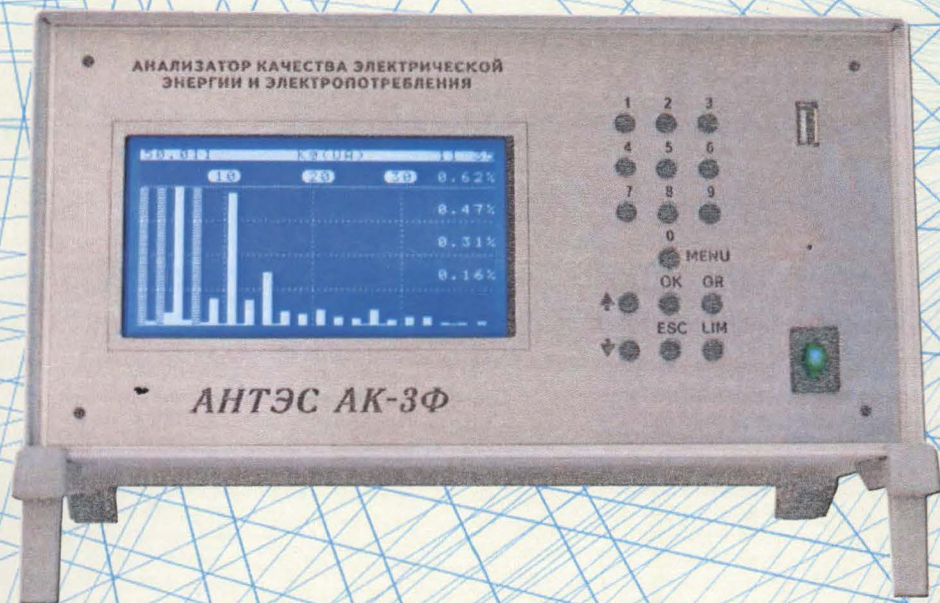


АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ

УЧЕТ И КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ



Харьков 2017

**УЧЕТ И КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ
ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Харьков 2017

УДК 621.311

У91

Печатается по постановлению ученого совета
Национального Технического Университета
«Харьковский политехнический институт»
(Протокол № 5 от 2 июня 2017г.)

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор А.Л. Ерохин
Харьковского Национального университета радиоэлектроники
Доктор технических наук, профессор А.Н. Мороз
Харьковского национального технического университета сельского хозяйства
им. Петра Василенка

**Е.И. Сокол, Ю.А. Сиротин, О.Г. Гриб, В.Г. Сыченко, Д.А. Босый,
Д.А. Гапон, С.В. Шве́ц, Т.С. Иерусалимова, Р.Н. Лисиченко**

У91 Учет и компенсация реактивной мощности при несимметричных режимах работы систем электроснабжения, Е.И. Сокол, Ю.А. Сиротин, О.Г. Гриб, В.Г. Сыченко, Д.А. Босый, Д.А. Гапон, С.В. Шве́ц, Т.С. Иерусалимова, Р.Н. Лисиченко / Под общей редакцией член-корреспондента НАН Украины, доктора технических наук, профессора Сокола Е.И. - Харьков: - 2017, ФООП Панов А.Н., 290 с.

ISBN 978-617-7541-04-1

В монографии рассмотрены вопросы учета и компенсации реактивной мощности при несимметричных режимах работы систем электроснабжения. Данная книга предназначена для повышения квалификации инженерно-технических работников энергосистем и систем электроснабжения, а также может быть полезной для студентов электроэнергетических и электротехнических специальностей высших учебных заведений в качестве учебного пособия при дипломном и курсовом проектировании.

УДК 621.311

У91

ISBN 978-617-7541-04-1

© Е.И. Сокол, Ю.А. Сиротин,
О.Г. Гриб, В.Г. Сыченко,
Д.А. Босый, Д.А. Гапон,
С.В. Шве́ц, Т.С. Иерусалимова,
Р.Н. Лисиченко, 2017

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВА – векторная алгебра;

ВП – векторное произведение;

д.з. – действующее значение;

ИТЗ – искусственная точка заземления;

КЭ – качество электроэнергии;

КМ – коэффициент мощности;

КМП – комплексная мощность пульсаций;

КМН – комплекс мощности небаланса;

КНМ – комплекс непульсирующей мощности;

КС – комплексно-сопряженный;

КСП – комплексное скалярное произведение;

КСН – коэффициент самоортогональности напряжения;

ЗКСН – 3-комплекс самоортогональности напряжения;

ММ – мгновенная мощность;

МП – мощность пульсаций;

МН – мощность несимметрии

НМ – несбалансированная мощность

МППМ – метод пульсирующей мощности;

МСК – метод симметричных координат;

МСТ – метод симметризации тока;

МФК – метод фазных координат;

м.з. – мгновенное значение;

НМ – несбалансированная мощность;

ОНБ – ортонормированный базис;

ОНР – оптимальный непульсирующий режим;

НП, ПП, ОП – ноль – прямая – и обратная последовательность;

ПМ – полная мощность;

ПЭ – поток энергии;

ПКЭ – показатели качества электроэнергии;

СК – симметричные координаты;

СКМ – стандартная комплексная мощность;

СРМ – стандартная реактивная мощность;

СП – скалярное произведение;

с.к.в. – среднеквадратичная величина;

ТО – точка отсчета;

ТП – точка подключения;

T – период основной частоты ($T\omega = 2\pi$);

\top – знак транспонирования;

УМ – уравновешенная мощность;

ФК – фазные координаты;

ЭКТ – энергетические компоненты тока;

ЭЭ – электрическая энергия;

$\langle a, b, c \rangle$ – сечение трех фаз;

A, A^{-1} – матрицы преобразования между базисами неуравновешенного и сбалансированного режима;

B_K – диагональная матрица реактивных проводимостей компенсатора 0-последовательности;

B_V^K – матрица параметров Δ – компенсатора;

$B_{AB}^k, B_{BC}^k, B_{CA}^k$ – реактивные проводимости Δ – компенсатора;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности однофазной цепи;

$\cos \varphi_s$ – отношение активной мощности к геометрической мощности;

C – матрица преобразования *Clark* между фазовыми и $\alpha\beta 0$ координатами;

$C_{\alpha\beta}$ – усеченная матрица преобразования *Clark*;

\mathbb{C} – комплексная плоскость;

$\mathbb{C}^{(3)}$ – комплексное 3–мерное гильбертово пространство;

$C_l(I_l)$ – стоимость поставки l – энергетической компоненты тока, $l \in \{a, r, u\}$;

$C_{\Delta P}(I_l^2)$ – стоимость потерь l – энергетической компоненты тока, $l \in \{a, r, u\}$;

\mathcal{D}_L – матрица–проектор на подпространство 0- уравновешенных векторов;

\mathcal{D}_0 – матрица–проектор на орт 0-последовательности;

D – комплексный вектор мощности небаланса 3–фазной цепи;

D_0 – комплексный вектор мощности небаланса трехпроводной цепи;

\dot{D}_0 – комплексная мощность *небаланса* трехпроводной цепи;

e_θ – орт 0-последовательности;

e_1, e_2 – орты прямой и обратной последовательностей;

$F(I)$ – целевая функция условно экстремальной задачи минимизации потерь

$\mathcal{F}, \mathcal{F}^{-1}$ – модифицированные матрицы Fortescue прямого и обратного преобразования фазовых и симметричных координат;

$\mathcal{F}_0, \mathcal{F}_0^H$ – усеченные модифицированные матрицы Fortescue для 0-уравновешенных 3-комплексов ;

$G(i, u)$ – матрица Грама векторов м.з. тока и напряжения;

$G(I, U)$ – матрица Грама 3–комплексов тока и напряжения;

