

## **Алгоритмы функционирования цифрового регулятора информационной системы управления**

*Закиряев Кубанычбек Эсейович*

*Иссык-Кульский государственный университет им.К.Тыныстанова*

*Ведущий специалист отдела информатизации образования*

*Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема*

*Магистрант*

*Научный руководитель*

*Глаголев Владимир Александрович*

*Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема*

*к.г.н., доцент кафедры информационных систем, математики и правовой информатики*

### **Аннотация**

В данной работе рассматриваются алгоритмы функционирования цифрового регулятора информационной системы управления в составе автоматизированной системы учета и контроля электроэнергии, позволяющие оптимизировать режимы работы распределительной электрической сети.

**Ключевые слова:** информационная система управления, цифровой регулятор, алгоритм функционирования цифрового регулятора, симметрия, разбаланс мощностей.

### **Simulation of the algorithm of functioning of the digital controller**

*Zakiriaeov Kubanychbek Eseiovich*

*Issyk-Kul State University named after K. Tynystanov*

*Leading specialist of the department of informatization of education*

*Sholom-Aleichem Priamursky State University*

*Master student*

### **Abstract**

In this work, the operation algorithms of the necessary regulator of increased energy consumption in the overall power control and monitoring system are regulated, and individual modes of operation of the distribution network are regulated.

**Keywords:** information control system, digital controller, digital controller operation algorithm, symmetry, power imbalance.

## **1 Введение**

### **1.1 Актуальность**

Расширение функциональных возможностей и модернизация аппаратно-программного комплекса современных автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) путем внедрения новых функциональных блоков позволит увеличить эффективность работы электросети и их нагрузок. Для этого необходимо разработать, и внедрит в состав АСКУЭ новый блок - цифровой регулятор (ЦР) в составе информационной системы управления (ИСУ), назначение которого состоит в управлении процессами по симметрированию абонентских нагрузок. Такое управление позволит уменьшить технические потери, улучшить качество электроэнергии, подаваемый нагрузкам абонентов [1-2].

Несимметричность в электросети является следствием разбалансировки нагрузок и неравномерного их распределения по фазам трехфазной сети, т.е. неравномерного распределения мощностей абонентов по фазам распределительной сети. Возникает несимметрия фазных токов и напряжений, что приводит к существенным потерям активной мощности, поэтому целью такого управления является минимизация потерь электроэнергии. Следует отметить, что ЦР ИСУ будет организован на базе микроконтроллерного устройства с соответствующими аппаратно-программными средствами [3-4], функционирующий на основе специально разработанного программного обеспечения, реализующие соответствующие алгоритмы управления несимметрией нагрузок, подключенных к сети, является наиболее актуальной задачей современного состояния энергетики.

### **1.2 Обзор исследований**

В работах Т.Т.Оморов [2] предложил теорию по оптимизации режимов работы распределительной электрической сети в несимметричном режиме и общие алгоритмы по их управлению. Был предложен принцип симметрирования мощностей в распределительной сети с помощью специального устройства управления на базе микроконтроллерного устройства – цифрового регулятора (ЦР) в составе традиционных АСКУЭ. ЦР будет управлять исполнительным устройством, осуществляющим переключение мощностей абонентов сети из одной фазы на другую [2]. В то же время, изменяя состав программного обеспечения ЦР ИСУ можно будет управлять и другие параметры электросети для оптимальной работы. Выбранный в [3] микроконтроллер и сделанный на его основе ЦР является одним из ключевых элементов ИСУ. К важным составляющим относятся также аппаратно-программные средства разработки программного обеспечения (инструментарий программирования) [4]. Однако, не менее важными являются алгоритмы, по которым ЦР будет функционировать и управлять процессом оптимизации режимов работы сети.

### **1.3 Цель исследования**

Разработка на основе обобщенного алгоритма функционирования ЦР ИСУ [5], практических прикладных расчетов по симметрированию нагрузок абонентов и анализа состояния трехфазной сети более детальных алгоритмов

работы по оптимизации распределения абонентских нагрузок в распределительной сети.

#### 1.4 Материалы и методы

Основным функциональным элементом ИСУ является ЦР, место которого показано на рис.1.

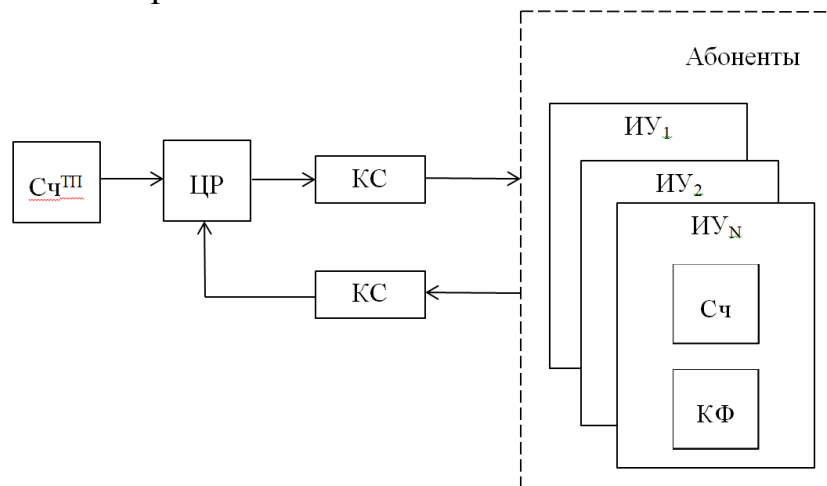


Рис.1. Структурная схема ИСУ и связи ЦР

Обозначение блоков:  $Сч^{III}$  – счетчик электроэнергии в трансформаторной подстанции; ЦР – цифровой регулятор; КС – канал связи; ИУ – исполнительное устройство, в составе которого имеется Сч – счетчик электроэнергии абонента и КФ – коммутатор фаз.

