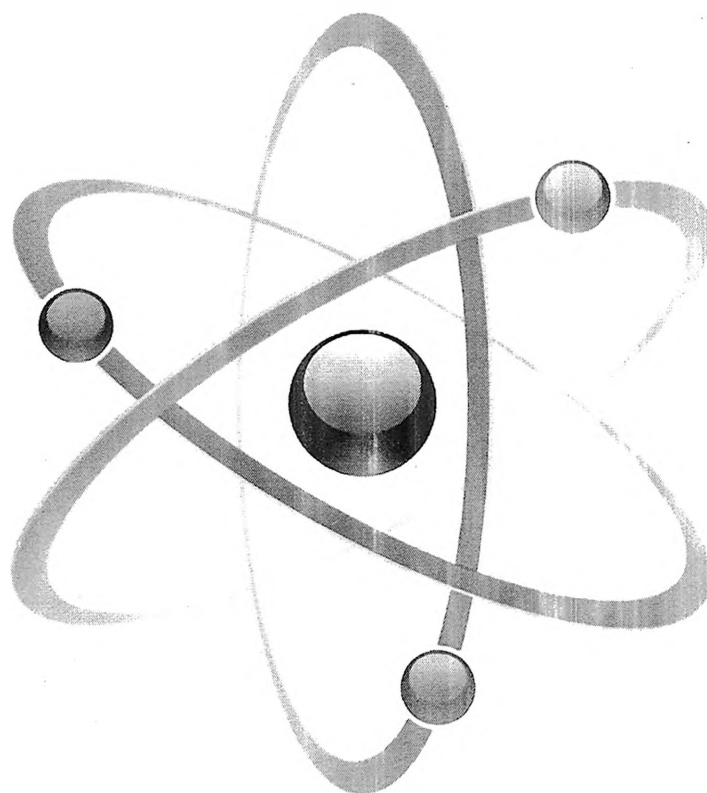


ISSN 1694-6634

научный журнал

# ФИЗИКА

илимий журналы



2016

№2

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ ФИЗИКА  
ИЛИМИЙ ЖУРНАЛ ФИЗИКА**

**Учредитель:**

Институт физико-технических проблем и материаловедения Национальной академии наук Кыргызской Республики

Журнал зарегистрирован в Министерстве юстиции Кыргызской Республики. Свидетельство о регистрации №1418 от 13 июня 2008 г.  
ISSN 1694-6634

**Редакционная коллегия:**

**Главный редактор,**  
академик НАН КР К.М. Жумалиев

**Зам. главного редактора,**  
Член-корреспондент НАН КР  
М.М.Кидибаев

**Ответственный секретарь,**  
к.ф.-м.н. Л.К.Меренкова

**Члены редколлегии:**

Академик НАН КР А.Ж. Жайнаков,  
академик НАН КР А.А. Кутанов,  
академик НАН КР С.Ж. Токтомышев,  
д.т.н., профессор С.А. Алымкулов,  
д.ф.-м.н., профессор К.А. Каримов,  
д.ф.-м.н., профессор В.П. Макаров,  
д.ф.-м.н., профессор Р.М. Урусов,  
д.ф.-м.н. В.Н. Фоломеев,  
д.ф.-м.н. Н.К. Касмамытов,  
д.ф.-м.н. Н.К. Джаманкызов,  
к.ф.-м.н. К.Х. Хайдаров,  
к.т.н. К.К. Талыпов  
к.ф.-м.н.(отв.секретарь) Л.К. Меренкова

**Адрес редакции:**

720071, Кыргызская Республика,  
г.Бишкек, проспект Чуй, 265-а

Тел.: +(312)64-19-65

Факс: +(312)43-11-69, 43-11-71

E-mail: merenkova@inbox.ru

## К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Р.Ч. Осмонова<sup>1</sup> - м.н.с., Б.К. Такырбашев<sup>1</sup>, А. Эралиева<sup>2</sup>  
Т.Т. Оморов<sup>1</sup> - член-корреспондент

<sup>1</sup>Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН КР,  
г. Бишкек, Кыргызстан

