

УДК 621

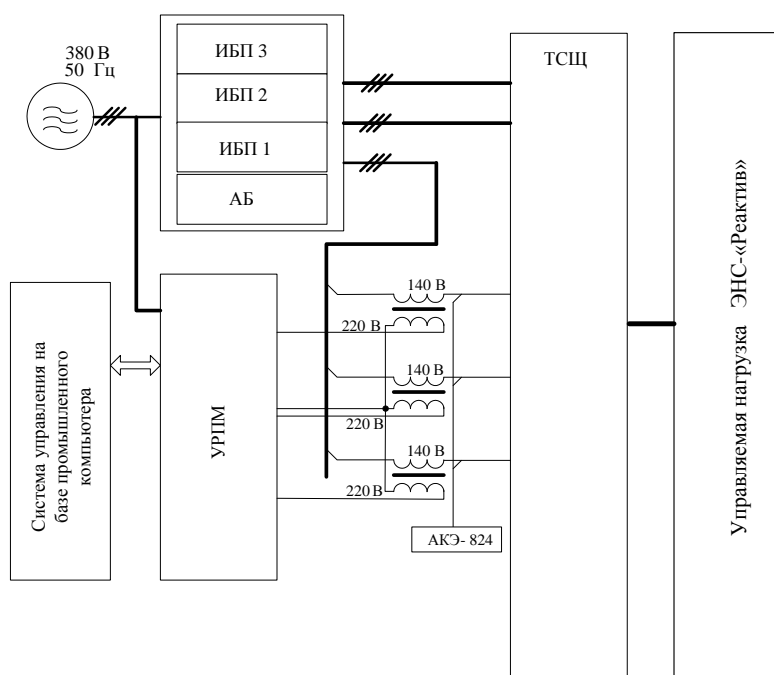
А.И. Чивенков<sup>1</sup>, Н.Н. Вихорев<sup>1</sup>, И.М. Трофимов<sup>1</sup>, А. Гедифа<sup>2</sup>**ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ SMART GRID**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Entreprise Bâtiment et travaux publics, Algérie Zone industrielle à M'Sila<sup>2</sup>

Приведены описание физической модели Smart grid, задачи и результаты исследований регулирования величин потоков мощности в распределённой сети низкого напряжения.

*Ключевые слова:* физическая модель, распределённая сеть, Smart grid, регулирование, потоки мощности.

Задачи оптимизации параметров потоков мощности в сетях электроснабжения рассматривались начиная с конца XIX века. На сегодняшний день они не стали менее актуальными [1]. Теоретические исследования фундаментальны, но всё подтверждается практикой, последовательностью экспериментов.

С целью проведения экспериментальных исследований регулирования потоков мощности в электрических сетях низкого напряжения в лаборатории ИНЭЛ НГТУ была создана физическая модель распределённой электрической сети (рис. 1).



**Рис. 1. Структурная схема физической модели распределённой сети (Smart grid)**

В целом физическая модель включает в себя три синхронизированных трёхфазных источника питания (ИБП-1 ИБП-2 ИБП-3) на базе однофазных многофункциональных автономных преобразователей МАП SIN HYBRID (9 шт.), производства ООО «МикроАРТ» г. Москва (рис. 2). Каждый преобразователь имеет генерируемую мощность 3 кВА.

Все преобразователи смонтированы в двух конструктивных стойках и генерируют полную мощность 27 кВА.

Цепь питания ИБП-1 с регулируемыми параметрами величины и фазового угла напряжения, обеспечиваемыми полупроводниковым преобразователем напряжения (устройство регулирования потоков мощности – УРПМ) с последовательно включенными в каждой фазе серийными трансформаторами (ВД). Цепи питания ИБП-2, ИБП-3 – нерегулируемые.

На рис. 2 представлена схема транзитного щита, посредством которого всё оборудование формируется в единый автоматизированный узел регулирования потоков мощности (АУРПМ). На рис. 3 приведён внешний вид лабораторного оборудования.