$\mathcal{H}_\Delta^{(2)}$ – комплексное 2–мерное подпространство 0- уравновешенных 3 – комплексов;

$i_a(t), i_r(t)$ – м.з. активного и реактивного тока в однофазной цепи;

$i_L(t), i_S(t), i_C(t)$ – м.з. тока нагрузки, источника и компенсатора в однофазной цепи;

$i(t), |i(t)|$ – вектор–столбец м.з. 3–фазного тока и его норма в $\mathbb{R}^{(3)}$;

$i_n(t), i_0(t)$ – ток нейтрали и 0–последовательность тока;

$I, |I|$ – 3–комплекс фазного тока и его норма в $\mathbb{C}^{(3)}$;

I_{af}, I_r – 3–комплексы активного и неактивного тока Fryze;

I_{af} – д.з. активного тока Fryze;

I_h, I_n – 3–комплексы тока баланса и небаланса;

\dot{I}_h, \dot{I}_n – комплексы тока баланса и тока небаланса;

I_1, I_2 – 3-комплексы тока ПП и ОП;

\dot{I}_1, \dot{I}_2 – комплексы тока ПП и ОП;

I_a, I_r – 3-комплекс активной и реактивной составляющей тока баланса;

I_p, I_n – 3-комплексы пульсирующего и уравновешенного тока;

\dot{I}_n, \dot{I}_p – комплексы тока пульсаций и уравновешенного тока;

I_k – 3-комплекс тока 0-компенсатора;

$\dot{I}_{K1}, \dot{I}_{K2}$ – симметричные компоненты тока ПП и ОП Δ – компенсатора;

I_L, I_S, I_C – 3-комплексы тока нагрузки, источника и компенсатора;

I_{Su} – 3-комплекс тока компенсирующего пульсаций ММ активного тока;

I_0, U_0 – 0-компоненты 3-комплекса тока и напряжения;

I^*, U^* – комплексно-сопряженные 3-комплексы тока и напряжения;

I_Δ, U_Δ – 0-уравновешенные компоненты 3-комплексов тока и напряжения;

I_φ, U_φ – 3-комплексы межфазных токов и напряжений;

K – 3-комплекс неппульсирующей (уравновешенной) мощности;

\dot{K}_0 – комплексная неппульсирующая мощность трехпроводной цепи;

k_{U2}, k_{U0} – коэффициенты несимметрии напряжения по ОП и 0-последовательности;

k_{I2}, k_{I0} – коэффициенты несимметрии тока по ОП и 0-последовательности;

\mathcal{L} – кососимметричная матрица векторного умножения на орт e_n справа;

k_p, k_Q, k_p – коэффициенты дифференцируемого тарифа;

$\mathcal{L}_\Delta^{(2)}$ – 2-мерное вещественное подпространство трехмерных 0-уравновешенных векторов в $\mathbb{R}^{(3)}$

$L_2^{(3)}(0, T)$ – ∞ -мерное гильбертово пространство 3-кривых на отрезке $(0, T)$;

$\mathcal{L}(I; \gamma_1, \gamma_2; \lambda_1, \lambda_2)$ – Лагранжиан 2-критериальной условно-экстремальной задачи;

$\gamma_1, \gamma_2; \lambda_1, \lambda_2$ – вещественные множители Лагранжа;

M – матрица инцидентности нагрузки типа треугольник;

m – число фаз цепи;

$[m_p \quad m_n]$ – базис разбалансированного режима 3-проводной цепи.

$[m_p \quad m_n]$ – базис неуравновешенного режима 3-проводной цепи;

\dot{N} – комплексная мощность пульсаций синусоидального режима;

$\dot{N}_0, \dot{N}_\Delta = 0$ – составляющая и 0-уравновешенная составляющая КМП;

O – матрица преобразования между симметричным базисом и базисом неуравновешенного режима;

$p(t)$ – мгновенная мощность;

$\bar{p}, \tilde{p}(t)$ – постоянная (средняя) и переменная компонента ММ;

$p_\Delta(t)$ – активная ММ 0-уравновешенных процессов;

P – стандартная активная (средняя) мощность синусоидального режима;

$P_0, P_\Delta = 0$ – составляющая и 0-уравновешенная составляющая активной мощности синусоидального режима;

P_1, P_2 – активная мощность прямой и обратной последовательности ;

\mathcal{P} – Матрица преобразования симметричного базиса и базиса потерь;

$q(t), \bar{q}, \tilde{q}(t)$ – векторная ММ, ее постоянная и переменная составляющие ;

$q_0(t), q_\Delta(t)$ – векторная и скалярная неактивные ММ 0-уравновешенных процессов;

$q(t) = |q(t)|$ – неактивная ММ (норма м.з. векторной ММ в $\mathbb{R}^{(3)}$);

Q – реактивная мощность синусоидального режима;

Q_F – неактивная мощность по Fryze ;

Q_1, Q_2 – реактивная мощность прямой и обратной последовательности;

$\mathbb{R}^{(3)}$ – вещественное 3-мерное евклидово пространство;

$\operatorname{Re} \dot{Z} = a, \operatorname{Im} \dot{Z} = b$ – вещественная и мнимая часть комплекса $\dot{Z} = a + jb$;

$s(t)$ – кажущаяся мгновенная мощность;

\dot{S} – комплексная мощность синусоидального режима (СКМ);

$\dot{S}_a, \dot{S}_b, \dot{S}_c$ – комплексные мощности фаз;

\dot{S}_1, \dot{S}_2 – комплексная мощность прямой и обратной последовательности;

S_G – геометрическая (векторная) полная мощность;

S_A – арифметическая полная мощность;

S_B – полная мощность по *Buchholz*;

$\dot{S}_0, \dot{S}_\Sigma = 0$ – неуравновешенная и 0–уравновешенная составляющие СКМ;

$u(t)$ – вектор-столбец м.з. фазных напряжений;

$u(t) = |u(t)|$ – норма вектора м.з. напряжений в пространстве $\mathbb{R}^{(3)}$;

u_v – вектор м.з. приведенных межфазных напряжений;

U, U – 3–комплексы фазных и приведенных межфазных напряжений;

v, v_v – орты 3 – комплексов фазных и межфазных напряжений;

$U = |U|$ – норма 3–комплекса напряжения;

\dot{U}_1, \dot{U}_2 – комплексы напряжений прямой и обратной последовательности;

U – матрица напряжений ПП и ОП;

$w_\Sigma(t), w_v(t)$ – орты векторов м.з. фазных и межфазных напряжений;

W – поток энергии;

$\dot{Y}_c = G_c + jB_c$ – эквивалентная проводимость сбалансированного синусоидально-го режима;

$\dot{Y}_s = G_s + jB_s$ – эквивалентная проводимость сбалансированной составляющей тока несбалансированного режима;

$\dot{Y}_a, \dot{Y}_b, \dot{Y}_c$ – эквивалентные проводимости фаз;

\dot{Y}_p, \dot{Y}_n – проводимость тока пульсаций и неппульсирующего тока;

\dot{Y}_s, \dot{Y}_n – проводимость тока баланса и тока небаланса

\mathcal{Y}_v – диагональная матрица межфазных проводимостей.

x_Σ – 0- уравновешенная составляющая вектора x ;

x_0 – 0-составляющей вектора x ;

X_{Δ} – 0-уравновешенная компонента 3-комплекса X ;

X_0 – 0-компонента 3-комплекса X ;

$(X, Y) = X^{\top} Y^*$ – комплексное скалярное произведение 3-комплексов;

$|X|$ – норма 3-мерного комплексного вектора (3-комплекса) X в $\mathbb{C}^{(3)}$

$\|x(t)\|$ – норма 3-мерной кривой энергетического процесса $x(t)$ в $L_2^{(3)}(0, T)$;