<sup>2</sup>КТУ «Манас» г. Бишкек, Кыргызстан

**Аннотация.** Рассматривается проблема построения модели физических процессов, протекающих в распределительных электрических сетях (РЭС) напряжением 0,4 кВ. Основная трудность при этом заключается в формализации математического описания динамики РЭС в условиях несимметричности их режимов функционирования и неполной информации о параметрах и состоянии сети. Такая неопределенность обуславливается наличием в сети априори неизвестных сопротивлений межабонентских участков магистральной линии (МЛ) и отсутствием необходимого объема измерительных данных, получаемых с электронных счетчиков электроэнергии, установленных у абонентов сети. Предлагаются модели функционирования элементов РЭС и их схемные реализации, позволяющие в рассматриваемых условиях обеспечить моделирование динамики трехфазной сети на основе представления переменных ее состояния в комплексной форме. Результаты моделирования можно использовать для идентификации технических потерь электроэнергии в распределительных сетях.

**Ключевые слова:** распределительная электрическая сеть, несимметричный режим, комплексные переменные, модель трехфазной сети, идентификация переменных состояния.

## TO CREATION OF MODEL OF PHYSICAL PROCESSES IN DISTRIBUTIVE ELECTRIC NETWORKS

R. Osmonova<sup>1</sup>, B. Takyrbashev, A. Eralieva, T. Omorov

<sup>1</sup>Institute of Physical and Technical Problems and Materials Science of the NAS KR, Bishkek,  
Kyrgyz Republic

<sup>2</sup>KTU «Manas» Bishkek, Kyrgyz Republic

**Summary.** The problem of creation of model of the physical processes proceeding on the distributive electrical networks (DEN) of 0,4 kV is considered. The main difficulty at the same time consists in formalization of the mathematical description speakers RES in the conditions of asymmetry of their modes of functioning and incomplete information on parameters and network condition. Such uncertainty is caused by existence in a network a priori of unknown resistance of interpersonal sections of the trunk line (TL) and absence of the necessary volume of the measuring data obtained from the electronic counters of the electric power set at subscribers of a network. Models of functioning of the RES elements and their circuit implementations allowing in the considered conditions to provide simulation of dynamics of a three-phase network on the basis of representation of variables it состояния в to the complex form are offered. Results of simulation can be used for the identification of technical of losses of the electric power on distributive networks.

**Key words:** distributive electrical network, the asymmetrical mode, complex variables, model of a three-phase network, identification of state variables.

Важной проблемой при автоматизации и информатизации процессов энергопотребления в распределительных электрических сетях (РЭС) напряжением 0,4 кВ является идентификация их электрического состояния [1-5], определяемого значениями токов и напряжений в заданных узлах сети. В рамках разрабатываемых в настоящее время автоматизированных информационно-измерительных систем контроля и учета электроэнергии (АИИС КУЭ) [6] эта проблема практически не решается. В то же время в целях обеспечения эффективности внедряемых автоматизированных систем целесообразно, чтобы результаты идентификации состояний РЭС использовались для решения задач диагностики состояний сети [1, 7, 8] и оптимизации режимов ее работы [9-11]. Основные трудности при этом состоят в следующем:

- 1) распределительные трехфазные сети, в основном, работают в несимметричном режиме;
- 2) ряд параметров сети, в частности, текущие реальные значения сопротивлений межабонентских участков магистральной линии (МЛ) априори являются неизвестными;
- 3) электронными счетчиками электроэнергии (Сч) измеряются лишь действующие значения токов и напряжений на нагрузках потребителей электроэнергии (абонентов сети), что не позволяет использовать для расчета электрического состояния РЭС известные физические законы [12].

Указанные факторы сдерживают построение достаточно эффективных моделей, описывающих физические процессы в РЭС, что не позволяет в полной мере решать задачи идентификации и диагностики состояний трехфазных сетей в режиме реального времени. В работе предлагается один из возможных подходов к построению моделей функционирования РЭС, позволяющих идентификацию переменных состояний распределительных сетей.