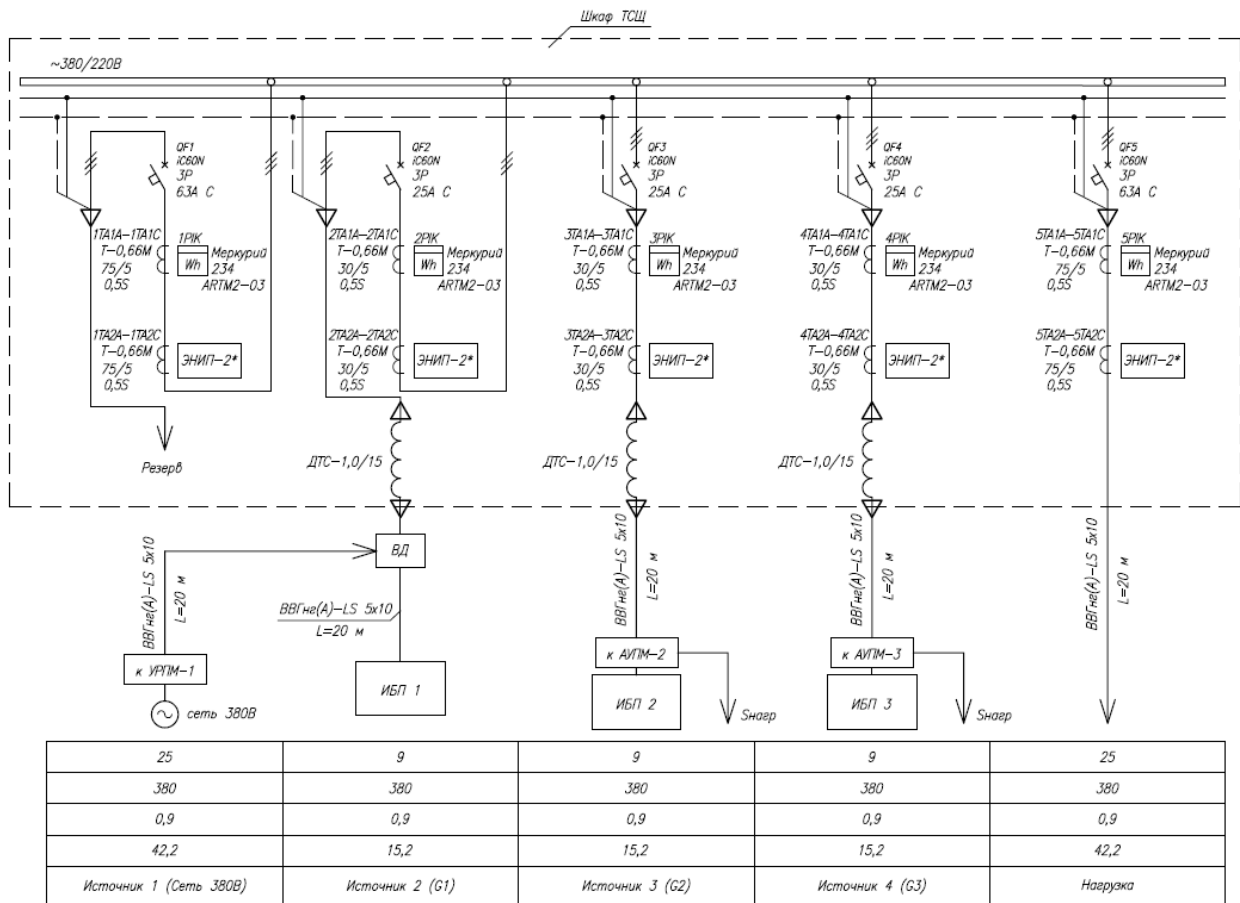


Рис. 2. Схема транзитного силового электрического щита



Рис. 3. Комплект оборудования физической модели Smart grid

Распределённые сети электроснабжения Smart grid предполагают автоматизированное регулирование потоков мощности в узлах нагрузки. Рассмотрим упрощённую схему узла на-

грузки с двумя подходящими линиями электропитания и одной отходящей линией нагрузки потребителей (рис. 4).