$\langle x(t), y(t) \rangle$ – скалярное произведение 3-мерных кривых $x(t)$ и $y(t)$ в пространстве $L_2^{(3)}(0, T)$;

X^* – комплексно-сопряженный 3-комплекс к комплексу X ;

$\alpha = e^{j120^\circ}$ – оператор поворота комплексной плоскости \mathbb{C} ;

$\dot{\mu}$ – коэффициент самоортогональности напряжения;

$\eta = v \times v^*$ – 3-комплекс самоортогональности напряжения 4-проводной цепи;

$\dot{\eta}$ – комплексный коэффициент асимметрии напряжения 3-проводной цепи;

λ – коэффициент мощности;

$\lambda_p, \lambda_Q, \lambda_D$ – коэффициенты мощностей: активной ($\lambda = \lambda_p$), реактивной и несбалансированной;

ВВЕДЕНИЕ.....	15
Раздел 1. СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ МОЩНОСТИ И МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ	20
1.1 Проблематика теории мощности.....	20
1.2 ТМ в однофазной цепи с синусоидальными процессами.....	21
1.3 Интерпретация реактивной мощности.....	27
1.4 Полная (кажущаяся) мощность.....	28
1.5 Развивающиеся концепции ТМ для многофазных систем.....	29
1.5.1 Обобщение разложения Fryze для m - фазной цепи	31
1.5.2 Развитие метода Fryze – CPC Power Theory	35
1.5.3 Теория реактивной мгновенной мощности.....	36
1.5.4. Энергетическое различие мгновенной и интегральной ТМ.....	41
1.5.5 Проблема 0-последовательности напряжения.....	46
1.6 ТМ и компенсация в 3-фазной цепи с синусоидальными процессами	47
1.6.1 Разложение Fryze для 3–фазных синусоидальных процессов.....	48
1.6.2 Модифицированный метод симметричных составляющих.....	49
1.6.3 Симметричное напряжение и разложение Fryze.....	50
1.6.4 Методы компенсации при несимметричном напряжении.....	52
1.6.5 Неполнота ТМ при несимметричном напряжении.....	53
Раздел 2. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ МГНОВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ 3-ФАЗНОЙ СЕТИ.....	56
2.1 Анализ энергетических процессов в 4-проводной сети.....	58
2.1.1 Мгновенная мощность и неуравновешенный режим.....	58
2.1.2 Векторная ММ и уравнение мгновенных мощностей.....	59
2.1.3 Несбалансированный и сбалансированный режим.....	62
2.1.4 Ток и напряжение 0-последовательности.....	62

2.1.5	Представление скалярной и векторной ММ	67
2.1.6	0-уравновешенный режим.....	67
2.1.7	Структурная схема 0–разделения процессов 4-проводной схемы.....	69
2.2	Теория мгновенных мощностей в 3-проводной сети.....	72
2.2.1	Особенности энергетических процессов 3-проводной цепи.....	72
2.2.2	Матричные алгоритмы расчета 0-уравновешенных напряжений.....	74
2.2.3	Базисные функции процессов 3-проводной цепи.....	75
2.2.4	Орты фазного и межфазного напряжений.....	76
2.2.5	Разложение трехмерной кривой тока в $\mathcal{L}_{\Delta}^{(2)}$	77
2.2.6	Орт прямой последовательности и базис $\alpha\beta$ координат.....	79
2.2.7	Классификация энергетических режимов в 3-проводной цепи.....	83
2.3	Разложение тока в 4-проводной цепи с выделением НП.....	85
2.3.1	Особенности компенсации методом базисных функций.....	87
2.3.2	Алгоритм и реализация программы разложения тока	88
Раздел 3. ВЕКТОРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНУСОИДАЛЬ-		
НЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ В 4-ПРОВОДНОЙ СЕТИ		92
3.1	Синусоидальный режим и 3-комплексы.....	93
3.2	Стандартная ММ синусоидального режима.....	98
3.3	Векторная ММ синусоидального режима.....	102
3.4	Связь комплексного скалярного и векторного произведений.....	104
3.4.1	Орт и самоортogonalность несимметричного напряжения.....	106
3.4.2	Сбалансированный режим и 3 – комплекс мощности небаланса.....	108
3.4.3	Реально сбалансированный режим и реактивная мощность.....	112
3.5	Несбалансированный синусоидальный режим.....	115
3.5.1	Эквивалентные проводимости фаз.....	115
3.5.2	Уравнение мощностей несбалансированного режима.....	116
3.5.3	Сбалансированная и разбалансированная составляющие тока.....	117
3.5.4	Несимметричная нагрузка и приведенные проводимости.....	119
3.5.5	Аналитический расчет несбалансированного режима.....	122

3.5.6 Ток небаланса и вектор мощности небаланса	126
3.5.7 Эквивалентность уравнений мощностей несбалансированного режима.	127
3.6 Неуравновешенный синусоидальный режим.....	128
3.6.1 Уравнения мощностей неуравновешенного режима.....	128
3.6.2 Неуравновешенный режим и ток пульсаций.....	129
3.7 Детализация разложения Fryze и уравнение мощности потерь.....	133
Раздел 4. ТРЕХПРОВОДНАЯ СХЕМА С СИНУСОИДАЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ.....	137
4.1 Выделение процесса НП в синусоидальном режиме.....	137
4.2 0–уравновешенные синусоидальные энергетические процессы.....	138
4.2.1 Мощность небаланса и непульсирующая мощность 3–проводной цепи.	139
4.2.2 Непульсирующий ток и межфазное напряжение.....	142
4.2.3 Ток небаланса и КС межфазное напряжение.....	144
4.2.4 Комплексные орты фазных и межфазных напряжений.....	146
4.2.5 Неактивная мгновенная мощность и сбалансированный режим.....	149
4.3 Метод базиса для трехпроводной системы.....	151
4.3.1 Симметричный ортонормированный базис.....	151
4.3.2 Базисы несбалансированного и неуравновешенного режимов.....	156
4.3.3 Разложение тока в несбалансированном режиме.....	158
4.3.4 Разложение тока в неуравновешенном режиме.....	159
4.3.5 Связь мощностей неуравновешенного и несбалансированного режимов	161
4.3.6. Связь симметричного базиса с базисами потерь и пульсаций.....	162
4.4 Энергетические процессы в нагрузке типа треугольник.....	167
4.4.1 Матричная форма закона Ома в фазовых координатах	167
4.4.2 Усеченное преобразование Fortescue для 3-проводной сети.....	172
4.4.3 Матричная форма закона Ома в симметричных координатах.....	174

4.4.4 Числовое моделирование классифицированных режимов	177
Раздел 5. КОМПЕНСАЦИЯ НЕАКТИВНОГО ТОКА ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ	
ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ НАПРЯЖЕНИИ.....	184
5.1 Компенсация тока нейтрали в 4-проводной цепи.....	184
5.1.1 Компенсация тока нейтрали при несимметричном напряжении.....	186
5.1.2 Симметричное напряжение. Метод симметричных координат.....	190
5.1.3 Расчет компенсатора тока нейтрали.....	192
5.2 Компенсация в 3-проводной цепи при несимметричном напряжении...	194
5.2.1 Метод компенсации пульсирующей мощности.....	194
5.2.2 Метод симметричных координат и компенсация тока ОП.....	197
5.2.3 Компенсатор Fryze при несимметричном напряжении.....	199
5.2.4 Компенсация пульсаций активного тока Fryze.....	200
5.2.5 Создание уравновешенного режима минимальных потерь.....	205
5.3 Расчет реактивных LC - элементов Δ - компенсатора.....	211
5.3.1 Расчет элементов компенсатора методом симметричных координат.....	211
5.3.2 Расчет элементов компенсатора методом фазных координат.....	213
5.4 Числовое моделирование.....	216
5.5 Моделирование в среде MatLab.....	220
Раздел 6. УЧЕТ И ОПЛАТА НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛНОЙ	
МОЩНОСТИ.....	223
6.1 Метод расчета дополнительных потерь от несимметрии нагрузки.....	224
6.1.1 Синусоидальный режим в точке подключения асимметричной нагрузки.	224
6.1.2 Комплексные мощности фаз и уравнение мощностей.....	227
6.1.3 Типовые примеры, иллюстрирующие метод расчета потерь.....	230
6.2 Методика оценки дополнительных потерь по паспортным данным.....	234
6.2.1 Небаланс активных мощностей и фазный небаланс.....	236
6.2.2 Пример расчета.....	237