**Постановка задачи.** Рассматривается трехфазная сеть с напряжением 0,4 кВ, структура которой представлена на рис.1. Здесь: ТП – питающая трансформаторная подстанция;  $k$  – индексная переменная, которая обозначает номера фаз А, В и С соответственно ( $k = \overline{1,3}$ );  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$  – комплексные токи и напряжения соответственно на входах фаз;  $\dot{I}_{vk}$  – комплексный ток, протекающий в  $l$ -ом участке линейного провода  $k$ -ой фазы ( $v = \overline{1, n}$ );  $Z_{vk}$  –  $l$ -я нагрузка (электроприемник) потребителя, подключенная к фазе с номером  $k$ ;  $\dot{I}_{vk}, \dot{U}_{vk}$  – комплексный ток и напряжение на нагрузке  $Z_{vk}$ ;  $\dot{i}_{vk}, \dot{i}_v$  – напряжения соответственно на  $l$ -ом межабонентском участке линейного провода  $k$ -ой фазы и нейтрального провода;  $\dot{I}_v, z_v$  – комплексный ток и сопротивление  $l$ -го участка нейтрального провода.

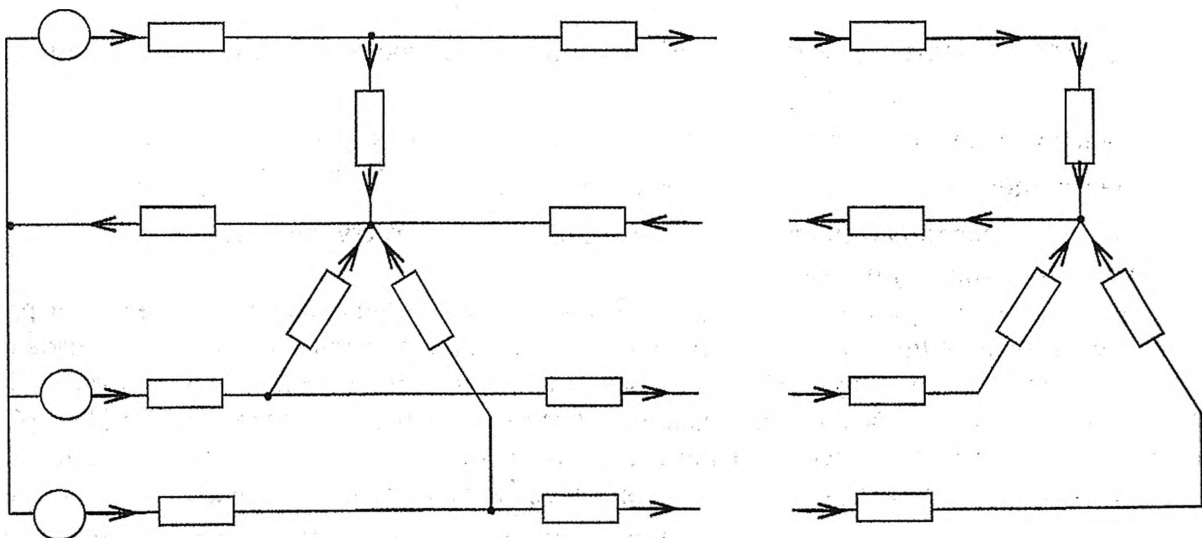


Рис. 1. Схема трехфазной распределительной сети

Далее предполагается, что выполняются следующие условия:

1. РЭС функционирует в несимметричном режиме и относится к классу линейных систем.
2. Модули (действующие значения)  $I_{\nu k}$ ,  $U_{\nu k}$  комплексных токов  $\dot{I}_{\nu k}$  и напряжений  $\dot{U}_{\nu k}$  и коэффициенты мощности  $\cos\varphi_{\nu k}$  ( $\nu = \overline{0, n}$ ,  $k = \overline{1, 3}$ ) измеряются счетчиками электроэнергии (Сч $_{\nu k}$ ), установленные соответственно в ТП и у абонентов сети, где  $I_{0k} = I_k$ ,  $U_{0k} = U_k$ .