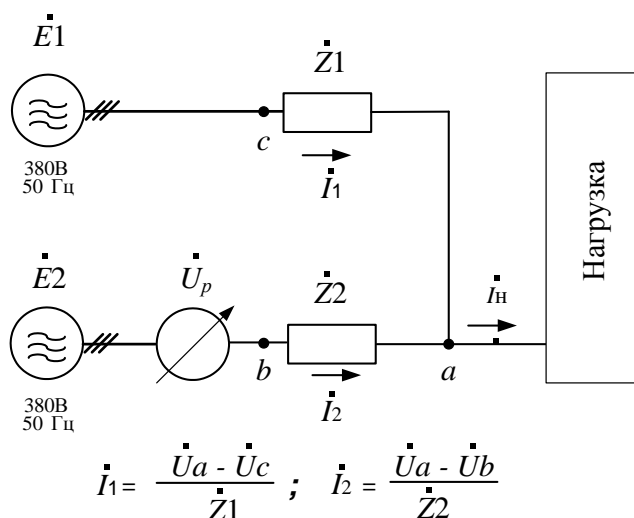


Рис. 4. Упрощенная схема распределённой сети

На рис. 4 имеются два источника питания, в первой линии электропитания не предусмотрена возможность регулирования величины и фазового угла напряжения, во второй линии установлено УРПМ, позволяющее изменять параметры напряжения в точках *a* и *b*. Комплексные сопротивления  $Z_1$  и  $Z_2$  отображают параметры сетевых дросселей (ДТС - 0,1/15 в соответствии с обозначениями на рис. 2).

При равенстве величин и фазовых углов напряжений в точках *a* и *b*, выполняем за счёт регулирования  $U_p$  (УРПМ), величина тока второй линии становится равной нулю, аналогично при условии равенства напряжений в точках *a* и *c* становится равным нулю ток второй линии, т.е. возможно сформировать «буферный режим» работы двух источников питания в сети переменного тока.

При исследовании соблюдены условия поддержания допустимого отклонения величины напряжения на нагрузке  $\pm 5\%$  от номинального значения посредством регулирования параметров напряжения УРПМ.

Перераспределение величин потоков мощности в распределительной сети с точками подключения дополнительных источников питания позволит выровнять величины потоков мощности, снизить потери перегруженных линий электроснабжения, повысить пропускную способность линий за счёт снижения реактивной составляющей мощности передаваемой электроэнергии, компенсировать дефицит электроэнергии потребителей.

### Последовательность и данные проведённых исследований

Для облегчения восприятия приняты названия основных цепей:

- цепь питания ИБП1 (УРПМ) – **резервная сеть**;
- цепь питания ИБП2 – **основная сеть**.

1. Включены ИБП1, ИБП2. Включена цепь питания нагрузки от основной сети QF3 ТСЩ. Включена цепь питания УРПМ. Выровнены напряжения в точках *a* и *b*.

Произведено подключение цепи питания резервной сети (УРПМ) к сети нагрузки.

Амплитудные значения напряжений: резервная сеть 329 В; основная сеть 324 В.

При данных параметрах напряжений соответствующие токи сетей составили: ток резервной сети 1,1 А; ток основной сети 15,5 А; ток нагрузки 16,1 А.

Результатом является буферный режим работы резервной сети с малым током.

Источником питания нагрузки является основная сеть (ИБП2).

2. При отключении QF3 основной сети, т.е. ток основной сети соответствует нулево-

му значению, резервная сеть, работающая в буферном режиме, принимает всю нагрузку на себя с зафиксированной задержкой по времени равной 10 мкс.

Значения зафиксированных токов: основная сеть 0 А; резервная сеть 16,1 А; ток нагрузки 16,1 А.