6.3	Расчет дополнительных потерь по текущим измерениям.....	238
6.4	Оплата потребления ЭЭ по энергетическим компонентам тока.....	242
6.4.1	Стандартный подход к оплате за активную мощность.....	243
6.4.2	Несбалансированный режим и энергетические компоненты тока.....	245
6.4.3	Метод оплаты электроэнергии по ЭКТ.....	248
6.4.4	Оплата потерь и оплата поставки.....	249
6.5	Схема подключения КУ и учетных средств ЭКТ.....	251
Раздел 7. КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИ-		
МОВ С КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ		
СЕТЯХ.....		253
7.1	Контроль электропотребления при несимметричных режимах сети.....	253
7.2	Симметрирования трехфазных сетей по мощности.....	256
7.3	Симметрирование и компенсация реактивной мощности в трехфазных сетях.....	262
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....		267

ВВЕДЕНИЕ

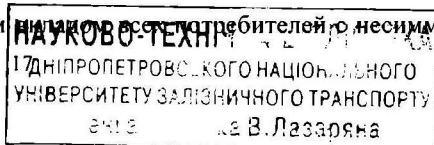
Эффективность использования электрической энергии (ЭЭ) определяется в основном созданием таких условий её потребления, при которых обеспечивает- ся требуемое качество поставки ЭЭ при минимальных потерях [12, 39, 90, 52, 63]. Качество поставки электроэнергии может существенно влиять на расход электроэнергии, надежность системы электроснабжения, технологические процессы производства [2, 109]. Превышение показателей качества электроэнергии (ПКЭ) выше допустимых (предельно допустимых) приводит к сокращению срока службы электрооборудования, понижению его эффективности и, в некоторых случаях, к нарушению технологического процесса. Минимизация потерь в 3-фазной электротехнической системе существенно связана с возможностью сокращения дополнительных потерь, которые обусловлены узлами потребления с реактивными, несимметричными и нелинейными нагрузками [2, 18–20].

Количество потребителей электроэнергии с реактивной, несимметричной и нелинейной нагрузкой постоянно возрастает. Реактивность, асимметрия и несинусоидальность режима потребления для ряда таких потребителей обусловлены технологическими причинами и имеют длительный характер. Такие потребители (дуговые сталеплавильные печи, вентильные преобразователи, преобразователи частоты, электросварочные установки и т.д.) оказывают негативное влияние на оборудование, чувствительное к качеству электроэнергии (устройства вычислительной техники, станки программного управления, да и просто вращающиеся машины и т.д.). Возрастает и число нагрузок с повышенными требованиями к качеству электроэнергии, что обостряет проблему электромагнитной совместимости электротехнического оборудования [22, 34, 106, 110–112]. Реактивность, асимметрия и нелинейность нагрузки в трехфазной системе электроснабжения приводят к наличию неактивных составляющих полной мощности (ПМ) и вызывает не только дополнительные потери электроэнергии, но и, в значительно большей мере, приводит к появлению пульсаций мгновенной мощности (ММ) – энергетической неуравновешенности системы. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению коэффициента полезного дейст-

вия, способствует увеличению вибраций, шума, возникновению опасных резонансных явлений при работе оборудования [21, 27, 113]. Пульсации потока энергии, наличие неактивной мощности указывает на неоптимальность передачи и потребления электроэнергии и ухудшение ее качества [120]. В условиях рыночной экономики сокращение потерь энергии, а также повышения точности учёта на всех стадиях производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии, задача создания оптимального режима потребления электроэнергии и улучшение ее качества в каждом узле потребления все более актуальна. Эта задача многогранна и многопланова, ее решение использует разные научные, технические и экономические аспекты [23, 35].

Эффективным решением задачи сокращения дополнительных потерь является применение компенсирующих устройств (КУ). С учетом фильтрации высших гармоник нелинейной нагрузки, используемое КУ в самой точке подключения обеспечивает требуемую для нормальной работы нагрузки компенсацию одновременно всех неактивных составляющих ПМ. Несмотря на требования ГОСТ 13109–97 [9], в реальных условиях несимметрия напряжения может превышать нормально допустимые значения и часто превышает предельно допустимые значения. Даже если несимметрия напряжения не превышает нормально допустимые значения, то, тем не менее, напряжение несимметрично и правильно функционирующее КУ должно работать в реальных условиях несимметричного напряжения. При несимметричном напряжении, когда активная мощность равна ПМ, и дополнительные потери устранены (и достигнут единичный коэффициент мощности) уравновешенный режим электроснабжения не обеспечивается (единичный коэффициент мощности не гарантирует отсутствие пульсаций мгновенной мощности). При несимметричном напряжении задача минимизации потерь и создание уравновешенного режима электроснабжения (симметризация нагрузки) становится многокритериальной. Усовершенствование методов компенсации и симметризации нагрузки при несимметричном напряжении требует дальнейшего развития теории мощности (ТМ). В рамках товарно-денежных отношений поставщик и потребитель выступают как равноцен-

ные коммерческие партнеры – субъекты единого процесса распределения и потребления ЭЭ. По показанию счетчика, установленного на границе балансовой принадлежности, потребитель должен оплатить соответствующие счета согласно публичному договору о купле-продаже приобретаемого им товара – электрической энергии. Потребляемая ЭЭ, потребляемая реактивной, асимметричной и нелинейной нагрузкой, не однородна и характеризуется составляющими ПМ. Часть электроэнергии безвозвратно передается и потребляется нагрузкой потребителя, совершает работу и ассоциируется с активной мощностью. Доля активной мощности характеризуется коэффициентом мощности [32, 33]. Электроэнергия неактивных составляющих ПМ обеспечивает нормальную работу нагрузки. Если реактивная мощность (мощность сдвига) требуется для нормальной работы симметричной активно-индуктивной нагрузки потребителя (вращающиеся машины, трансформаторы), то неактивная составляющая ПМ, обусловленная несимметрией нагрузки, обеспечивает нормальную работу несимметричной (по технологии подключения) нагрузки. И использованная электроэнергия неактивных составляющих ПМ требует дополнительной оплаты потребителем. Даже в синусоидальном режиме существующие средства учета измеряют электроэнергию, которая обусловлена симметрией активно реактивных элементов нагрузки (симметрией проводимостей фаз) – электроэнергию активной и реактивной мощности. В синусоидальном режиме реактивность, асимметрия нагрузки определяет две неактивные составляющие ПМ (реактивную мощность сдвига и мощность несимметрии проводимостей фаз). Неактивная составляющая ПМ, обусловленная несимметрией нагрузки, не измеряется, не учитывается и не оплачивается потребителем. Однако несимметричные нагрузки, которые кроме дополнительных потерь, приводят к несимметрии напряжения и пульсации потока энергии, наносят электроснабжению существенно больший вред, чем симметрия реактивных проводимостей фаз (реактивная мощность). Рассматривая проблему качества поставки и потребления электроэнергии в целом, следует признать, что несимметрия напряжения в первую очередь обусловлена совместным влиянием потребителей, о несиммет-