Перечисленные данные измеряются посредством счетчиков (Сч $_{\nu k}$ ) и по каналам связи (GSM, PLC) передаются концентратору данных (КД), который устанавливается в ТП. КД выполняет следующие основные функции:

- сбор данных с группы счетчиков (Сч $_{\nu k}$ );
- хранение поступающих данных;
- обработка данных для решения функциональных задач нижнего уровня (расчет потерь электроэнергии, составление энергобаланса, диагностика состояний сети).

Рассмотрим работу распределительной сети в отрезке времени  $[t_0, t_m]$ , где  $t_0$  и  $t_m$  — начальный и конечный моменты наблюдения (моделирования) соответственно. Процесс измерения необходимых данных счетчиками электроэнергии, их передача по каналу связи и обработка в концентраторе (КД) осуществляется циклически в интервалах времени  $[t_q, t_{q+1}]$  ( $q = \overline{0, m-1}$ ), которые далее назовем циклами моделирования. Считается, что опрос счетчиков Сч $_{\nu k}$  производится с интервалом  $T_q = t_{q+1} - t_q$ . При этом состояние сети в момент времени  $t \in [t_q, t_{q+1}]$  характеризуется следующим набором векторов:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= [\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3], & \dot{U} &= [\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3], \\ \dot{I}_k &= [\dot{I}_{1k}, \dot{I}_{2k}, \dots, \dot{I}_{nk}], & \dot{U}_k &= [\dot{U}_{1k}, \dot{U}_{2k}, \dots, \dot{U}_{nk}], \\ \dot{u}_k &= [\dot{u}_{1k}, \dot{u}_{2k}, \dots, \dot{u}_{n-1,k}], & \dot{i}_k &= [i_{1k}, i_{2k}, \dots, i_{n-1,k}], \\ \dot{u} &= [\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dots, \dot{u}_{n-1}], & \dot{J} &= [J_1, J_2, \dots, J_{n-1}], \quad k = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (1)$$

Из этих данных известными являются только компоненты векторов  $\dot{I}, \dot{U}, \dot{I}_k, \dot{U}_k$  ( $k = \overline{1, 3}$ ), которые хранятся в концентраторе (КД). Проблема заключается в построении модели распределительной сети, позволяющей оценить ее текущее состояние, определяемое векторами  $\dot{i}_k, \dot{u}_k, \dot{u}$  и  $\dot{J}$ .

**Решение задачи.** На первом этапе осуществляется декомпозиция трехфазной РЭС на структурные звенья, к числу которых относятся:

- питающая трансформаторная подстанция (ТП) с трехфазным счетчиком Сч $^{ТП}$ ;
- нагрузки (электроприемники) абонентов сети с соответствующими счетчиками Сч $_{\nu k}$  ( $\nu = \overline{1, n}$ ,  $k = \overline{1, 3}$ );
- электрические контуры фаз, включающие нагрузки  $Z_{\nu k}$  и  $Z_{\nu+1,k}$ , а также  $\nu$ -тые межабонентские участки с сопротивлениями  $z_{\nu k}$  ( $\nu = \overline{1, n}$ ,  $k = \overline{1, 3}$ ) (рис.1);
- четырех проводная электрическая сеть с заданной структурой (рис.1);
- концентратор данных (КД).

**Модели структурных звеньев РЭС.** Моделирование физических процессов в распределительной сети производится с использованием программных модулей, реализованных на основе моделей структурных звеньев сети. При этом модели ТП и нагрузок абонентов сети формируются с использованием датчиков случайных чисел (ДСЧ) [13], распределение которых подчиняется определенному закону (равномерному, нормальному и др.). Для моделирования совместного функционирования ТП и счетчика Сч $^{ТП}$  используются три датчика ДСЧ $_k$ , на выходах которых формируются входные напряжения  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ ,  $U_3(t)$  соответствующих фаз (А, В, С) (рис.2).

Каждая нагрузка (электроприемник) сети, имеющая координату  $(v, k)$ , с соответствующим счетчиком электроэнергии ( $СЧ_{vk}$ ) моделируется с помощью датчика ДСЧ $_{vk}$ , на выходе которого формируются действующие значения тока  $I_{vk}$ , напряжения  $U_{vk}$  и соответствующий коэффициент мощности  $\cos \varphi_{vk}$  (рис.3).

