

**Omorov Turatbek Tursunbekovich**, National Academy of  
Sciences of Kyrgyz Republic, corresponding-member,  
doctor of technical Sciences,  
**Takyrbashev Beishenaly Kasymalievich**, the chief of relay protection  
service and automation of JSC «Severelectro»,  
**Osmonova Rima Chinarbekovna**, National Academy of Science of the  
Kyrgyz Republic, research scientist.

**Synthesis of the managing director of the subsystem  
for optimization of the operating mode  
of the distributive electric network**

**Abstract:** Considerable losses of power in the three-phase distributive electric networks (DEN) with tension of 0,4 kV at asymmetrical operating modes cause need of search of solutions of this problem. In this regard new approach to optimization of asymmetrical operating modes of RES on the basis of automatic control of an electric power stream between network phases is offered. Process of control of switching is carried out by the system of automatic control consisting of the digital control of a subsystem and the object which is turning on group of the counters of the electric power with the switching elements installed at consumers of the electric power.

**Keywords:** three-phase network, losses of power, optimization, the control subsystem, the switching element.

**Оморов Туратбек Турсунбекович**, Национальная академия наук  
Кыргызской Республики, член-корреспондент,  
доктор технических наук,  
**Такырбашев Бейшеналы Касымалиевич**, ОАО «Северэлектро»,  
начальник службы релейной защиты и автоматики  
**Осмонова Рима Чынарбековна**, Национальная академия наук  
Кыргызской Республики, младший научный сотрудник

## **Синтез управляющей подсистемы для оптимизации режима работы распределительной электрической сети**

**Аннотация:** Значительные потери мощности в трехфазных распределительных электрических сетях (РЭС) с напряжением 0,4 кВ при несимметричных режимах работы обуславливают необходимость поиска путей решения этой проблемы. В связи с этим предлагается новый подход к оптимизации несимметричных режимов работы РЭС на основе автоматического управления потоком электроэнергии между фазами сети. Процесс управления переключением осуществляется системой автоматического управления, состоящей из цифровой управляющей подсистемы и объекта, включающего группу счетчиков электроэнергии с переключающими элементами, установленных у потребителей электроэнергии.

**Ключевые слова:** трехфазная сеть, потери мощности, оптимизация, управляющая подсистема, переключающий элемент.

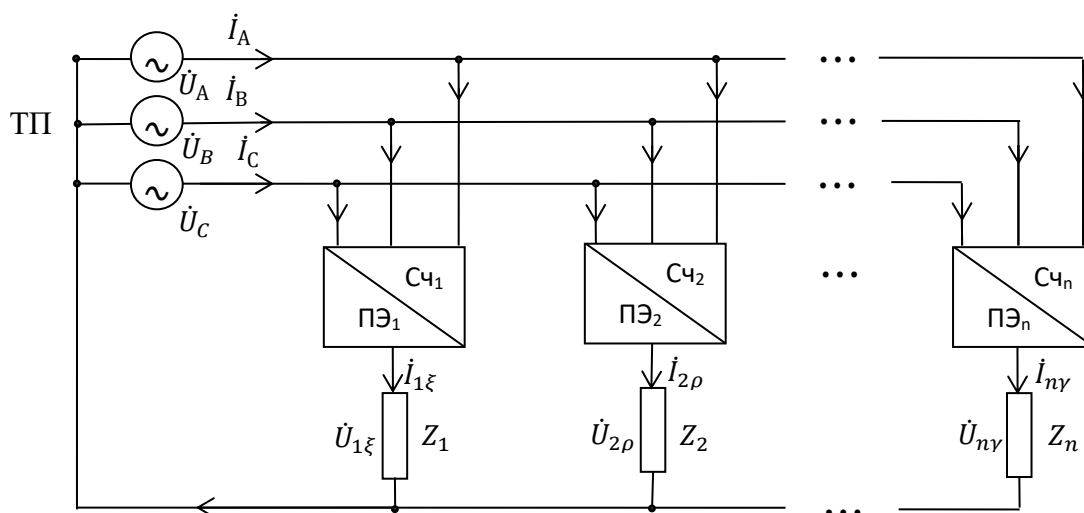
**Введение.** Как известно [1–3], такие возмущающие факторы (возмущения) как разбалансировка нагрузок и неравномерное их распределение по фазам сети являются причиной того, что РЭС, в основном, работают в несимметричных режимах. Такая разбалансировка фаз приводит к повышенным потерям активной мощности в сети и трансформаторных подстанциях (ТП), к выходу из строя бытовой техники и промышленных установок, а также к сокращению сроков эксплуатации функциональных элементов (ТП, линий электропередачи и др.) РЭС. Эффективное решение этой проблемы в режиме реального времени с использованием известных методов и средств [3–5] представляет определенные сложности.