ричной нагрузкой [22]. Это положение зафиксировано в межгосударственный стандарте ГОСТ 13109–97 [9]. Тем не менее, потребитель считает, что поставщик должен поставлять ЭЭ требуемого качества для любой его неоптимальной нагрузки и поэтому он КУ не устанавливает. При этом он не оплачивает потребляемую ЭЭ обусловленную несимметрией нагрузки. В рыночных условиях отношение потребителя к установке КУ можно изменить, если по показаниям счетчиков, установленных на границе балансовой принадлежности, потребитель будет оплачивать соответствующие счета не только за ЭЭ активной мощности. Поставщик заинтересован в том, чтобы потребители, нагрузки которых создают дополнительные потери в системе генерации и передачи и ухудшают качество электроэнергии (точнее – качество электроснабжения), платили за это по счетчику, а потребители хотят, чтобы электроснабжение обеспечивало их качественной ЭЭ и выставляло справедливый счёт. Политика энергоснабжающей организации должна эти желания реализовать как перевод каждого неоптимального режима в оптимальный режим. Заинтересованность потребителя в улучшении показателей качества электроэнергии должна обеспечиваться прозрачной и понятной методикой оплаты неактивных составляющих ПМ [21, 22]. Режимы потребления энергии неактивными составляющими ПМ имеют длительный характер и обусловлены технологическими причинами. Поэтому штрафовать за неактивные составляющие ПМ не корректно. ЭЭ неактивных составляющих ПМ обеспечивает нормальную длительную работу и должна быть оплачена по показаниям счетчиков ЭЭ составляющих ПМ, которые устанавливаются поставщиком на границе балансовой принадлежности [4, 32]. Несимметричная нагрузка приводит не только к дополнительным потерям в распределительной сети и повышенным требованиям к генерирующим станциям, но и к несимметрии напряжений, пульсации ММ. Поэтому счет за ЭЭ от несимметрии должен выставляться отдельной строкой (отдельным тарифом). В его основе должна быть научно обоснованная и правильно измеренная величина – мощность несимметрии проводимостей фаз. Оплата за ЭЭ каждой неактивной составляющей ПМ отдельно по своему тарифу стимулирует потребите-

ля уменьшать потери, вносимые каждой составляющей качества его нагрузки и устанавливать КУ. При таком подходе потребитель имеет выбор способа потребления электроэнергии неактивных составляющих ПМ: или от поставщика, или создавать ее самому с помощью установленного КУ. Свобода выбора ограничена итоговой стоимостью этих двух подходов. Оба подхода требуют наличия измерителя (счетчика) электроэнергии отдельных неактивных составляющих ПМ. Только если потребитель установил КУ, который полностью устраняет неактивные составляющие ПМ из цепей поставщика (выше точки балансовой принадлежности) показания счетчика по этим параметрам становятся равными нулю, и потребитель автоматически освобождается от дополнительной оплаты. Для решения задачи компенсации достаточно знание суммарной величины неактивных составляющих ПМ (величины неактивной мощности) без ее детализации. Создание методологии измерения и учета потребует знания величин каждой неактивной составляющей отдельно, что приводит к необходимости развития единого подхода к измерению и компенсации неактивных составляющих ПМ и разработки обобщенной теории мощности. Только в 3-проводной системе с симметричным напряжением устранение пульсаций и симметризация проводимостей фаз эквивалентные задачи (мощность пульсаций и мощность несимметрии проводимостей фаз равны) [108, 113]. При несимметричном напряжении эти мощности разные, их анализ для электротехнических систем требует создания векторной математической модели энергетических процессов несимметрических режимов 3-фазных систем. Обобщенная математической модель одновременно для 3-проводных и 4-проводных электротехнических систем определяет общий подход к развитию ТМ. Единый унифицированный подход к развитию теории мощности, усовершенствование методов и способов компенсации, разработка методологии по учету и оплате неактивных составляющих ПМ, методов создания оптимальных режимов потребления в электротехнической системе с несимметричными режимами – актуальная научно-практическая проблема, которая определила написание монографии.

СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ МОЩНОСТИ И МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ

Растущий интерес к определениям и интерпретациям понятий реактивной мощности, неактивным составляющим полной мощности (ПМ) в многофазных системах имеет не только научный интерес. Учитывая огромное количество электрической энергии, которое используется в мире, интерес к энергетическим свойствам электрических систем очевиден. Способность формирования энергетического сигнала в режиме реального времени развивающимися мощными электронными конверторами определяет растущее практическое значение ТМ. Дебаты по энергетическим свойствам ведутся более века, количество публикаций может быть оценено только примерно и превосходит не одну сотню [141].

1.1 Проблематика теории мощности

Для однофазной цепи термин "теория мощности" был введен *Fryze* в 1931г. [162], когда он предпринял попытку объяснения разницы между активной мощностью и *кажущейся* (полной) мощностью. Это был ответ на наблюдения *Steinmetz* [216], что полная мощность в цепях с электрической дугой выше, чем активная мощность. Кроме того, это было ответом на выводы *Budeanu* [124], что это различие может быть объяснено с точки зрения реактивной мощности и мощности искажения. Таким образом, первоначально предметом ТМ было объяснение разницы между активной и кажущейся мощностью. Развитие этого вопроса привело к формированию различных «школ» ТМ.

Теория мощности (как одно, так и многофазных систем), разрабатываемая до середины XX века *Lyon* [183], *Goodhue* [164], *Budeanu* [124] *Fryze* [162], *Quade* [193], *Buchholz* [123], *Depenbrock* [143] *Emanuel* [148], *Пуховым* [61], *Демирчаном* [10,11], *Лурье* [11] и многими другими учеными, сперва была ограничена чисто познавательными вопросами «почему?»

Когда компенсация в энергосистемах при несинусоидальных условиях стала

более актуальной, вопросы теории «почему?» были расширены вопросами практики «как?».

ТМ, разработанная *Shepherd* и *Zakikhani* [206], *Kusters* и *Moore* [176], *Emanuel* [148–150], *Czarnecki* [128–136], *Nabae* и *Akagi* [115–116], *Depenbrock* [143], *Tenti* [212], *Willems* [216, 217], *Милях* [55], *Шидловским* [110–114], *Кузнецовым* [42–45], *Маевским* [50] и многими другими учеными, включает в себя вопросы «как?» и вопросы «почему?». Наиболее полно и прозрачно вопросы «как?» и «почему?» ТМ исследованы для однофазной цепи с синусоидальными процессами. ТМ такой однофазной цепи является базовой для более сложных теорий [41, 141].