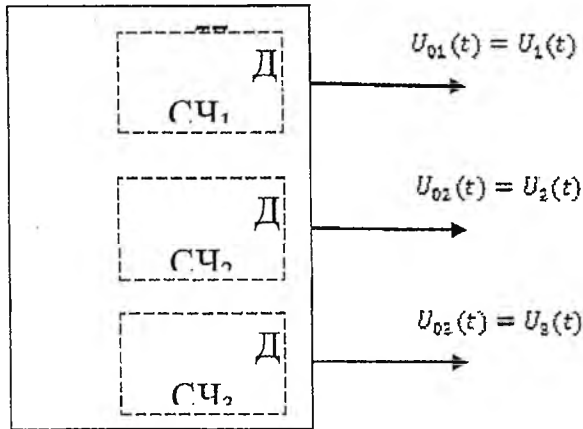


Рис.2. Модель ТП и  $СЧ^{ТП}$

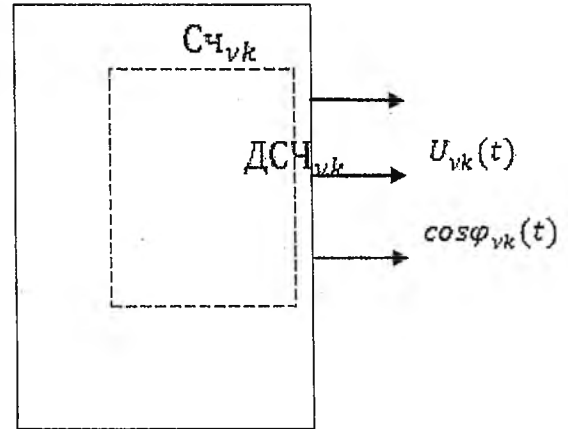


Рис.3. Модель нагрузки и  $СЧ_{vk}$

Выходные переменные указанных моделей (ТП,  $СЧ_{vk}$ ) в дискретные моменты времени  $t = t_q$  ( $t_q \in [t_q, t_{q+1}]$ ) представляют собой ступенчатые прямоугольные импульсы разных длительностей. При этом имеется возможность задания параметров (минимумы, максимумы, длительности) этих импульсов.

Концентратор данных (КД) включает программные модули, реализующие модели физических процессов в РЭС. В их состав входят:

- модель формирования фазовых сдвигов (МФС), которая предназначена для оценки сдвигов фаз  $\psi_{vk}$ ,  $\alpha_{vk}$  соответственно напряжения  $U_{vk}$  и тока  $I_{vk}$  на нагрузке  $Z_{vk}$ ;
- модели комплексных токов (МКТ) и напряжений (МКН), на выходах которых переменные сети представляются в форме:

$$\dot{I}_{vk} = I_{vk}^{\text{в}} + jI_{vk}^{\text{м}}, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

$$\dot{U}_{vk} = U_{vk}^{\text{в}} + jU_{vk}^{\text{м}}, \quad v = \overline{0, n}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (3)$$

где символы в и м обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимое число;

- модель фазовых токов (МФТ), на выходе которой формируются межабонентские токи  $\dot{i}_{vk}$  ( $v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}$ ) и токи  $\dot{I}_v$  на участках нейтрального провода;
- модель фазовых напряжений (МФН), предназначенная для формирования напряжений  $\dot{u}_{vk}$  и  $\dot{u}_v$  ( $v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}$ ) на межабонентских участках сети.

Рассмотрим модели указанных программных модулей, реализованных с использованием средств программного комплекса MATLAB [13]. Необходимо отметить, что счетчиками электроэнергии ( $СЧ_v$ ), установленными у абонентов сети, измеряются лишь действующие значения токов  $I_{vk}$  и напряжений  $U_{vk}$ , а их вещественные и мнимые части являются неизвестными величинами. В [5] предложен вычислительный алгоритм представления токов и напряжений в трехфазной сети в комплексной форме. В то же время можно показать, что наиболее эффективной является использование следующих формул для расчета фазовых сдвигов  $\psi_{vk}$ ,  $\alpha_{vk}$ :

$$\alpha_{vk} = 0,5 \arctg \left[ \frac{\sin \varphi_{vk} (0,5 \cos \varphi_{vk} + 1)}{1,5 - 0,5 \cos 2\varphi_{vk} - \cos \varphi_{vk}} \right], \quad (4)$$

$$\psi_{vk} = \varphi_{vk} + \alpha_{vk}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad v = \overline{0, n}. \quad (5)$$

