ресурсо– и энергосбережения. –Харьков: ХПИ, 1993. –С.340–344.
27. Лохов С.П. Относительные балансируемые энергетические составляющие полной мощности однофазной сети// Электротехнические системы и комплексы.– Магнитогорск: Издание МГМА, 1996. –Вып. 2. –С.82–87.

28. Лохов С.П. Относительные балансируемые энергетические составляющие полной мощности трехфазной сети. – Там же. – С. 88–93.
29. Лурье Л.С. Кажущаяся мощность трехфазной системы// Электричество, –1951. – №1. – С.17–21.
30. Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
31. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических системах. – М.: Энергия, 1975. – 128 с.
32. Обухов С.Г. Коэффициент мощности импульсных регулирующих устройств// Электричество, 1965. – №11. – С.36.
33. Основы теории цепей. Учебник для вузов. Изд. 4-е, переработанное/ Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил и др. – М: Энергия, 1975. – 752 с.
34. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии/ А.Ф. Крогерис, К.К. Рашевиц, Л. Рутманис и др. – Рига: Зинатне, 1969. – 531 с.
35. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем/ И.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
36. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебн. пособие для вузов/ Д.В. Васильев, М.Р. Витель, Ю.Г. Горшенков и др. – М.: Радио и связь, 1982. – 582 с.
37. Резник Л.Ф., Торбенков Г.М., Чечушков В.Г. Об одном подходе к определению составляющих мощности произвольной цепи// Электричество, 1987. – №7. – С.43–45.
38. Сарв В. Вентильные цепи регулирования напряжения с управляемым межфазным энергообменом. – Таллин: Валгус, 1986. – 184 с.
39. Солодухо Я.Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности. Реактивная мощность в цепях с несинусоидальными токами и статические устройства для ее компенсации. – М.: Информэлектро, 1981. – 89 с.
40. Солодухо Я.Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. Часть 1. Реактивная мощность при несинусоидальных режимах работы// Электротехническая промышленность. Серия 05. Полупроводниковые силовые приборы и преобразователи на их основе: Обзорная информация. – М.: Информэлектро, 1987. – 52 с.