1.2 ТМ в однофазной цепи с синусоидальными процессами

Синусоидальные T – периодические процессы напряжения и тока ($\omega T = 2\pi$) в однофазной цепи источника с синусоидальным напряжением и линейным пассивным двухполюсником (рис. 1.1)

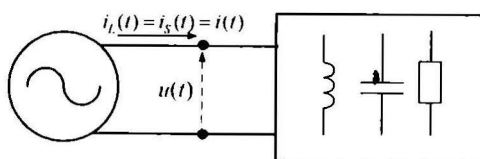


Рисунок 1.1 – Однофазная схема с линейной нагрузкой

$$u(t) = \sqrt{2}U \cos \omega t, \quad i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \varphi) \quad (1.1)$$

заданы действующими значениями (д.з)

$$U = \|u\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T u^2(t) dt} \quad I = \|i\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T i^2(t) dt} \quad (1.2)$$

и разностью начальных фаз φ

Поток энергии от источника напряжения подается в нагрузку со скоростью равной мгновенной мощности

$$\frac{dW}{dt} = p(t) = u(t)i(t) = 2UI \cos \omega t \cdot \cos(\omega t - \varphi). \quad (1.3)$$

Мгновенная мощность (ММ) представляется суммой

$$p(t) = \bar{p} + \tilde{p}(t) = \underbrace{UI \cos \varphi}_{P} + \underbrace{UI \cos(2\omega t - \varphi)}_{\tilde{S}} \quad (1.4)$$

постоянной составляющей и переменной составляющей:

активной (средней за период T) мощностью P

$$P = \bar{p} = \underbrace{UI \cos \varphi}_S \quad \bar{p} = \frac{1}{T} \int_T i(t)u(t)dt, \quad (1.5)$$

пульсирующей мощностью

$$\tilde{p}(t) = p(t) - \bar{p} = \underbrace{UI \cos(2\omega t - \varphi)}_{\tilde{S}} \quad (1.6)$$

Произведение д.в. тока и напряжения определяет кажущуюся (полную) мощность

$$S = U I \quad (1.7)$$

При несовпадении начальных фаз тока и напряжения ПЭ – двунаправленный (осциллирует), так как амплитуда пульсаций превосходит активную мощность ($\varphi \neq 0 \Rightarrow S \geq P$). Активная мощность характеризует необратимую передачу электроэнергии.

Для синусоидального процесса тока справедливо разложение

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \varphi) = \underbrace{\sqrt{2}I \cos \varphi \cdot \cos \omega t}_{i_a(t)} + \underbrace{\sqrt{2}I \sin \varphi \cdot \sin \omega t}_{i_r(t)}$$

Компоненты разложения тока

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) \quad (1.8)$$

определяют активный и реактивный токи:

$$i_a(t) = \sqrt{2} \underbrace{I \cos \varphi}_{I_a} \cdot \cos \omega t = \sqrt{2} I_a \cos \omega t \quad I_a = I \cos \varphi \quad (1.9)$$

$$i_r(t) = \sqrt{2} \underbrace{I \sin \varphi}_{I_r} \cdot \sin \omega t = \sqrt{2} I_r \cos(\omega t - \pi/2), \quad I_r = I \sin \varphi \quad (1.10)$$

Ортогональность этих токов

$$(i_a, i_r) = \int_T i_a(t) \cdot i_r(t) dt = 0$$

определяет квадратичное разложение тока (треугольник тока)

$$\|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_r\|^2 \quad I^2 = I_a^2 + I_r^2 \quad (1.11)$$

которое характеризует состав потерь на 1 Ом и дает уравнение мощностей (треугольник мощностей)

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 \Leftrightarrow S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1.12)$$

Квадратичные компоненты уравнения (1.12) равны

$$P = U \underbrace{I \cos \varphi}_{I_a} = U \cdot I_a, \quad Q = U \cdot \underbrace{I \sin \varphi}_{I_r} = U \cdot I_r \quad (1.13)$$

Реактивная мощность Q задает амплитуду двунаправленного потока энергии между источником и нагрузкой.

Разложению тока (1.8) соответствует разложение мгновенной мощности

$$p(t) = u \cdot (i_a + i_r) = \underbrace{u \cdot i_a}_{p_a(t)} + \underbrace{u \cdot i_r}_{p_r(t)} = p_a(t) + p_r(t) \quad (1.14)$$

и представление потока энергии суммой двух ПЭ:

1.) однонаправленным потоком со скоростью

$$p_a(t) = u(t) i_a(t) = \underbrace{U I_a}_P (1 - \cos 2\omega t) = P(1 - \cos 2\omega t),$$

который ассоциируется с активным током;

2.) двунаправленным потоком, ассоциированным с реактивным током

$$p_b(t) = u(t)i_r(t) = \underbrace{UI_r}_Q \sin 2\omega t = Q \sin 2\omega t \quad (1.15)$$

Передача энергии активной мощности $P = UI_a$ может быть реализована частью тока (*активным током*) $I_a = I \cos \varphi$ и с меньшими потерями $\|i_a\|^2 \leq \|i\|^2$

Введение понятия комплекса (фазора) напряжения $\dot{U} = Ue^{j\varphi_1}$ и комплекса тока $\dot{I} = Ie^{j\varphi_2}$ так, что $(\varphi = \varphi_2 - \varphi_1)$ упрощает анализ процессов и позволяет оп-ределить:

1.) эквивалентную комплексную проводимость нагрузки

$$\dot{Y} = \dot{I}/\dot{U} = \underbrace{(I/U)}_Y e^{-j(\varphi_2 - \varphi_1)} = Ye^{-j\varphi} = G - jB \quad (1.16)$$

2.) стандартную комплексную мощность и комплексную мощность пульса-ции

$$\dot{S} = \dot{U}\dot{I}^* = P + jQ \quad \dot{N} = \dot{U}\dot{I} = \dot{U}\dot{I}^* e^{j2\varphi} = \dot{S}e^{j2\varphi} \quad N \geq P \quad (1.17)$$

3.) разложение комплекса тока на комплекс активного и реактивного тока

$$\dot{I} = \dot{Y}\dot{U} = (G - jB)\dot{U} = \underbrace{G\dot{U}}_{\dot{I}_a} + \underbrace{(-jB\dot{U})}_{\dot{I}_r} = \dot{I}_a + \dot{I}_r \quad (1.18)$$

Разложения (1.18) и (1.8) эквивалентны. При этом

$$i_a(t) = \sqrt{2}\Re[e^{j\omega t} \dot{I}_a], \quad i_r(t) = \sqrt{2}\Re[e^{j\omega t} \dot{I}_r]$$

В терминах комплексов (1.18) скорость поставки энергии в нагрузку пред-ставляется комплексными мощностями (1.17)

$$\frac{dW}{dt} = p(t) = \Re e \left[\underbrace{\dot{U}\dot{I}^*}_S + \underbrace{\dot{U}\dot{I}}_N e^{j2\omega t} \right] \quad (1.19)$$

Эффективность использования источника питания определяется коэффи-циентом мощности, который может быть выражен в терминах мощностей, дей-

ствующих значений токовых компонент или эквивалентных параметров нагрузки

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_r^2}} = \frac{G}{\sqrt{G^2 + B^2}} = \cos \varphi \quad (1.20)$$

Шунтирующий конденсатор с реактивной проводимостью

$$B_c = \omega C = \frac{Q}{U^2} = \frac{I_r}{U} = -B \quad (1.21)$$

компенсирует реактивный ток суммарно индуктивной нагрузки, оставляя в цепи источника только активную компоненту тока $i_s(t) = i_a(t)$, перенаправляя реактивный ток $i_c(t) = i_r(t)$ в цепь шунтирующего конденсатора. Суммарная нагрузка после компенсации (нагрузка + конденсатор) со стороны источника видна как чисто активная нагрузка, которая дает единичный коэффициент мощности. Ток, поступающий в исходную нагрузку, присоединением конденсатора не изменяется $i_L(t) = i(t)$ и равен сумме $i_L(t) = i_s(t) + i_c(t)$.

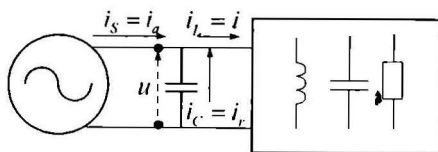


Рисунок 1.2 – Однофазная схема с шунтирующим конденсатором

Следует отметить, что:

активная и реактивная мощности ассоциированы с соответствующими ортогональными токами: активным и реактивным. Разложение тока (1.8) дает ясную геометрическую интерпретацию уравнения мощности (треугольник мощностей) (1.12);

активная мощность связана с безвозвратной (необратимой) передачей и потреблением электроэнергии нагрузкой;

наличие реактивной мощности указывает на неоптимальность передачи

электроэнергии, обусловленной *фазовым сдвигом* между током и напряжением;

пульсирующий характер ММ – внутренне присущее (ингерентное) свойство однофазной цепи, обусловленное синусоидальным напряжением. Энергия в нагрузку передается с переменной скоростью даже тогда, когда в нагрузке отсутствуют реактивные элементы;

Наличие реактивных элементов в нагрузке (при $Q \neq 0$) влияет на амплитуду колебания переменной составляющей ММ. Реактивная мощность ($Q \neq 0$) является одним из характеристических свойств двунаправленности ПЭ.