На основе формул (4) и (5) построена модель МФС для нагрузки  $Z_{vk}$ , которая представлена на рис.4, где

$$Fi = \varphi_{vk}, \quad \cos Fi = \cos \varphi_{vk}, \quad \sin Fi = \sin \varphi_{vk}$$

$$Alfa = \alpha_{vk}, \quad Psi = \psi_{vk}.$$

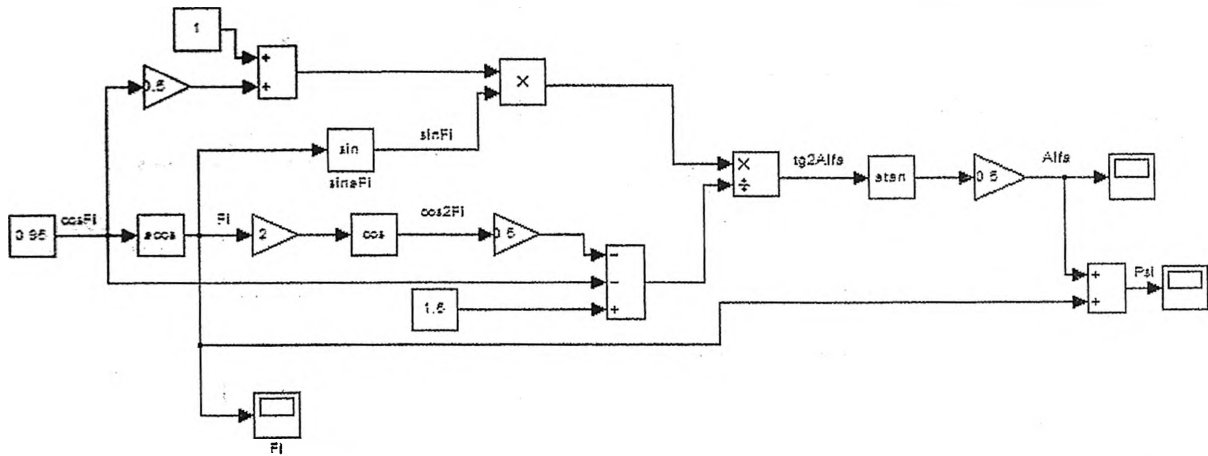


Рис. 4. Модель МФС

По найденным фазовым сдвигам  $\alpha_{vk}$  и  $\psi_{vk}$  искомые вещественные  $I_{vk}^E, U_{vk}^E$  и мнимые  $I_{vk}^M, U_{vk}^M$  части комплексных тока и напряжения на нагрузке  $Z_{vk}$  определяются на основе следующих выражений:

$$I_{vk}^E = I_{vk}^* l_{vk}^E = I_{vk}^* \cos \alpha_{vk}, \quad I_{vk}^M = I_{vk}^* l_{vk}^M = I_{vk}^* \sin \alpha_{vk}, \quad (6)$$

$$U_{vk}^E = U_{vk}^* v_{vk}^E = U_{vk}^* \cos \psi_{vk}, \quad U_{vk}^M = U_{vk}^* v_{vk}^M = U_{vk}^* \sin \psi_{vk}, \quad (7)$$

$$v = \overline{0, n}, \quad k = \overline{1, 3}.$$

Выражения (4), (5), (6) и (7) позволяют построить модель МКТ и МКН для нагрузки  $Z_{vk}$ , схемы которых показаны на рис.5 и 6.