ЦР периодически последовательно проверяет состояние сети для корректировки работы ИУ, периодически отправляя необходимые управляющие команды в исполнительное устройство, одновременно контролируя изменения, которые происходят в абонентских нагрузках. Тем самым происходит корректировка работы электросети путем переключения абонентских нагрузок из одной фазы в другую, т.е. поддержание симметричной работы электросети [2, 5].

Правильное функционирование зависит от реализованных алгоритмов управления потреблением электроэнергии абонентами, распределенными между фазами распределительной сети. В работах Т.Т.Оморова [2, 6] предложены обобщенные алгоритмы оптимизации режимов работы распределительной сети путем перераспределения мощностей абонентских нагрузок между фазами электросети. Приведены методы определения состояния электросети в целом, по каждой фазе и принципы (методы) принятия решений по минимизации разбаланса мощностей между фазами. Поэтому, более детальные алгоритмы управления распределением мощностей в сети позволят сделать более качественную оптимизацию режимов работы всей сети.

Рассматривается трехфазная четырехпроводная распределительная сеть, с питающей трансформаторной подстанцией (ТП) и группой из  $n$  счетчиков электроэнергии  $\{Сч_{vk}\}$ , установленных у однофазных потребителей (рис.2). Здесь,  $k, v$  – переменные, обозначающие соответственно номера фаз А, В, С

( $k = \overline{1,3}$ ) и нагрузок абонентов сети ( $v = \overline{1,n}$ );  $\tilde{I}_k, \tilde{U}_k$  – синусоидальные мгновенные ток и напряжение на входе  $k$ -й фазы;  $Z_{vk}$  – обозначение нагрузки с координатой  $(v,k)$ ;  $\tilde{I}_{vk}, \tilde{U}_{vk}$  – мгновенные ток и напряжение на нагрузке  $Z_{vk}$ ;  $\tilde{J}$  – мгновенный ток в нейтральном проводе;  $\dot{P}_k$  – комплексная мощности  $k$ -ой фазы;  $\dot{P}_{vk}$  – комплексная мощность, потребляемая нагрузкой абонента с координатой  $(v,k)$ ;  $\text{КФТ}_{vk}$  – коммутатор фазных токов счетчика  $\text{СЧ}_{vk}$ .

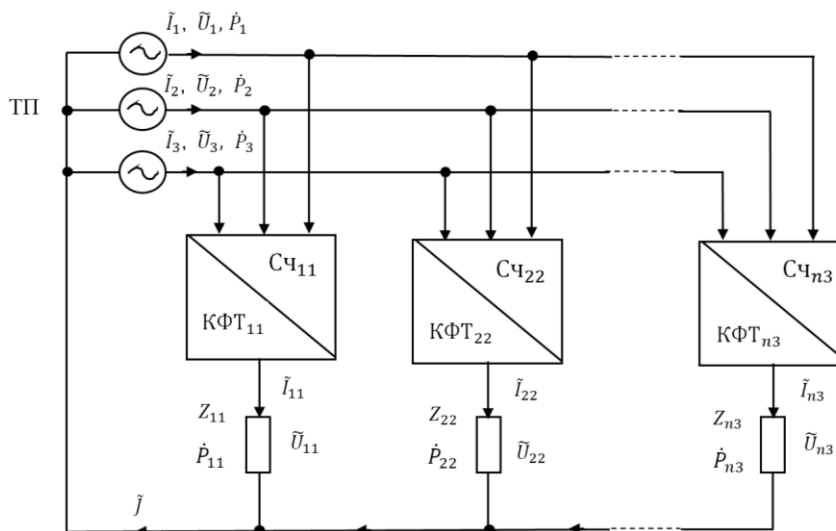


Рис.2. Условная схема распределенной сети с  $\text{СЧ}_{vk}$  и  $\text{КФТ}_{vk}$

Такая распределенная сеть может функционировать в режиме несимметрии токов и напряжений. В этом случае, коммутаторы фазных токов ( $\text{КФТ}_{vk}$ ) в составе электросчетчиков ( $\text{СЧ}_{vk}$ ) должны переключать нагрузки между фазами с более нагруженных к менее нагруженным. Для этого концентратор данных (КД) периодически опрашивает трехфазный счетчик электроэнергии ( $\text{СЧ}^{\text{м}}$ ) и группы счетчиков абонентов, подключенных к фазам А, В, С, и записывает в базу данных (БД) АСКУЭ полученные данные. На их основе ЦР вычисляет и формирует все промежуточные величины, необходимые для анализа и принятия решения по оптимизации распределения нагрузок. Все полученные данные также заносятся в БД ИСУ.

Решение сформулированной выше задачи управления включает следующие основные этапы:

1. Формирование исходных данных задачи управления.
2. Ситуационный анализ объекта.
3. Формирование промежуточных данных и принятия решений по минимизации разбаланса мощностей.
4. Формирование управляющих воздействий на объект.

Итак, согласно обобщенному алгоритму [5], на основе данных полученных со счетчиков электроэнергии и БД АСКУЭ предварительно вычислим следующие величины:

1. Активные  $p_{vk}$  и реактивные  $q_{vk}$  мощности, потребляемых нагрузками абонентов сети.