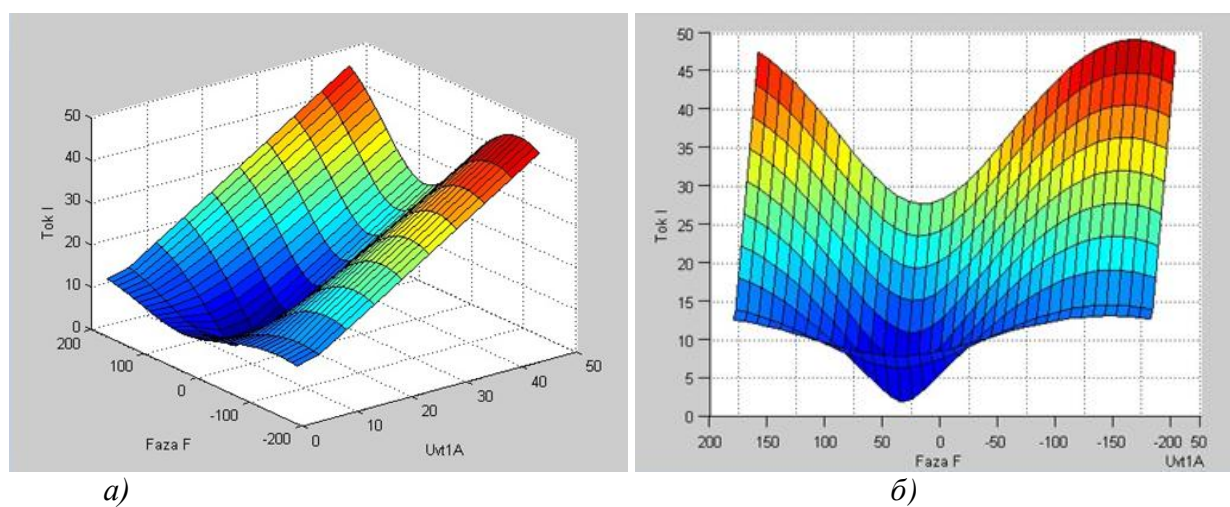
При включении QF3 зафиксирован обратный переход потока мощности с резервной сети на основную.

3. Регулирование величины и фазового угла напряжения резервной сети позволило управлять величинами потоков мощности в обеих линиях электропитания.

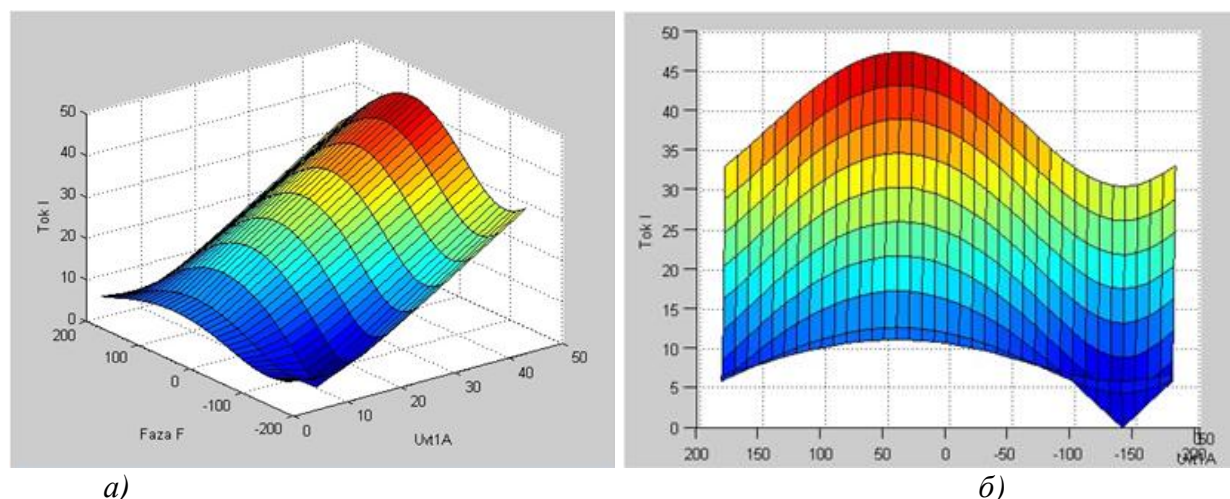
Полученные величины соотношений позволили выявить закономерные связи между параметрами напряжения УРПМ и величинами токов основной и резервной сетей.