В то же время в настоящее время реальной является оптимизация режимов работы трехфазных РЭС за счет перераспределения потоков электроэнергии между фазами сети. Практическая реализация такой оптимизации в настоящее время

является реальной задачей, так как в современных однофазных и трехфазных счетчиках (серии Альфа, Меркурий, МИР С-05, ADDAX Extra и др.) имеются электромагнитные реле с мощными контактами до 100А, которые можно использовать для переключения приемников с одной фазы на другую путем подачи соответствующих управляющих импульсов (сигналов). При этом алгоритм управления и формирование управляющих сигналов можно осуществить на основе создания системы автоматического управления (САУ), обеспечивающей желаемое распределение нагрузок в режиме реального времени, что можно реализовать посредством соответствующих переключений приемников с одной фазы на другую. При этом структура САУ включает концентратор данных (КД), управляющую подсистему и объект управления, в качестве которого выступает группа счетчиков электроэнергии ( $C_{ч_v}$ ), установленных у потребителей электроэнергии. Концентратор (КД) строится на основе микропроцессорного контроллера, который, в основном, располагается в трансформаторной подстанции. КД выполняет функции сбора данных со счетчиков  $C_{ч_v}$ , их хранение с последующей передачей в управляющую подсистему. Информационный обмен между КД и группой счетчиков электроэнергии осуществляется с помощью телекоммуникационных модулей (ТКМ), входящих в их состав. Управляющая подсистема на основе измерительных данных, полученных со счетчиков, по определенной процедуре (алгоритму) формирует управляющие воздействия, которые через ТКМ передаются на объект для реализации. Построенную таким образом САУ можно рассматривать как систему с переменной структурой, так как при этом будет обеспечиваться адаптация РЭС в условиях действий неконтролируемых случайных возмущений путем автоматической самонастройки структуры сети в режиме реального времени. В статье предлагается один из возможных подходов к

синтезу управляющей подсистемы, обеспечивающей оптимизацию режима работы трехфазной РЭС за счет желаемого распределения нагрузок между фазами сети.

**Постановка задачи синтеза.** Рассмотрим трехфазную распределительную сеть с напряжением 0,4 кВ, состоящую из питающей трансформаторной подстанции (ТП), группы из  $n$  счетчиков электроэнергии ( $C_{ч_v}$ ) ( $v = \overline{1, n}$ ), установленных у однофазных потребителей (абонентов), условная схема которой представлена на рис.1.



**Рис 1.** Схема трехфазной РЭС

На рис.1  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C, \dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  – комплексные токи и напряжения соответственно на входах фаз А, В, С, пронумерованных далее соответственно через индексную переменную  $\xi$  ( $\xi = \overline{1, 3}$ );  $Z_v$  – обозначение  $v$ -го приемника (нагрузки) потребителя ( $v = \overline{1, n}$ );  $\dot{I}_{v\xi}, \dot{U}_{v\xi}$  – комплексный ток и напряжение на нагрузке  $Z_v$ , подключенной к фазе с номером  $\xi$  (или  $\rho, \gamma$ );  $\text{ПЭ}_v$  – переключающий элемент счетчика  $C_{ч_v}$ . Далее через  $F = \{1, 2, 3\}$  обозначено дискретное множество, состоящее из номеров фаз.

Далее принимаются следующие предположения:

1. Счетчики электроэнергии ( $C_{\nu}$ ) имеют переключательные элементы ( $ПЭ_{\nu}$ ).
2. Действующие значения (модули) токов  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_{\nu\xi}$  и напряжений  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3, \dot{U}_{\nu\xi}$  ( $\nu = \overline{1, n}, \xi = \overline{1, 3}$ ), а также соответствующие активные и реактивные мощности измеряются счетчиками электроэнергии ( $C_{\nu}$ ), которые передаются посредством ТКМ концентратору (КД) и записываются в его блок памяти (БП).