2. Активные  $p_k$  и реактивные  $q_k$  мощности, потребляемые соответствующими фазами на входе сети.

3. Среднюю мощность фаз  $P_0$ .

4. Ошибки управления  $e_1$ ,  $e_2$  и  $e_3$  от среднего значения мощностей фаз  $P_0$ .

Далее, на основе предложенных методов [6], сделаны компьютерное моделирование работы ЦР ИСУ прикладные расчеты, доказывающие, что предложенные алгоритмы управления мощностями являются правильными.

## 2 Алгоритмы управления работой ЦР

По результатам исследований и анализа было сформулировано обобщенный алгоритм функционирования ЦР, который является центральным элементом ИСУ и функционирование которой во многом характеризует работу ИСУ в целом. Моделирование работы ЦР по разработанному алгоритму показывает, что предложенные алгоритмы управления обеспечивают оптимизацию режима работы рассматриваемой РЭС.

По результатам моделирования алгоритма функционирования цифрового регулятора, изложенного [5], когда подробно рассматривалась ситуация при котором возникала разбаланс мощностей по фазам, удовлетворяющим условиям  $e_1 < 0$ ,  $e_2 > 0$ ,  $e_3 > 0$  и аналогичных расчетов для другой ситуации ( $e_1 > 0$ ,  $e_2 < 0$ ,  $e_3 > 0$ ), приведенных [5], были разработаны алгоритмы функционирования цифрового регулятора в составе информационной системы управления (ИСУ). Данные алгоритмы составлены на основе методов по оперативного симметрирования фазных нагрузок на входе распределительной сети. При этом последовательно решаются следующие подзадачи:

- 1) вычисление ошибок управления  $e_k$ ,  $k = \overline{1,3}$ ;
- 2) ситуационный анализ объекта (РЭС);
- 3) формирование упорядоченного вектора  $\hat{P}_k$  на основе сортировки исходных векторов мощностей  $P^k$ .
- 4) минимизация критериальной функции и формирование управляющих воздействий  $u^*$  на объект.

Для решения указанных подзадач вначале необходимо формировать исходные данные, необходимые для дальнейшего функционирования ЦР ИСУ. Предполагается, что предварительно путем дистанционного опроса счетчиков электроэнергии (Сч), входящих в состав АСКУЭ, необходимые данные записываются в базу данных концентратора данных (КД) информационной системы. Далее эти данные после предварительной обработки записываются в общую базу данных ИСУ, структура которой будет разработана в дальнейшем. Таким образом, в соответствии с методикой решения рассматриваемой функциональной задачи, будем предполагать, что в базе исходных данных имеются матрицы мощностей  $DP_k$ :

$$DP_k = \begin{bmatrix} P_{k1}, P_{k2}, \dots, P_{k,n_k} \\ Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{k,n_k} \end{bmatrix}, \quad k = \overline{1,3}.$$

Выходные данные головного трехфазного счетчика электроэнергии (Сч<sup>ТП</sup>) представлены с помощью матрицы DTP:

$$DTP = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & I_3 \\ U_1 & U_2 & U_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$$

На основе этих данных разработаны алгоритмы решения указанных выше подзадач, которые приведены на рис.1 – 4.

При этом в целях идентификации текущего состояния трехфазной сети вводится вектор  $l = [l_1, l_2, l_3]$ , компоненты которого определяются следующим образом:

$$l_k = \begin{cases} 1, & \text{если } e_k > 0, \\ 0, & \text{если } e_k = 0, \\ -1, & \text{если } e_k < 0. \end{cases}$$

Далее вектор  $l = [l_1, l_2, l_3]$  используется для определения структуры возможных фазных переключений и критериальных функций.

Возможные ситуации на объекте (РЭС) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Возможные ситуации на объекте (РЭС)

Возможные ситуации на объекте	Описание ситуации на объекте	Возможные переключения между фазами
Ситуация 1	$l = [1, -1, 0]$ $l = [1, 0, -1]$ $l = [-1, 1, 0]$ $l = [-1, 0, 1]$ $l = [0, 1, -1]$ $l = [0, -1, 1]$	$1 \rightarrow 2$ $1 \rightarrow 3$ $2 \rightarrow 1$ $3 \rightarrow 1$ $2 \rightarrow 3$ $3 \rightarrow 2$
Ситуация 2	$l = [1, 1, -1]$ $l = [1, -1, 1]$ $l = [-1, 1, 1]$	$1 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 3$ $1 \rightarrow 2, 3 \rightarrow 2$ $2 \rightarrow 1, 3 \rightarrow 1$
Ситуация 3	$l = [1, -1, -1]$ $l = [-1, 1, -1]$ $l = [-1, -1, 1]$	$1 \rightarrow 2, 1 \rightarrow 3$ $2 \rightarrow 1, 2 \rightarrow 3$ $3 \rightarrow 1, 3 \rightarrow 2$