Графические зависимости полученных результатов отображены на рисунках:

- амплитуды токов (А) основной сети рис. 5;
- амплитуды токов (А) резервной сети (УРПМ) рис. 6.



**Рис. 5. Зависимость величины амплитуды тока основной сети от параметров амплитуды напряжения серийного трансформатора УРПМ:**  
*a* – трёхмерное отображение; *б* – проекция зависимости от фазового угла (эл. градус)



**Рис. 6. Зависимость величины амплитуды тока резервной сети (УРПМ) от параметров амплитуды напряжения серийного трансформатора УРПМ:**  
*a* – трёхмерное отображение; *б* – проекция зависимости от фазового угла (эл. градус)

Результаты получены при кратковременных режимах работы до двукратных перегрузок по току при амплитуде номинального тока равной 22,4 А.

На изометрических представлениях в явном виде различаются «воронки» с малыми значениями токов, соответствующие выходу из режима питания нагрузки основной или резервной сети.

В данном примере УРПМ посредством сериесного трансформатора включен как дополнительная регулируемая ЕДС во второй линии электропитания. Данное решение позволяет применять подобные установки не только в сетях низкого напряжения, но и высокого. Область применения по напряжению определяется коэффициентом трансформации сериесного трансформатора.

Также полупроводниковый преобразователь УРПМ, выполненный как двойной преобразователь напряжения с промежуточным звеном постоянного тока, может быть включен непосредственно в разрыв линии электропитания низкого напряжения (0,4 кВ) без трансформатора. В этом случае он выполняет функции регулирования величины и фазового угла преобразуемого напряжения. Входные и выходные каскады переменного тока в таком варианте работают в режимах активного выпрямителя или инвертора в зависимости от направления передаваемой мощности. Подобное решение позволяет как генерировать, так и потреблять токи с заданными параметрами величины и фазового угла.

Рассмотрим аспект формирования напряжений на входе активного выпрямителя при заданных углах потребляемого тока  $\varphi_L$  (рис. 7).

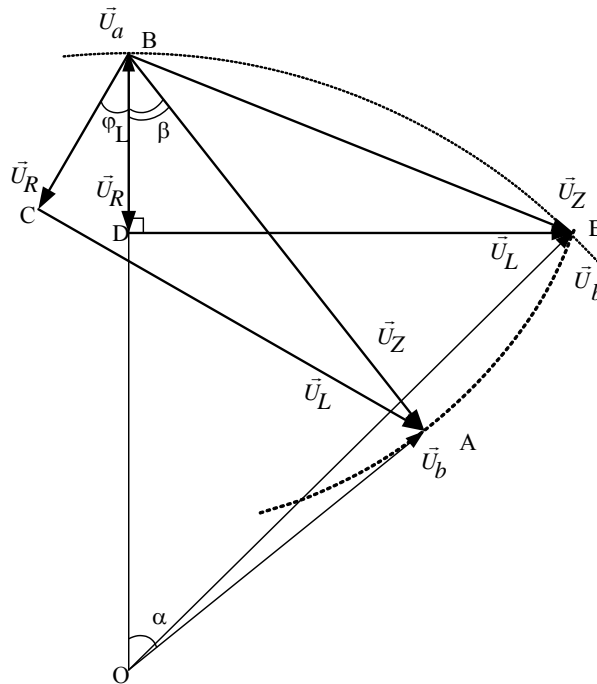


Рис. 7. Векторная диаграмма выходных напряжений УРПМ

Введем обозначения: действующее напряжение сети  $U_a$ ; действующее напряжение на входе преобразователя  $U_b$  для текущего значения потребляемого тока; падение напряжения на активном сопротивлении сетевого дросселя  $U_R$ ; падение напряжения на индуктивном сопротивлении сетевого дросселя  $U_L$ ; действующее значение суммарного падения напряжения на сетевом дросселе  $U_Z$ ; ток реактора (потребления от резервной сети)  $i_S$ ; заданный фазовый угол  $\varphi_L$  потребляемого тока; фазовый угол  $\alpha$  между векторами напряжений  $U_a$  и  $U_b$ .