Распределительная сеть рассматривается как многомерный объект, текущее состояние которого оценивается следующим набором векторов:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= [\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3], & \dot{U} &= [\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3], & (1) \\ \dot{I}_z &= [\dot{I}_{1\xi}, \dot{I}_{2\rho}, \dots, \dot{I}_{n\gamma}], & \dot{U}_z &= [\dot{U}_{1\xi}, \dot{U}_{2\rho}, \dots, \dot{U}_{n\gamma}], & \xi, \rho, \gamma \in F. \end{aligned}$$

При этом управляемыми переменными являются действующие значения (модули)  $I_1, I_2, I_3$  комплексных токов  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$  на входе сети. Управляющая подсистема должна обеспечивать поддержание этих переменных на желаемом уровне  $I_0$ , в качестве которого можно принять их среднюю величину:

$$I_0 = (I_1 + I_2 + I_3)/3.$$

В процессе функционирования РЭС за счет изменения нагрузок потребителей электроэнергии имеют место отклонения управляемых переменных от их желаемого значения  $I_0$ :

$$e_1 = I_1 - I_0, \quad e_2 = I_2 - I_0, \quad e_3 = I_3 - I_0,$$

которые представляют собой ошибки управления, значения которых определяют качество процессов регулирования. Поскольку чем меньше эти отклонения, тем выше уровень равномерности нагрузок, то для оптимизации режима работы сети можно использовать следующую критериальную (целевую) функцию:

$$E = \sum_{\xi=1}^3 |e_{\xi}|. \quad (2)$$

Основная функция управляющей подсистемы САУ заключается в формировании и минимизации целевой функции  $E$ . Эта процедура осуществляется так, чтобы минимум показателя  $E$  однозначно определял координату искомого приемника, который необходимо переключать с одной фазы на другую. По результатам такой оптимизации формируются управляющие воздействия  $u_{v\xi}$  на объект, посредством которых реализуются соответствующие переключения приемников. При этом целевая функция  $E = E(u_{v\xi})$ , а совокупность сигналов  $u_{v\xi}$  ( $v = \overline{1, n}$ ,  $\xi = \overline{1, 3}$ ) образует дискретное множество  $U = \{u_{v\xi}\}$ .

Задача состоит в синтезе цифровой управляющей подсистемы, обеспечивающей минимизацию критериальной функции  $E(u_{v\xi})$ .

**Решение задачи синтеза.** Решение сформулированной задачи включает следующие основные этапы:

1. Измерение действующих значений (модулей) компонентов комплексных векторов, представленных в (1), а также соответствующих активных и реактивных мощностей, потребляемых приемниками потребителей электроэнергии, и их передача в концентратор (КД).
2. Представление компонентов векторов  $\dot{I}$ ,  $\dot{U}$ ,  $\dot{I}_z$ ,  $\dot{U}_z$  в комплексной форме.
3. Идентификация переключаемых фаз сети.
4. Оценка целевой функции  $E(u_{v\xi})$  и ее минимизация.
5. Определение управляющего сигнала и его реализация на объекте управления.

*Представление переменных состояния сети в комплексной форме.* Счетчиками электроэнергии, установленными у абонентов сети ( $Сч_v$ ), измеряются лишь действующие значения токов  $I_{v\xi}$  и напряжений  $U_{v\xi}$  компонентов векторов  $\dot{I}_z$  и  $\dot{U}_z$ , а их вещественные и

мнимые части являются неизвестными величинами. Для их определения комплексные токи  $\dot{I}_{v\xi}$ , напряжения  $\dot{U}_{v\xi}$  и мощности  $\dot{P}_{v\xi}$  представим в следующей форме:

$$\dot{I}_{v\xi} = I_{v\xi}^B + jI_{v\xi}^M, \quad (3)$$

$$\dot{U}_{v\xi} = U_{v\xi}^B + jU_{v\xi}^M, \quad (4)$$

$$\dot{P}_{v\xi} = \dot{U}_{v\xi} \dot{I}_{v\xi}^* = p_{v\xi}^B + jp_{v\xi}^M, \quad v = \overline{1, n}, \quad \xi = \overline{1, 3},$$