ТМ однофазной цепи с синусоидальными напряжениями и токами:

- (I) – обеспечивает физическую интерпретацию энергетических явлений в цепи;
- (II) – определяет технические параметры компонентов цепи, и обеспечивает основы для измерений энергетических величин, необходимых для оценки ее работы;
- (III) – выражает энергетические величины в терминах эквивалентных параметров нагрузки;
- (IV) – определяет коэффициент мощности и связывает его с параметрами нагрузки;
- (V) – содержит данные, необходимые для проектирования компенсатора.

Если первая особенность (I) имеет познавательные достоинства, то остальные имеют практическую направленность. Вторая особенность (II) позволяет проектировать систему, осуществлять ее надзор и энергетический учет. Третья (III) и четвертая (IV) особенности, позволяют улучшать производительности системы путем модификации параметров нагрузки. Последняя (V) позволяет улучшить его производительность путем компенсации. Использование комплексов дает адекватный математический аппарат дальнейшего развития ТМ для синусоидальных процессов в многофазных цепях ($m > 1$).

1.3 Интерпретация реактивной мощности

В однофазной цепи с синусоидальными процессами ниже следующие четыре условия эквивалентны:

- а.) реактивная мощность отлична от нуля, $Q \neq 0$;
- б.) существует фазовый сдвиг между напряжением и током. $\varphi \neq 0$;
- в.) коэффициент мощности меньше единицы, $\cos \varphi < 1$;
- г.) поток энергии двунаправленный ($W'(t) \leq 0$)/($W'(s) \geq 0$), $t \neq s$

Нарушение любого из этих четырех условий приведет к нарушению остальных.

В *трёхфазной* цепи вышеприведенные четыре условия неэквивалентны.

Отличие реактивной мощности от нуля ($Q \neq 0$) не является характеристическим свойством осцилляции ПЭ. Так, передача энергии от источника с *симметричным* синусоидальным напряжением в *симметричную* линейную нагрузку 3-фазной системы происходит с постоянной скоростью [29]. ММ вообще не имеет колебательной (пульсирующей) компоненты (при реактивной $Q \neq 0$, но симметричной нагрузке) - *режим уравновешен* [29] и характеризуется уравнением мощности (1.12). Реактивная мощность не обусловлена осцилляциями ПЭ, а осцилляции ПЭ не могут быть физическим смыслом реактивной мощности [140].

При *несимметричном* напряжении, но *симметричной* нагрузке:

- а.) отличие реактивной мощности от нуля и в.) наличие фазового сдвига между током и напряжением равносильные понятия $Q \neq 0 \Leftrightarrow \varphi \neq 0$

Однако, если нагрузка *несимметрична*, то, даже в синусоидальном режиме, *нельзя определить* фазовый сдвиг между вектором *м.з. полного* тока и вектором *м.з. напряжений* (т.к. эти два вектора не лежат в одной плоскости – они некомпланарны). Поэтому сделать фазовый сдвиг физическим смыслом реактивной мощности для многофазной цепи невозможно. Физический смысл реактивной мощности (если он существует) должен быть одинаковым вне зависимости от структуры и свойств цепи [138, 140].

1.4 Полная (кажущаяся) мощность

Понятие ПМ не имеет физического смысла и, даже для однофазной цепи, является расчётной величиной соглашения. Физическое явление, которое характеризуется ПМ, не существует [136]. Если активная мощность связана с безвозвратной передачей и потреблением электрической энергии, а реактивная мощность Q характеризует качество потребления, то ПМ связана со стоимостью выработки электроэнергии и доставки ее в нагрузку потребителя [141].

Для однофазной цепи ($m = 1$) определение ПМ ($S = U \cdot I$) как расчётной величины принято давно и однозначно. Для 3-фазных цепей определение ПМ не единственное. Вводились и были изучены такие определения ПМ [61, 123 159– 160, 148 – 151]:

- векторная (геометрическая) мощность

$$S_V = |\dot{S}_a + \dot{S}_b + \dot{S}_c| \quad (1.22)$$

- арифметическая мощность

$$S_A = |\dot{S}_a| + |\dot{S}_b| + |\dot{S}_c| \quad (1.23)$$

- мощность по *Buchholz'*)

$$S_B = I \cdot U = \underbrace{\sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}}_I \underbrace{\sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2}}_U, \quad (1.24)$$

где $\dot{S}_k = \dot{U}_k I_k^* = P_k + jQ_k$ – комплексная мощность k - фазы, $k \in \{a, b, c\}$;

I и U – действующие значения 3-фазных синусоидальных токов и напряжений

Можно показать, что мощности (1.22)– (1.24) всегда связаны неравенствами (рис. 1.3)

$$S_V \leq S_A \leq S_B \quad (1.25)$$

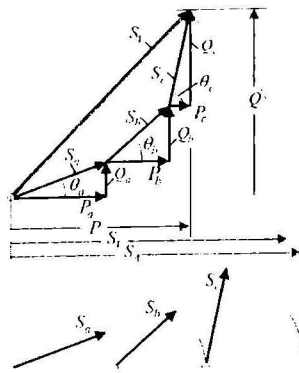


Рисунок 1.3 – Геометрическая интерпретация полной мощности:
 S_V – векторная и S_A – арифметическая мощность.

В синусоидальном режиме все эти величины равны, только если нагрузка симметрична. Для коэффициентов мощности $\lambda_X = P/S_X$ ($X \in \{A, B, V\}$) справедливы обратные неравенства:

$$\lambda_V \geq \lambda_A \geq \lambda_B \quad (1.26)$$

Таким образом, разница между активной и ПМ мощностью имеет экономическое значение и инициирует вопрос о том, как эта разница может быть снижена. Ответ на этот вопрос требует понимания и изучения свойств потока энергии в электрических системах во взаимосвязи трех подходов: познавательного, практического и экономического.

1.5 Развивающиеся концепции ТМ для многофазных систем

Только при очень кратком изложении можно считать, что ТМ сосредоточена на разнице между активной и ПМ. На самом деле, ТМ для многофазных систем должна содержать подробные ответы по пунктам (I)–(V), которые были представлены выше. История развития ТМ [169] для несинусоидальных процессов в многофазных цепях возможность использование ее для компенсации демонстрирует долгие усилия, направленные на разрешение этих вопросов, которые привели к созданию ряда «школ».

Развитие ТМ для многофазных систем с несинусоидальными процессами использовало два альтернативных метода анализа: *спектральный и временной*. Так, в оригинальной работе [61] по ТМ периодических *многофазных токов*, для определения реактивной мощности применен *частотный метод* и использовано понятие *векторного произведения*. Подобный подход был предложен в [177]. Развитию ТМ в *частотной области* и разложению трехфазного тока на физические компоненты посвящены работы *Czamecki* [127–132], которые применимы к 3–проводным цепям.

В работах [179–181] предложен оригинальный векторный спектральный подход к разложению полного тока (полной мощности) в пространстве $L_2^{(m)}(0, T)$ процессов m –мернозначных кривых. При $m = 3$ метод позволяет получать как известные, так и новые разложения тока в пространстве $L_2^{(3)}(0, T)$ требуемой детализацией неактивных составляющих ПМ [124, 181, 206].