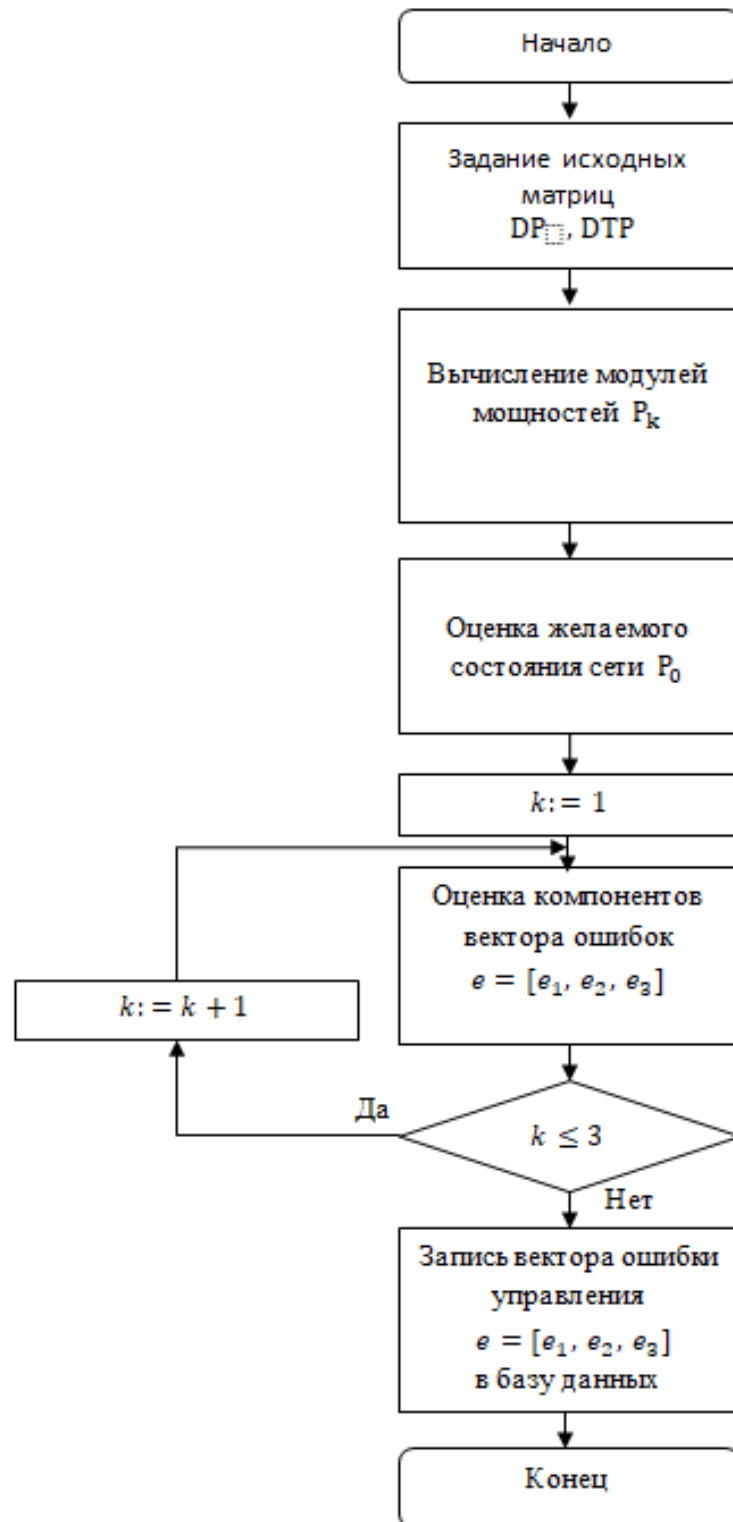


Рис.1. Алгоритм формирования вектора управления  $e = [e_1, e_2, e_3]$

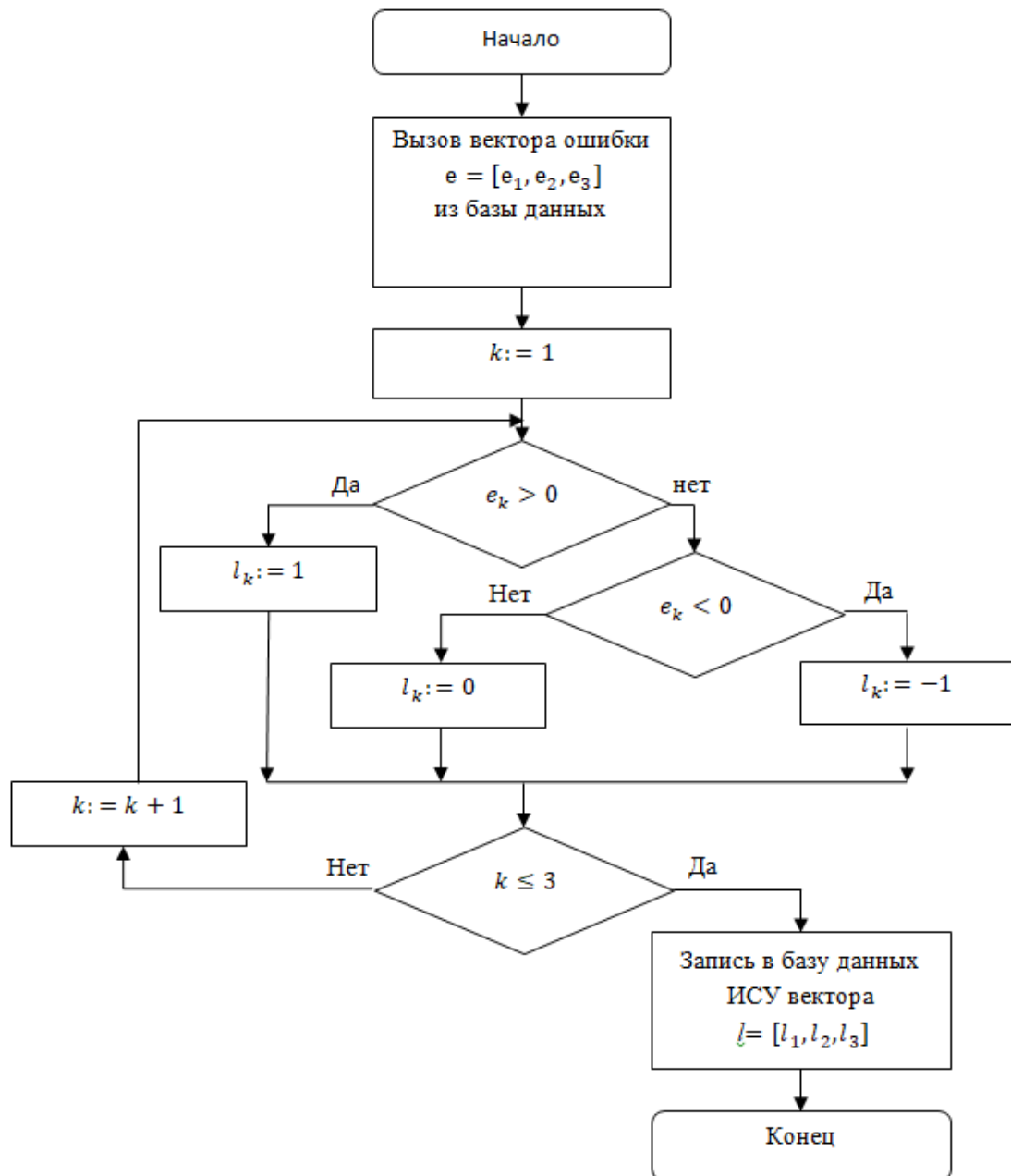


Рис.2. Алгоритм ситуационного анализа объекта



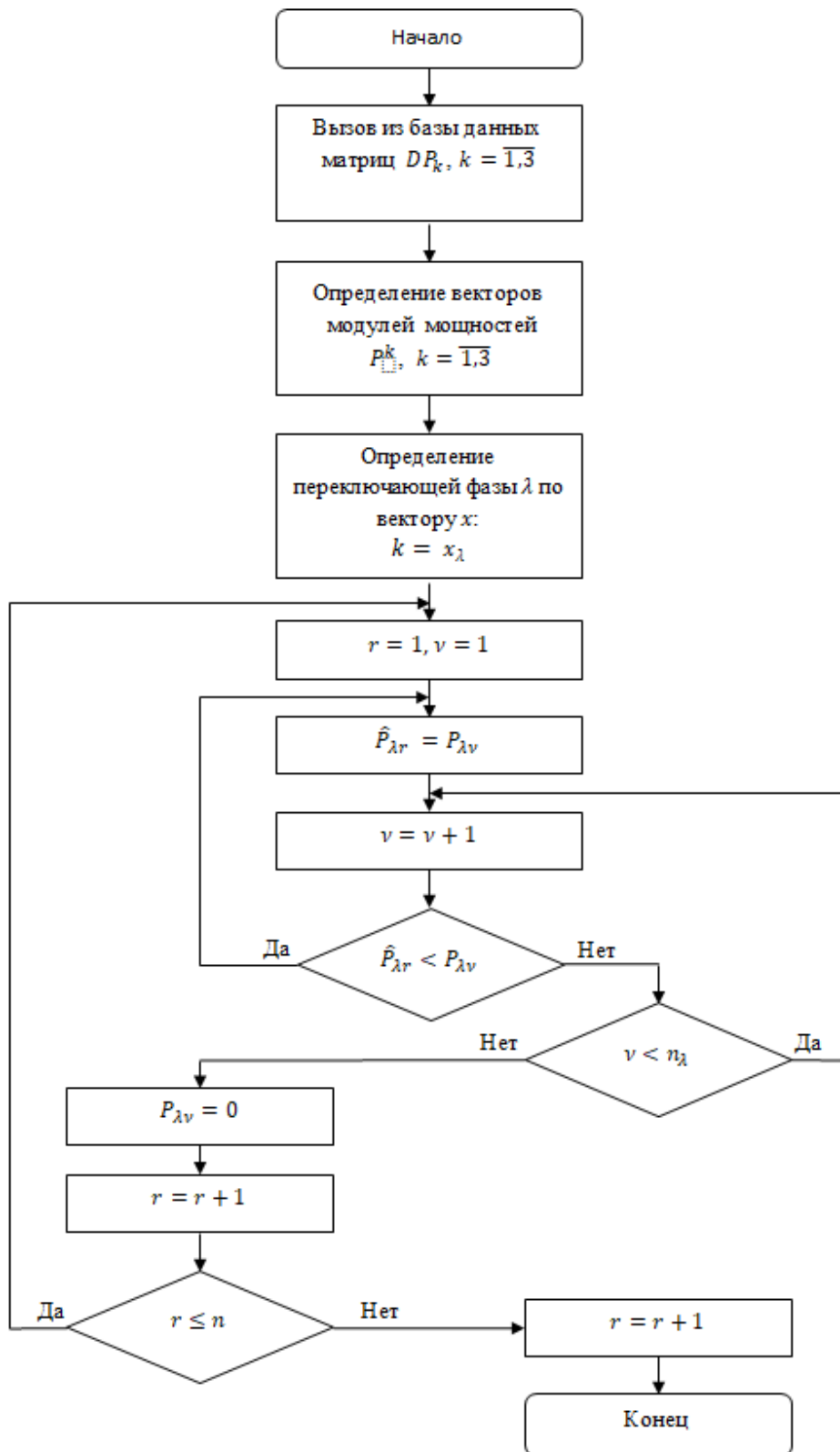


Рис.3. Алгоритм построения упорядоченного вектора  $\hat{P}_k$

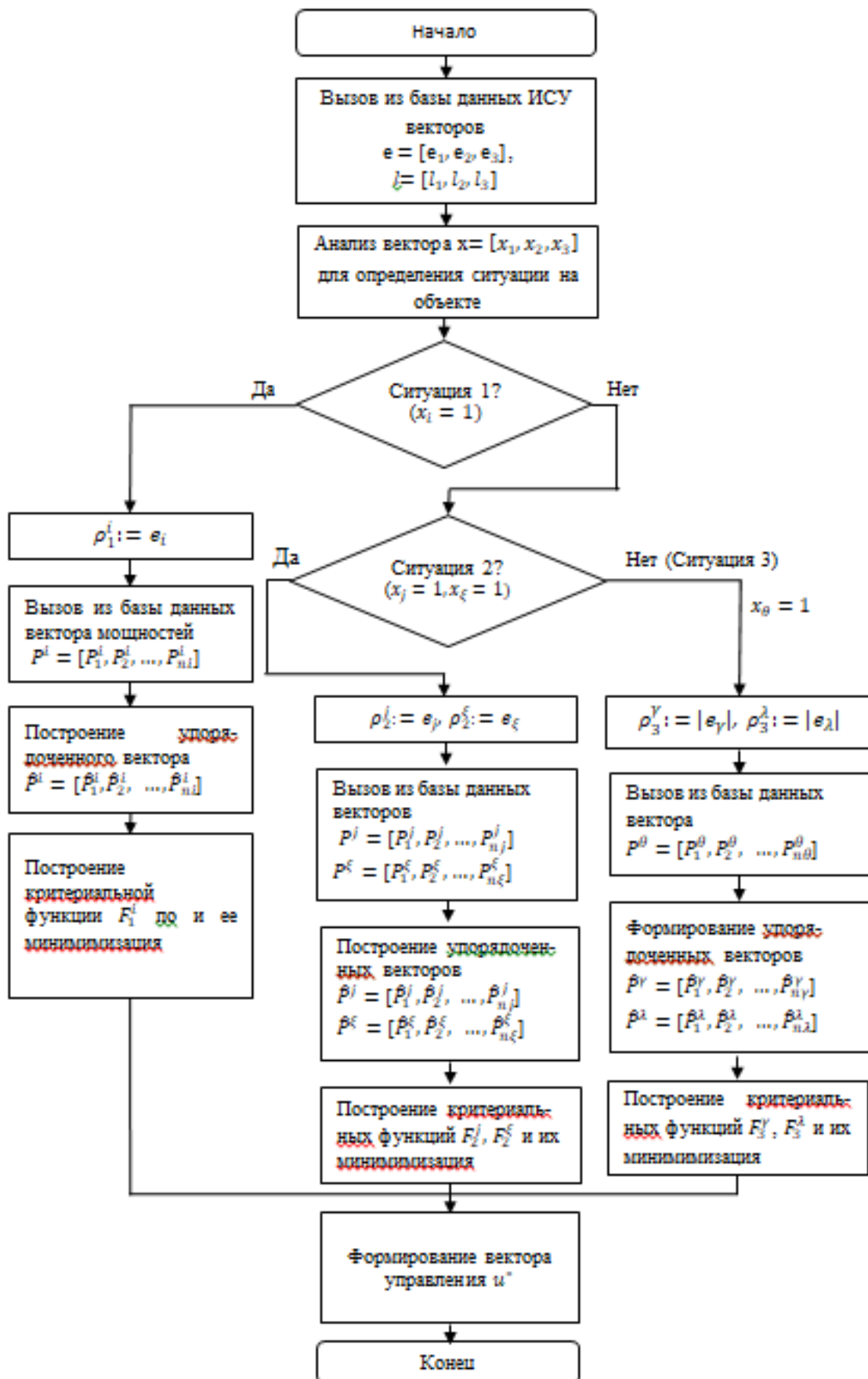


Рис. 4. Алгоритм выработки управляющих сигналов  $u^*$  на объект

### 3 Анализ ситуаций и прикладные расчеты

Для оценки правильного функционирования алгоритма ЦР ИСУ изложенного в [6], в работе [5], была смоделирована конкретная ситуация в распределении, возникшая в результате разбаланса мощностей по фазам, когда измерительные данные были взяты непосредственно с абонентских счетчиков электроэнергии. Дальнейшие исследования показали, что могут возникать и другие ситуации неравномерного распределения абонентов по фазам [2]. Возможные ситуации режимов работы сети, указанные в таблице 1 показывает, что их в общем, может возникнуть 3:

- Ситуация 1. Один из компонентов вектора  $e = [e_1, e_2, e_3]$  имеет положительное значение, другой - отрицательное, а третий - равен нулю (или близко к нулю).

- Ситуация 2. Две компоненты вектора невязки  $e$  положительны, а третья имеет отрицательное значение.

- Ситуация 3. Один из элементов вектора  $e$  положителен, а остальные отрицательны.