где символы **в** и **м** обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимое число; действующие значения (модули) токов  $I_{v\xi}$  и напряжений  $U_{v\xi}$ , а также активные  $p_{v\xi}^B$  и реактивные  $p_{v\xi}^M$  мощности с учетом (3) и (4) удовлетворяют следующим соотношениям:

$$(I_{v\xi}^B)^2 + (I_{v\xi}^M)^2 = I_{v\xi}^2, \quad (U_{v\xi}^B)^2 + (U_{v\xi}^M)^2 = U_{v\xi}^2,$$

$$U_{v\xi}^B I_{v\xi}^B + U_{v\xi}^M I_{v\xi}^M = p_{v\xi}^B, \quad U_{v\xi}^M I_{v\xi}^B - U_{v\xi}^B I_{v\xi}^M = p_{v\xi}^M, \quad v = \overline{1, n}, \quad \xi = \overline{1, 3}. \quad (5)$$

Поскольку  $I_{v\xi}$ ,  $U_{v\xi}$ ,  $p_{v\xi}^B$ ,  $p_{v\xi}^M$  являются известными величинами, искомые переменные можно определить на основе решения систем алгебраических уравнений (5), которые можно решить, используя известные методы, в частности, численные алгоритмы [6]. Совокупность величин  $p_{v\xi}^B$  и  $p_{v\xi}^M$  составляет вектор  $P_z$ . Аналогичным образом в комплексной форме представляются и компоненты векторов  $\dot{I}$  и  $\dot{U}$ , определяющие состояния входов соответствующих фаз сети по данным трехфазного счетчика (Сч<sup>ТП</sup>), установленного в ТП. В состав этих данных входят также соответствующие активные и реактивные мощности, совокупность которых составляет вектор  $P$ .

*Идентификация переключаемых фаз сети.* Для этой цели необходимо найти максимальное  $e_{max}$  и минимальное  $e_{min}$  значения среди отклонений:  $e_{max} = \max\{e_1, e_2, e_3\}$ ,  $e_{min} = \min\{e_1, e_2, e_3\}$ .

Эти величины однозначно определяют искомую пару фаз сети, на которых имеется необходимость выполнения требуемых

переключений некоторого, пока не известного приемника. Очевидно, что необходимо переключать приемник с фазы, где достигается  $e_{max}$ , на фазу с наименьшим значением ошибки управления  $e_{min}$ . Для того, чтобы обеспечить ограниченное (минимальное) количество переключений приемников, эту операцию целесообразно осуществлять только тогда, когда выполняется следующее условие:

$$\frac{\Delta e_{max}}{I_0} > \delta, \quad (6)$$

где  $\Delta e_{max} = \max\{e_{max}, |e_{min}|\}$ ;  $\delta$  – малое положительное число, задающее максимально допустимый разбаланс фазных токов.

*Формирование целевой функции  $E$  и ее минимизация.* Для этой цели вначале необходимо определить величины действующих значений токов  $I_1, I_2, I_3$  на входе соответствующих фаз. В целях конкретизации задачи синтеза управляющей подсистемы далее без потери общности предположим, что

$$e_{max} = e_1, \quad e_{min} = e_2.$$

Необходимо формировать целевую функцию  $E$  так, чтобы ее минимальное значение однозначно идентифицировало координату переключаемого приемника. Рассмотрим процесс управления, который осуществляется в дискретные моменты времени  $t = t_\lambda = \lambda \Delta t$  ( $\lambda = 0, 1, 2, \dots$ ), где  $\Delta t$  – шаг дискретизации. Предположим, что в начальный момент времени  $t = t_0$  условие (6) не выполняется и количество приемников  $Z_\nu$ , подключенных к соответствующим фазам составляют  $n_a, n_b, n_c$  ( $n_a + n_b + n_c = n$ ). Далее введем индексные подмножества  $K_1, K_2$  и  $K_3$ , где  $K_\xi$  – дискретное множество, состоящее из индексов приемников потребителей ( $\nu$ ), подключенных к фазе с номером  $\xi$ . В данном случае комплексные фазные токи  $i_\xi^0$  на входе сети определяются на основе первого закона Кирхгофа [7]:



$$i_{\xi}^0 = \sum_{k \in K_{\xi}} i_k^0 = I_{\xi}^0 e^{j\alpha_{\xi}^0}, \quad \xi = \overline{1,3}. \quad (7)$$