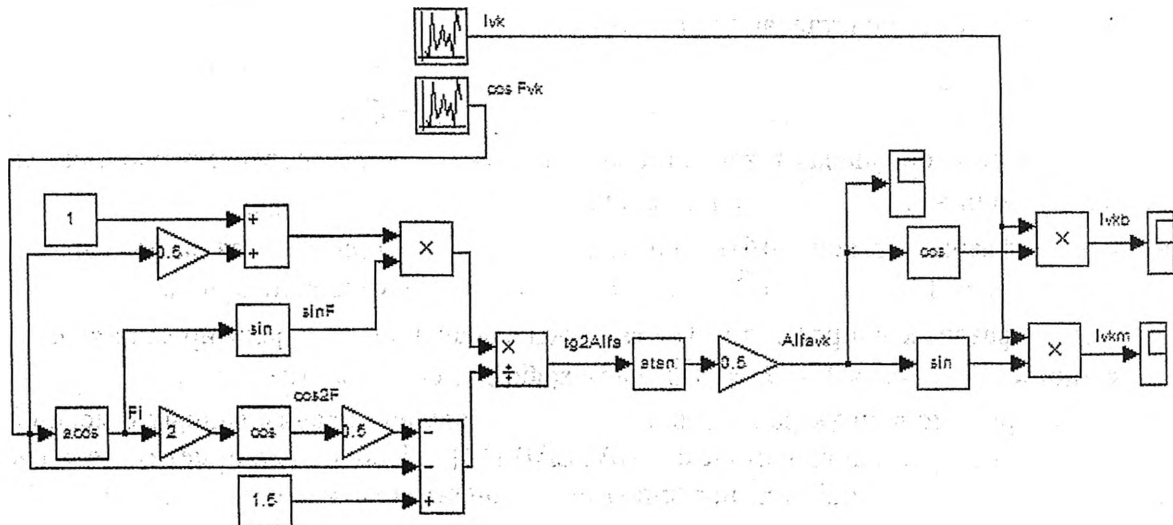


Рис. 5. Модель МКТ

На рисунках приняты следующие обозначения:

$$Ivk = I_{vk}, \quad Ivkb = I_{vk}^E, \quad Ivkm = I_{vk}^M, \quad Alfa vk = \alpha_{vk},$$

$$Uvk = U_{vk}, \quad cos Fvk = \cos \varphi_{vk}, \quad Uvkb = U_{vk}^E, \quad Uvkm = U_{vk}^M,$$

$$Alfa = \alpha_{vk}, \quad Psi = \psi_{vk}, \quad Fvk = \varphi_{vk}.$$

Такое комплексное представление токов и напряжений на нагрузках сети позволяет построить модель фазных токов (МФТ) на основе первого закона Кирхгофа [12], что невозможно с использованием действующих значений абонентских токов  $I_{vk}$  ( $v = \overline{1, n}$ ,  $k = \overline{1, 3}$ ). При этом в каждом цикле моделирования  $[t_q, t_{q+1}]$  компоненты векторов  $\dot{i}_{vk} = [i_{1k}, i_{2k}, \dots, i_{n-1,k}]$  определяются по следующим выражениям:

$$\dot{i}_{vk} = \sum_{l=v+1}^n i_{lk} = \sum_{l=v+1}^n (i_{lk}^B + j i_{lk}^M) = \dot{i}_{vk}^B + j \dot{i}_{vk}^M, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}. \quad (8)$$

где

$$\dot{i}_{vk}^B = \sum_{l=v+1}^n I_{lk}^B, \quad \dot{i}_{vk}^M = \sum_{l=v+1}^n I_{lk}^M, \quad I_l = \dot{i}_{1l}. \quad (9)$$

В результате модули (действующие значения)  $i_{vk}$  межабонентских комплексных токов  $\dot{i}_{vk}$  определяются по формуле:

$$i_{vk} = \sqrt{(i_{vk}^B)^2 + (i_{vk}^M)^2}, \quad v = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, 3}. \quad (10)$$