В целях иллюстрации методики решения задачи управления потерями электроэнергии в РЭС, предложенной в [2], рассмотрим следующую модельную задачу, исходные данные для которого были считаны головного трехфазного счетчика электроэнергии (Сч<sup>ТП</sup>) [5], которые приведены в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные

Наименование фаз	Показания трехфазного счетчика	
	Активная мощность, $p_k$ , кВт	Реактивная мощность, $q_k$ , кВт
Фаза 1 (k=1)	30,09	17,05
Фаза 2 (k=2)	2,37	1,47
Фаза 2 (k=3)	33,89	18,28

Считается, что полученные данные вначале записываются в базу данных концентратора АСКУЭ. После их преобразования они поступают в базу данных ИСУ, которые представляются в виде следующих матриц мощностей абонентов  $DA_k$ ,  $k = \overline{1,3}$ :

$$DA_1 = \begin{bmatrix} 1.03 & 1.31 & 1.22 & 1.20 & 1.22 & 1.20 & 1.23 & 0.95 \\ 0.68 & 0.64 & 0.76 & 0.58 & 0.76 & 0.83 & 1.16 & 0.88 \end{bmatrix},$$

$$DA_2 = \begin{bmatrix} 1.17 & 1.69 & 1.63 & 1.50 & 1.44 & 1.15 & 1.33 \\ 0.81 & 0.82 & 0.67 & 1.16 & 0.65 & 0.56 & 0.83 \end{bmatrix},$$

$$DA_3 = \begin{bmatrix} 1.15 & 1.87 & 1.96 & 1.15 & 1.50 & 1.20 & 1.20 & 1.33 & 1.08 & 1.50 \\ 0.52 & 0.61 & 0.70 & 0.52 & 0.74 & 0.75 & 0.82 & 0.43 & 0.43 & 0.66 \end{bmatrix}.$$

Данные, полученные от Сч<sup>ТП</sup> представим в виде следующих матриц  $DTP_k$ :

$$DTP = \begin{bmatrix} p_1, p_2, p_3 \\ q_1, q_2, q_3 \end{bmatrix},$$

где  $p_k, q_k$  – значения активной и реактивной мощности, потребляемой  $k$ -й фазой сети.

Предположим, что численные значения матрицы DM:

$$DTP = \begin{bmatrix} 30.09 & 2.37 & 33.89 \\ 17.05 & 1.47 & 18.29 \end{bmatrix}$$

На основе элементов матрицы DTP вычисляем модули соответствующих мощностей по формуле (2) [2], которые можно представить в виде следующего вектора:

$$P = [34.59 \ 2.79 \ 38.51]$$

При этом средняя мощность  $P_0$  на входе сети:

$$P_0 = (P_1 + P_2 + P_3)/3 = \frac{34,59 + 2,79 + 38,51}{3} = 25,30 \text{ кВт.}$$

По данным вектора  $P$  и средней мощности  $P_0$  вычисляем компоненты вектора ошибки управления  $e = [e_1, e_2, e_3]$ :

$$e = [9.29 \ -22.51 \ 13.22]$$

Ситуационный анализ объекта показал, что вектор состояния  $l = [l_1, l_2, l_3]$  имеет следующий вид:

$$l = [1 \ -1 \ 1],$$

т.е.  $l_1 = 1, l_2 = -1, l_3 = 1$ . Таким образом, на объекте наблюдается ситуация 2. При этом необходимо осуществить переключения фаз по схеме:  $1 \rightarrow 2$  и  $3 \rightarrow 2$ .

Теперь вычисляем модули мощностей абонентов фазы 1 и 3, которые представляются следующими векторами:

$$P^1 = [1.23 \ 1.46 \ 1.44 \ 1.33 \ 3.44 \ 1.42 \ 2.69 \ 1.29]$$

$$P^3 = [1.26 \ 1.97 \ 3.08 \ 1.26 \ 2.67 \ 1.42 \ 1.45 \ 3.40 \ 1.16 \ 1.64]$$

В результате выполнения алгоритма, представленного на рис.3, получаем следующие упорядоченные по убыванию вектора  $\hat{P}^k$ :

$$\hat{P}^1 = [3.44 \ 2.69 \ 1.46 \ 1.46 \ 1.44 \ 1.33 \ 1.42 \ 1.29 \ 1.23]$$

$$\hat{P}^3 = [3.40 \ 3.08 \ 2.67 \ 1.97 \ 1.64 \ 1.45 \ 1.42 \ 1.26 \ 1.26 \ 1.16]$$

На основе условия (4) [2] получаем следующие значения уровней рассогласований по мощностям фаз сети:

$$\rho_1 = e_1 = 9.29, \rho_3 = e_3 = 13.22.$$

Критериальные функции  $F_2^1$  и  $F_2^3$  для ситуации 2 на объекте задаются следующими формулами:

$$F_2^1(m) = |S_2^1(m) - \rho_1|,$$

$$F_2^3(\theta) = |S_2^3(\theta) - \rho_3|.$$

При этом функции  $S_2^1$  и  $S_2^3$  вычисляются по формулам:

$$S_2^1(m) = \sum_{l=1}^m \hat{P}_1^1,$$

$$S_2^3(\theta) = \sum_{\gamma=1}^{\theta} \hat{P}_\gamma^3.$$

В результате решения задачи минимизации указанных критериальных функций получаем следующие адреса (координаты) абонентов фаз 1 и 3, которые необходимо переключить на фазу В:

С фазы	На фазу	Номера абонентов			
фаза 1	фаза 2	5	7	2	6

3 фазы	На фазу	Номера абонентов				
фаза 3	фаза 2	8	3	5	2	1
						0

При этом вектор управления  $u^*$  имеет вид:

$$u^* = [u_1, u_2],$$

$$u_1 = [x, \beta_1^*] = [x, \hat{\beta}_1^1, \hat{\beta}_2^1, \dots, \hat{\beta}_{m^*}^1] = [1, -1, 1, 5, 7, 2, 6],$$

$$u_2 = [x, \beta_3^*] = [1, -1, 1, 8, 3, 5, 2, 10],$$

где  $m^* = 4$ ,  $\theta^* = 5$ .