На рис. 7 приведены диаграммы напряжений режима работы преобразователя при потреблении из сети тока с заданной величиной и фазовым углом.

Рассмотрим треугольник  $BDE$  на рис. 7. Параметры векторов, составляющие стороны треугольника, определяют составляющие напряжений сетевого дросселя при максимальной величине потребляемого тока и заданной добротности дросселя. При повороте треугольника  $BDE$  на угол  $\varphi_L$  вершиной  $E$  описывается геометрическое место точек конца векторов дей-

ствующего напряжения на входе преобразователя  $U_b$ . Поскольку активные и индуктивные сопротивления сетевого дросселя при этом не меняются, то треугольник  $BDE$  равен треугольнику  $ABC$ , а геометрическим местом точек векторов  $U_b$  является дуга окружности. Треугольник  $BFK$  определяет параметры напряжений сетевого дросселя для заданного значения тока, потребляемого преобразователем УРПМ.

Для треугольника  $ABC$  на рис. 7 справедливо следующее выражение:

$$\angle ABC = \beta + \varphi_L. \quad (1)$$

Для треугольника  $ABC(BED)$  по теореме косинусов запишем:

$$\cos(\angle ABC) = \frac{U_a^2 + U_Z^2 - U_b^2}{2 \cdot U_a \cdot U_Z} = \frac{U_Z^2}{2 \cdot U_a \cdot U_Z} = \frac{U_Z}{2 \cdot U_a}; \quad (2)$$

$$\angle ABC = \arccos \frac{U_Z}{2 \cdot U_a} = \arccos \frac{I_S \cdot \sqrt{R^2 \cdot (1+Q^2)}}{2 \cdot U_a}, \quad (3)$$

где  $R$  и  $Q$  активное сопротивление и добротность реактора соответственно.

Подставим в выражение (3) параметр  $I_S$ :

$$I_S = \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot k_\phi^2 \cdot U_C}{3 \cdot R_H}, \quad (4)$$

где  $k_\phi$  – коэффициент формы кривой переменного напряжения (тока);  $k$  – коэффициент кратности напряжения на конденсаторе промежуточного звена постоянного тока УРПМ по отношению к амплитуде напряжения питающей сети. Для синусоидального напряжения (тока)  $k_\phi = 1,11$ . Коэффициент кратности напряжения на конденсаторах принимает значения  $1,13 \leq k \leq 1,45$  исходя из диапазона напряжения на емкостном накопителе 350÷450 В [2].

Тогда выражение (3) принимает вид:

$$\angle ABC = \arccos \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot k_\phi^2 \cdot U_C \cdot \sqrt{R^2 \cdot (1+Q^2)}}{2 \cdot 3 \cdot U_a \cdot R_H} = \arccos \frac{k^2 \cdot k_\phi^2 \cdot \sqrt{R^2 \cdot (1+Q^2)}}{3 \cdot R_H}. \quad (5)$$

Введем понятие постоянной преобразователя:

$$C_{\text{ПР}} = \frac{k^2 \cdot k_\phi^2 \cdot \sqrt{R^2 \cdot (1+Q^2)}}{3 \cdot R_H}. \quad (6)$$

Запишем выражение (1) для угла  $\beta$  и подставим  $\angle ABC$  из (2). Тогда оно принимает вид:

$$\beta = \arccos(C_{\text{ПР}}) - \varphi_L. \quad (7)$$

Для треугольника  $OAB$  по теореме синусов справедливо следующее равенство:

$$\frac{U_b}{\sin \beta} = \frac{U_Z}{\sin \alpha} = \frac{U_a}{\sin(\pi - (\alpha + \beta))}, \quad (8)$$

$$\text{где } U_Z = I_S \cdot \sqrt{R^2 \cdot (1+Q^2)} = \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot k_\phi^2 \cdot U_C}{3 \cdot R_H} \cdot \sqrt{R^2 \cdot (1+Q^2)} =$$