Временной метод анализа использует два *подхода*. Первый подход основан на *интегральных характеристиках* энергетических процессов в электрических цепях. Второй подход непосредственно использует *мгновенные значения токов и напряжений* и *мгновенные энергетические характеристики* [91–94]. Направление, которое использует *интегральные* величины, связано с обобщением метода *Fryze* [162], который в однофазной цепи для T –периодических *несинусоидальных процессов* тока и напряжения определил *активный ток* следующей формулой

$$i_{af}(t) = (P / \|u\|^2) \cdot u(t) \quad (1.27)$$

где P – активная мощность и $\|u\|$ – д.з. напряжения (1.2).

При фиксированном напряжении активный ток *Fryze* в нагрузкуставляет энергию с активной мощностью полного тока с минимальными потерями. Можно проверить, что для синусоидальных процессов активный ток *Fryze* совпадает с рассмотренном выше активным током (1.9) однофазной цепи

$$i_{af}(t) \equiv i_a(t)$$

Исследования по теме неактивной мощности несинусоидальных процессов при $m \geq 1$ с использованием второго подхода были предприняты в Европе в семидесятих годах и привели к так называемой FBD (*Fryze-Buchholz-Depenbrock*) методике, которая подытожена создателем в [143].

Эта область исследования была пересмотрена созданием Акаги и Nabae [115, 116] теории реактивной мгновенной мощности (ММ) только для $m = 3$. В восьмидесятих годах эти исследования вывели проблему разложения ПМ к практической значимости и разработке так называемых активных фильтров [117]. Развитие этой теории привело к созданию школы так называемой «*pq-теории*» ММ [117–122, 191].

1.5.1 Обобщение разложения *Fryze* для m -фазной цепи

В 1950 *Buchholz* завершил свою работу [123] и расширил теорию *Fryze* [162]

на многофазные (m -фазные) цепи. Ниже приведено современное векторное изложение основных положений расширенного метода *Fryze* (без потери общности будем полагать, что $m = 3$). Энергетическое состояние (режим) 3-фазной цепи определяется процессами тока и напряжения – 3-мерными T -периодическими кривыми (м.з. тока и м.з. напряжения) 3-фазного сечения $\langle a, b, c \rangle$

$$u(t) = u(t + T), \quad i(t) = i(t + T) \quad (1.28)$$

В каждый момент времени м.з. напряжений и м.з. токов в фазах (рис. 1.4) рассматриваются как 3-мерные вектора (T -знак транспонирования)

$$u = u(t) = (u_a(t), u_b(t), u_c(t)) \quad i = i(t) = (i_a(t), i_b(t), i_c(t)) \quad (1.29)$$

Определены мгновенные скалярные квадраты этих 3-векторов

$$|u(t)|^2 = u(t)^T u(t) = u_a^2(t) + u_b^2(t) + u_c^2(t) \quad (1.30)$$

$$|i(t)|^2 = i(t)^T i(t) = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t) \quad (1.31)$$

а стандартная мгновенная мощность равна СП этих векторов

$$p(t) = \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}(t) = p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) \quad (1.32)$$

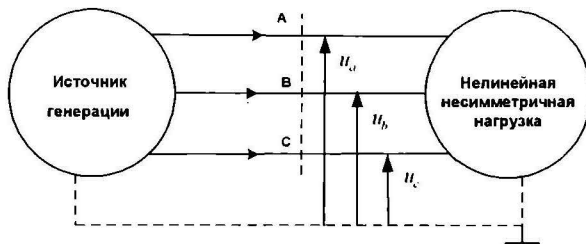


Рисунок 1.4 – Векторные процессы
3-фазных токов и напряжений в 3-фазном сечении

Интегральное среднее стандартной ММ определяет активную мощность

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} \mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}(t) dt = P \quad (1.33)$$

Активную (среднюю) мощность можно рассматривать как СП 3- кривых тока напряжения в пространстве $L_2^{(3)}(0, T)$ [40]

$$P = \langle \mathbf{i}, \mathbf{u} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \underbrace{\mathbf{i}(t)^T \mathbf{u}(t)}_{p(t)} dt \quad (1.34)$$

Интегрально – усредненные квадратичные величины

$$\bar{\mathbf{i}}^2 = \|\mathbf{i}\|^2 = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} \mathbf{i}(t)^T \mathbf{i}(t) dt \quad \bar{\mathbf{u}}^2 = \|\mathbf{u}\|^2 = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} \mathbf{u}(t)^T \mathbf{u}(t) dt \quad (1.35)$$

определяют – среднеквадратичные величины (с.к.в.) 3- кривых тока и напряжения (нормы кривых) в пространстве $L_2^{(3)}(0, T)$

$$\|u\| = \bar{u} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} u(t)^T u(t) dt} \quad \|i\| = \bar{i} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} i(t)^T i(t) dt} \quad (1.36)$$

Полная (кажущая) мощность согласно Buchholz [123] определена как произведение с.к.в. 3-кривой тока на с.к.в. 3-кривой напряжения

$$\|i(t)\| \cdot \|u(t)\| = S_B. \quad (1.37)$$

Неравенство Буняковского – Коши – Шварца [40] для пары 3-мерных процессов напряжения и токов дает неравенство для мощностей

$$|\underbrace{\langle i, u \rangle}_P| \leq \underbrace{\|i\| \cdot \|u\|}_{S_B} \quad P \leq S_B \quad (1.38)$$

Коэффициент мощности

$$\lambda = \frac{P}{S_B} = \frac{\langle i, u \rangle}{\bar{i} \cdot \bar{u}} \leq 1 \quad (1.39)$$

определен для средних величин и характеризует качество потребления с точки зрения потерь в трехфазном сечении $\langle a, b, c \rangle$ (нормированные потери на один Ом). Неотрицательная величина

$$Q_F = \sqrt{S_B^2 - P^2} \quad (1.40)$$

определят реактивную (точнее неактивную) мощность $Fryze$.

Если коэффициент мощности равен 1, или (что, эквивалентно) неактивная мощность $Fryze$ равна нулю, то потребление происходит без дополнительных потерь, обусловленных неактивным током

$$\lambda = 1 \Leftrightarrow Q_F = 0 \quad (1.41)$$

Для m - фазной цепи активный ток $Fryze$ определяется как m - мерная кривая

$$i_{uF}(t) = G \cdot u(t), \quad G = P / \|u\|^2 \quad (1.42)$$

Научное издание

СОКОЛ Евгений Иванович
СИРОТИН Юрий Александрович
ГРИБ Олег Герасимович
СЫЧЕНКО Виктор Григорьевич
БОСЫЙ Дмитрий Алексеевич
ГАПОП Дмитрий Апатольевич
ШВЕЦ Сергей Викторович
ИЕРУСАЛИМОВА Татьяна Сергеевна
ЛИСИЧЕНКО Роман Николаевич

Учет и компенсация реактивной мощности при несимметричных режимах работы систем электрообеспечения

Монография

Подп. к печати 02.06.17
Усл. печ. лист. 16,8

Формат 60х84 1/16.
Тираж 100 экз.

Способ печати – ризограф
Цена договорная.

Издатель: ФОП Панов А.М.
Свидетельство серии ДК №4847 от 06.02.2015 г
г. Харьков, ул. Жон Мироносиц 10, оф. 6,
тел. +38(057)714-06-74, +38(050)976-32-87
copy@vlavke.com.ua

Отпечатано в типографии ФОП Андрусев К.В.
61166, Харьков, ул. Серпова, 4
Свидетельство про государственную регистрацию
Серия В00 №966085 від 30.05.2003 р.
extraprint@mail.ua
тел. 063-993-62-73