Динамика компонентов вектора ошибок управления  $e = [e_1, e_2, e_3]$  в процессе минимизации критериальных функций  $F_2^1$  и  $F_2^3$  приведена на рис.5.

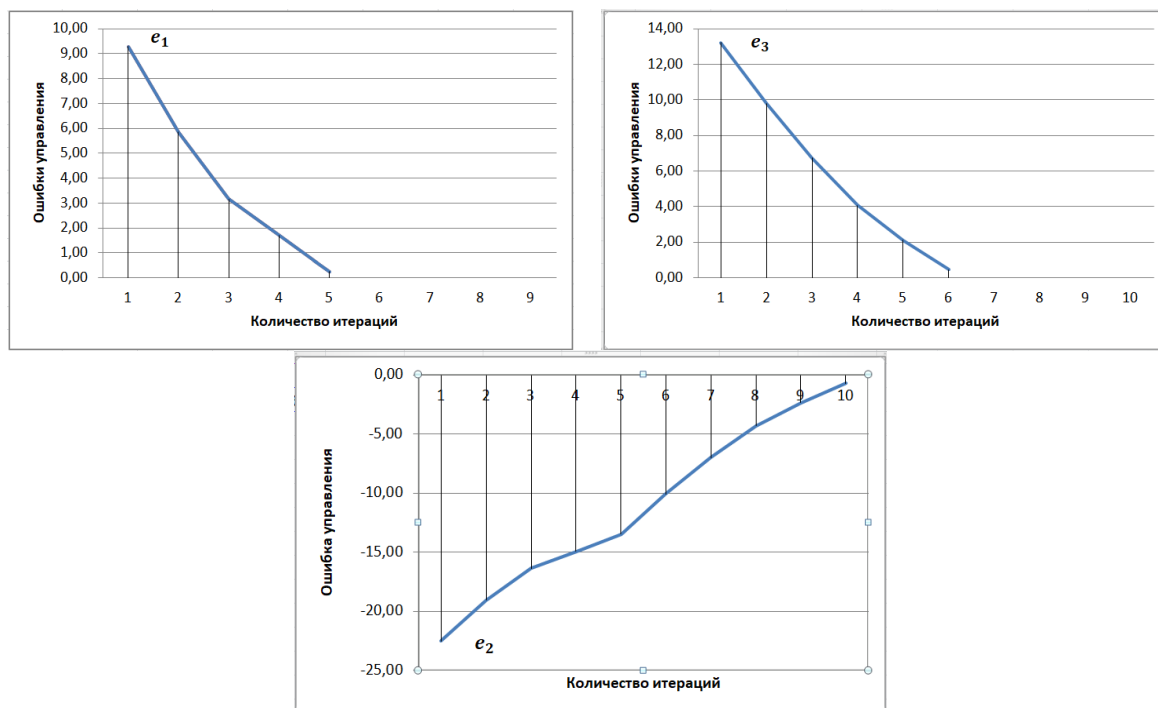


Рис.5. Динамика ошибок управления в процессе оптимизации сети

Как видно из полученных графиков синтезированный вектор управления  $u^*$  обеспечивает оптимизацию режима работы рассматриваемой распределительной сети.

Как видно из прикладных расчетов, полученные результаты по своей сути и структуре аналогичны тем результатам, полученных в результате

моделирования одной из возможных ситуаций в сети, приведенных в [5]. Это свидетельствует, что методика определения разбаланса мощностей по фазам и способ их симметрирования верны и на их основе можно синтезировать алгоритмы решения функциональных подзадач.

Компоненты сформированного вектора управления  $u_1^* = [2,1,9,5,3]$ ,  $u_2^* = [3,1,1,2,3]$  передаются по каналам связи (PLC, GSM/GPRS, Ethernet) в коммутатор фазных токов (КФТ) для исполнения.

#### 4 Результаты исследования

Разработанные алгоритмы для ЦР ИСУ дают возможность симметрированию нагрузок абонентов в распределительной сети, т.е. распределить мощности абонентов по фазам сети для минимизации потерь электроэнергии, возникающих в результате разбаланса между фазами. В дальнейшем с учетом полученных результатов будет разработана структура программного обеспечения ЦР ИСУ. Программное обеспечение, построенное по модульному принципу, позволит создать гибкую среду управления и функциональности всей системы распределения мощностей абонентов по фазам. Такое программное обеспечение будет реализовано на языке C/C++ STM32F4 на базе отладочных плат *STM32F4Discovery* [3, 4], вид которого показан на рис.6.



Рис.6. Отладочные платы для программирования

#### Библиографический список

1. Оморов Т.Т. Оценка влияния несимметрии токов и напряжений на потери электроэнергии в распределительной сети с использованием АСКУЭ // *Электричество*. -2017. -№ 9. - С. 17-23.
2. Оморов Т.Т. Синтез цифрового регулятора для симметрирования распределительной электрической сети // *Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика*. 2019. №11. С. 51-56.
3. Закиряев К.Э. Выбор микроконтроллера для цифрового регулятора// *Постулат*. 2021.№12.
4. Закиряев К.Э., Глаголев В.А. Аппаратно-программные инструменты разработки программного обеспечения цифрового регулятора// *Постулат*. 2022.№2.

5. Закиряев К.Э. Моделирование алгоритма функционирования цифрового регулятора// Постулат. 2022.№6.
6. Omorov T.T. Digital control of electric power flows in non-symmeter distribution networks as a composition of AMRCS // Energy Systems Research. 2021. No.1. Pp.38-46.