$$= \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot k \cdot k_\phi^2 \cdot U_C \cdot U_{a \max}}{2 \cdot 3 \cdot R_H \cdot U_{a \max}} \cdot \sqrt{R^2 \cdot (1+Q^2)} = \frac{4 \cdot k^2 \cdot k_\phi^2 \cdot U_a}{3 \cdot R_H} \cdot \sqrt{R^2 \cdot (1+Q^2)} =$$

$$= 4 \cdot C_{\text{ПР}} \cdot U_a. \quad (9)$$

Из равенства (8) выразим угол  $\alpha$ :

$$\frac{U_Z}{\sin \alpha} = \frac{U_a}{\sin(\pi - (\alpha + \beta))}. \quad (10)$$

Подставим выражение (9) и используя тригонометрические формулы:

$$\frac{4 \cdot C_{\text{ПР}} \cdot U_S}{\sin \alpha} = \frac{U_a}{\sin(\alpha + \beta)}; \quad (11)$$

$$\frac{4 \cdot C_{\text{ПР}}}{\sin \alpha} = \frac{1}{\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta}; \quad (12)$$

$$\frac{4 \cdot C_{\text{ПР}}}{\sin \alpha} = \frac{1}{\sin \alpha \cdot (\cos \beta + \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot \sin \beta)}; \quad (13)$$

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{1 - 4 \cdot C_{\text{ПР}} \cdot \cos \beta}{4 \cdot C_{\text{ПР}} \cdot \sin \beta}. \quad (14)$$

Отсюда  $\alpha$ :

$$\alpha = \operatorname{arccotg} \left( \frac{1 - 4 \cdot C_{\text{ПР}} \cdot \cos(\arccos(C_{\text{ПР}}) - \varphi_L)}{4 \cdot C_{\text{ПР}} \cdot \sin(\arccos(C_{\text{ПР}}) - \varphi_L)} \right). \quad (15)$$

Из равенства (8) выразим действующее напряжение в точке подключения преобразователя:

$$U_b = U_Z \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = 4 \cdot C_{\text{ПР}} \cdot U_a \cdot \frac{\sin(\arccos(C_{\text{ПР}}) - \varphi_L)}{\sin \alpha}. \quad (16)$$

Результатом является выражение для определения параметров напряжения в точке  $b$  при заданном фазовом угле потребляемого тока УРПМ.

Параметрами задания могут являться также величина и фазовый угол напряжения  $U_Z$  на сетевом дросселе ( $Z_2$ , рис. 2) при его известной добротности.

Таким образом, может быть получена дополнительная функция компенсации реактивной мощности линий электропитания.

#### Библиографический список

1. Куро, Ж. Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении // Новости электротехники. – 2005. – №1. – С. 22–26.
2. Чивенков, А.И. Определение соотношений параметров универсальной системы регулирования переменного тока / А. Гедифа, А.И. Чивенков, А.Б. Лоскутов [и др.] // Промышленная энергетика. – 2016. – №7. – С. 19–24.

Дата поступления  
в редакцию 12.01.2017

A.I. Chivenkov<sup>1</sup>, N.N. Vikhorev<sup>1</sup>, I.M. Trofimov<sup>1</sup>, A. Gedifa<sup>2</sup>

#### PHYSICAL MODEL OF SMART GRID

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev<sup>1</sup>,  
Entreprise Bâtiment et travaux publics, Algérie Zone industrielle à M'Sila<sup>2</sup>

**Purpose:** The study of the physical model of distributed power low voltage "smart grid" in the regulation of power flow.

**Methodology/approach:** This article presents the results of experiments on the automation power flow regulation in the physical model of the a smart grid by changing the phase angle and amplitude of the voltage in the backup power line.

**Originality/value:** Redistribution of the flow amount of power in the distribution network with points of connection of additional power sources will allow to align the value of the power flow, reduce the loss of congested power lines, increase the capacity of the lines by reducing the reactive component of the power transmitted by the electric power, to compensate for the shortage of electricity consumers.

*Key words:* physical model, a distributed grid, Smart grid, regulation, flows of power.