41. Супрунович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок. –М.: Энергоатомиздат, 1985.– 136 с.
42. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. –М.: Энергия, 1976. –544 с.
43. Curtice D.H., Redoch T.W. An assessment of load frequency control impacts caused by small wind turbines// IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. –1983. –V.102, N1. – С.162–170.
44. Filipski P. Pomiar prądu biernego i mocy biernej w układach o przebiegach odkształconych// Przegląd Elektrotechniczny, 1982.–r.58, nr.7. –С.150–154, (польск).
45. Fryze S. Wirk-, Blind-und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung// Elektrotechnische Zeitschrift. 1932 – Н 25, 26, 29. –С.596–599, 625–627, 700–702.
46. Harashima F., Inaba H., Tsuboi K. Closed-Loop Control System for the Reduction of Reactive Power Required by Electronic Converters// IEEE Trans. Ind. Electron. and Control Instr. 1976. –V.23 , N2. -С.162–166.
47. Modification of power system operation for significant wind generation/ R.A.Schlueter, G.L. Park, M. Lotfalian и др.// IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems. 1983. –V.102, N1. – С.153–161.
48. Tsuboi K., Harashima F. Real time measurement and estimation of reactive power required by semiconductor power converters// IECI Annual Conf.Proceedings Ind. Electronics and Control Instr. Philadelphia, Pa, 1977. –С.68–72.
49. А.с. 705354 СССР G01R19/06. Способ измерения пассивной составляющей тока/ С.П. Лохов (СССР) –Заявл. 10.03.72, опубл. 25.12.79, бюл. N47.
50. А.с. 556550 СССР H02P13/18. Способ управления вентиляльным преобразователем/ М.В.Гельман, С.П.Лохов, А.Н.Рыжков (СССР) –Заявл. 27.04.72, опубл. 30.4.77, бюл. N16.
51. А.с. 756591 СССР H02P13/16. Способ управления преобразователем/ С.П.Лохов – Заявл.23.11.73, опубл. 15.8.80, бюл. N30.
52. А.с. 1335886 СССР G01R19/06. Способ измерения пассивного тока электроприемника и его составляющих/ С.П.Лохов (СССР)– Заявл. 12.08.85, опубл. 7.9.87, бюл. N33.
53. Патент России 1552111 G01R21/00. Способ определения величины потерь в сети электроснабжения/ С.П.Лохов (Россия) – Заявл. 18.05.88, опубл. 23.3.90, бюл. N11.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
<b>1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ОДНОГО ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКА В СЕТИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ</b>	
1.1. Реферат статьи С.Фризе [45].....	6
1.2. Полная мощность электроприемника и его энергетически составляющие при короткопериодических сигналах.....	10
1.3. Энергетические показатели сети.....	12
1.4. Ответственность электроприемника перед сетью электроснабжения.....	13
<b>2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ В СЕТИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ</b>	
2.1. Автор пособия о предложении Б.С. Замараева [5, 7].....	15
2.2. Начало теории относительного энергетического баланса для сети.....	17
2.3. Ортогональные функции Фризе–Замараева.....	19
2.4. Первое приближение к интегральной формуле относительного энергетического баланса.....	21
2.5. Появление реактивного тока.....	22
<b>3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ПИТАНИЯ В КУРСЕ ТОЭ</b>	
3.1. Переменный синусоидальный ток однофазной цепи в курсе ТОЭ.....	23
3.2. Критический анализ представленного курса.....	27
<b>4. БАЛАНСЫ ОТВЕТСТВЕННОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ</b>	
4.1. Ортогонализация Грама - Шмидта.....	31
4.2. Генеральная идея новой теории.....	35
4.3. Гиперомплексные числа в математике и в ТОЭ.....	36
4.4. Тождества квадратов и формула баланса новой теории.....	38
4.5. Варианты формулы энергетического баланса.....	40
4.6. Энергетические балансы при разложениях по двум ортам.....	42
4.7. Энергетические балансы при разложениях по четырем ортам.....	47
4.8. Двучленный энергетический баланс.....	51
4.9. Частотные формы в курсе ТОЭ и по новой теории.....	52
4.10. Искажения и другие составляющие.....	55

<b>5. КОМПЛЕКСНЫЙ БАЛАНС ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЦЕПИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ</b>	
5.1. Комплексные размерности.....	57
5.2. Векторное произведение.....	60
5.3. Извращенное векторное произведение.....	63
<b>6. ПАРАДОКСЫ КОМПЕНСАЦИИ И ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ</b>	
6.1. Компенсация и снижение потерь энергии.....	65
6.2. Компенсатор как независимый электроприемник.....	67
6.3. Компенсатор как... компенсатор.....	68
6.4. Виновники резонансов.....	69
6.5. Измерения индукционными счетчиками.....	70
6.6. Главный парадокс поинтервального баланса.....	72
6.7. Сеть электроснабжения – никаких парадоксов!.....	74
<b>7. ВЫДЕЛЕНИЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ДООПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ.....</b>	
7.1. Ортогональные анализаторы Фризе.....	75
7.2. Ортогональные анализаторы Грама-Шмидта.....	78
7.3. Энергетические составляющие однофазной сети в переходных и длиннопериодических режимах.....	79
7.4. Экономический подход к определениям среднеквадратичного тока и полной мощности сети.....	85
7.5. «Технические» энергетические составляющие.....	92
7.6. Регулярные и случайные энергетические составляющие.....	94
7.7. Практическое измерение индивидуальных ответственных.....	98
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>100</b>

Сергей Прокопьевич Лохов  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ МОЩНОСТИ  
ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Часть 1

Однофазные 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. 6,28. Уч.-изд. Л. 6,10.  
Тираж 150 экз. Заказ 243/354. Цена 7 р. 20 к.

---

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