где верхний индекс «0» означает, что соответствующие величины определены при  $t = t_0$ ;  $I_{\xi}^0$  – модули (действующие значения) комплексных токов  $i_{\xi}^0$  ( $\xi = \overline{1,3}$ ), которые измеряются трехфазным счетчиком электроэнергии (Сч<sup>ТП</sup>) на выходе ТП;  $\alpha_{\xi}^0$  – фазовые сдвиги соответствующих токов.

Теперь допустим, что в некоторый момент времени  $t = t_1$  ( $t_1 > t_0$ ) условие (6) выполняется, т.е. разбаланс фазных токов на входе сети выше заданного уровня. Тогда необходимо осуществлять операцию переключения некоторого, пока неизвестного, приемника  $Z_m$  с фазы А на фазу В. При этом прогнозные значения токов  $i_{\xi}$  на входах фаз с учетом (7) можно записать в виде:

$$i_1 = i_1^0 - i_{m1} = \sum_{\substack{k \in K_{\xi} \\ k \neq m}} i_k^0 = I_1 e^{j\alpha_1},$$

$$i_2 = i_2^0 + i_{m2} = i_{m2} + \sum_{k \in K_2} i_k^0 = I_2 e^{j\alpha_2},$$

$$i_3 = i_3^0 = \sum_{k \in K_3} i_k^0 = I_3 e^{j\alpha_3},$$

где  $I_1, I_2$  – прогнозные значения модулей комплексных токов  $i_1, i_2$  в предположении, что вероятным кандидатом на переключение является приемник  $Z_m$ , через который в момент времени  $t = t_0$  протекал ток  $i_{m1}$ ;  $\alpha_{\xi}$  – фазовые сдвиги токов  $i_{\xi}$ ; комплексный ток  $i_{m2}$  определяется с учетом нового фазового сдвига  $\alpha_{m2}$ , т.е.  $i_{m2} = I_{m2}^B + jI_{m2}^M = I_{m1}^0 e^{j\alpha_{m2}}$ .

Далее из вещественных и мнимых частей комплексных токов  $i_{m1}^0$  и  $i_{m2}$  составляем вектор параметров  $\mathbf{q}_m = [q_{m1}, q_{m2}, q_{m3}, q_{m4}] =$

$[I_{m1}^{B_0}, I_{m1}^{M_0}, I_{m2}^B, I_{m2}^M]$ , где  $m = \overline{1, n_a}$ . При этом критериальная функция  $E = E(q_m)$  определена на дискретном множестве  $Q = \{q_m\}$ . В результате задача оптимизации режима работы РЭС сводится к минимизации целевой функции  $E(q_m)$  на множестве  $Q$ :

$$\min_{q_m \in Q} E(q_m) = E(q_{m^*}) = E(q^*), \quad (8)$$

где  $q^* = q_{m^*}$  – оптимальное решение, которое определяет координату искомого приемника для переключения и требуемый управляющий сигнал  $u^* = u_{m^*}$  на объект. Решение дискретной экстремальной задачи (8) осуществляется путем сравнения возможных вариантов и при небольшом  $n_a$  не представляет особых трудностей.

Обобщенная структура САУ с цифровой управляющей подсистемой приведена на рис.2. Структура системы включает блок памяти (БП), программные модули цифровой обработки и оптимизации (МЦО) и формирования управляющих сигналов (МФУ). В БП хранятся данные, полученные со счетчиков электроэнергии (Сч<sub>v</sub>), установленных у абонентов сети и в трансформаторной подстанции (Сч<sup>ТП</sup>), а также данные, определяющие вещественные и мнимые части комплексных переменных, описывающих состояния приемников и выходов ТП.

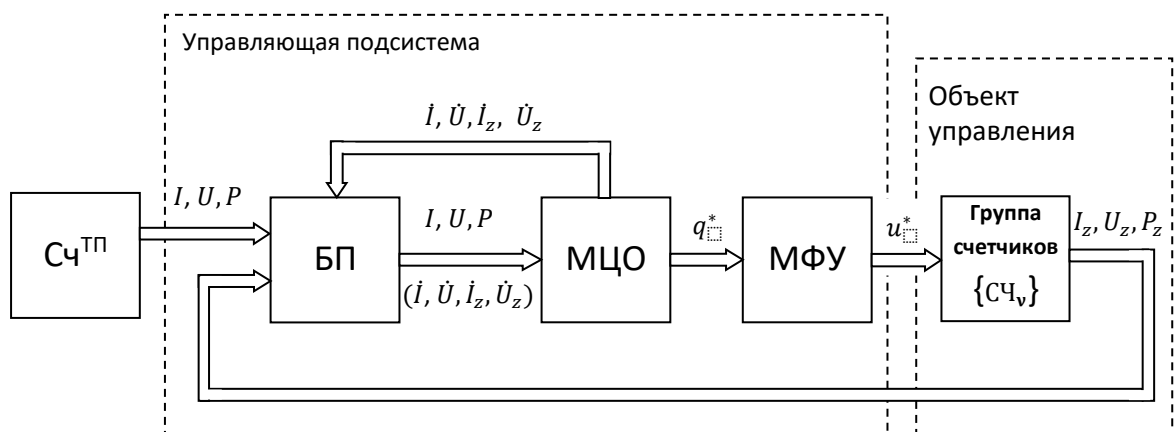


Рис.2. Структура цифровой САУ

Основными функциями МЦО являются: представление переменных сети в комплексной форме; идентификация пары фаз для переключения приемников; формирование критериальной функции  $E(q_m)$  и решение экстремальной задачи (8). По результатам процедуры оптимизации МФУ формирует управляющий сигнал  $u^*$ , который передается по каналам ТКМ на счетчик  $S_{ч_m}$  выбранного приемника и через его переключающий элемент ( $ПЭ_m$ ) реализует соответствующую операцию переключения. При этом структура сети и ток в нейтральном проводе изменяются во времени в зависимости от результатов переключений приемников. Фазные токи непрерывно измеряются и подаются на вход САУ. Поэтому изложенная выше вычислительная процедура циклически повторяется, что обеспечивает оптимальность синтезированной системы управления по критерию минимума целевой функции  $E$ , определяемой формулой (2). Техническая реализация управляющей подсистемы осуществляется на основе микропроцессорного контроллера.

**Выводы.** Предложен новый подход к решению проблемы разбалансировки нагрузок трехфазных распределительных сетей с напряжением 0,4 кВ. Синтезирована цифровая управляющая подсистема, обеспечивающая минимизацию уровня разбалансировки за счет автоматического управления потоками электроэнергии между фазами сети в режиме реального времени, что осуществляется путем переключения однофазных приемников с более нагруженной фазы на менее нагруженную. Качество процессов управления оценивается критериальной функцией, косвенно определяющей потери активной мощности в РЭС вследствие несимметричности их режимов работы. Практическая реализация синтезированной управляющей подсистемы дает возможность минимизировать потери в сети и трансформаторной подстанции, увеличить сроки службы функциональных элементов

РЭС, уменьшить аварийные ситуации в ней, а также повысить технико-экономические показатели распределительных компаний.

### Литература

1. Арутюнян А.Г. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях // Электричество. 2015. №10. с.55-58.
2. Пономаренко О.И., Холиддинов И.Х. Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения // Энергетик. 2015. №12. с.6-8.
3. Ф.Д.Косоухов, Н.В.Васильев, Филиппов А.О. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками // Электротехника. 2014. №6. с. 8-12.
4. Патент № 2490768 (РФ). И.В. Наумов, Д.А.Иванов, С.В. Подъячих, Гантулга Дамдинсурэн. Симметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом // Бюлл. № 23. 20.08.2013.
5. Патент № 2249286 (РФ). Г.А. Большанин Способ автоматизированного активного контроля уровня несимметрии напряжений и токов // Бюлл. №9. 27.03.2005.
6. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1975. -632с.
7. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В. Теоретические основы электротехники. Т.1. СПб.: Питер, 2009. 512 с.