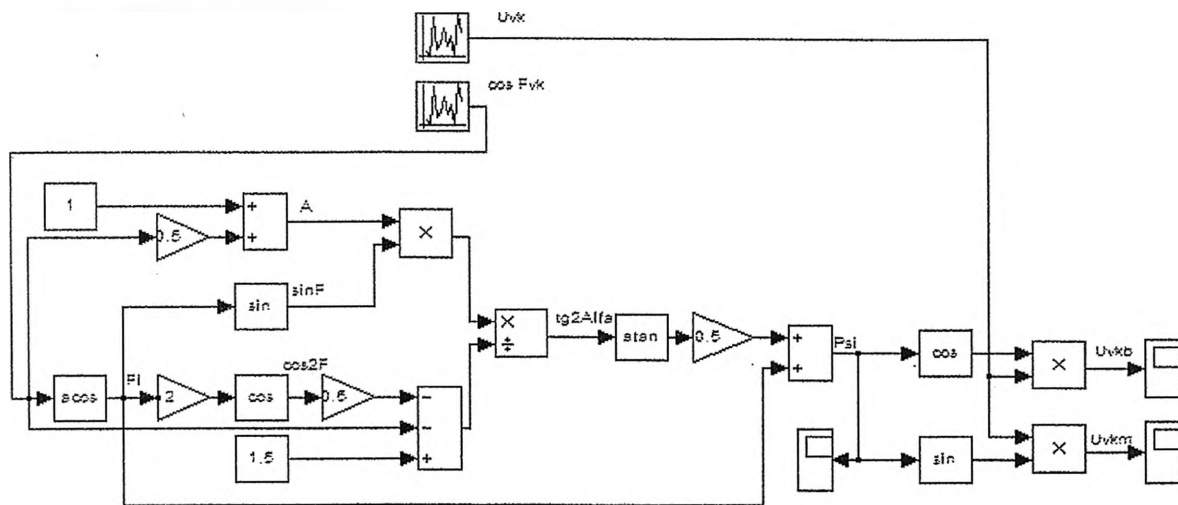


Рис. 6. Модель МКН

Комплексные токи  $\dot{J}_v$  в межабонентских участках нейтрального провода определяются как

$$\dot{J}_v = \dot{i}_{v1} + \dot{i}_{v2} + \dot{i}_{v3} = J_v \exp(j\theta_v), \quad v = \overline{1, n-1}, \quad (11)$$

где  $J_v$ ,  $\theta_v$  – действующие значения и фазовые сдвиги соответственно.

На рис.7 показана структура модели фазовых токов (МФТ), построенная на основе формул (8)-(10) для двух соседних электрических контуров трехфазной сети с номерами  $v$  и  $(v+1)$  для фазы с индексом  $k$ . При этом введены следующие обозначения:

$$I_{v+1,k} = I_{v+1,k}, \quad I_{v+1,kb} = I_{v+1,k}^B, \quad I_{v+1,km} = I_{v+1,k}^M, \\ Alfa\ vk = \alpha_{vk}, \quad Fvk = \varphi_{vk}.$$

Теперь рассмотрим вопрос о построении модели фазовых напряжений (МФН), предназначенной для оценки напряжений  $\dot{u}_{vk}$  на межабонентских участках МЛ. Напряжения  $\dot{u}_v$  ( $v = \overline{1, n-1}$ ) на нейтральном проводе с учетом свойства линейности рассматриваемой трехфазной сети определяются выражением:



$$\dot{u}_v = \dot{u}_{v1} + \dot{u}_{v2} + \dot{u}_{v3} = u_v^E + j u_v^M, \quad v = \overline{1, n-1}. \quad (12)$$

Далее для нахождения напряжений  $\dot{u}_{v1}, \dot{u}_{v2}, \dot{u}_{v3}$  для каждого контура сети составляем балансовые соотношения для напряжений:

$$\dot{U}_{vk} = \dot{u}_{vk} + \dot{u}_v + \dot{U}_{v+1,k}, \quad v = \overline{1, n-1}, \quad k = \overline{1,3}, \quad (13)$$

где  $\dot{U}_{1k} = \dot{U}_k$ . Можно показать, что искомые комплексные напряжения  $\dot{u}_{v1}, \dot{u}_{v2}, \dot{u}_{v3}$  на основе соотношений (10) определяются по следующим явным формулам:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{v1} &= (3\dot{b}_{v1} - \dot{b}_{v2} - \dot{b}_{v3})/4, \\ \dot{u}_{v2} &= (-\dot{b}_{v1} + 3\dot{b}_{v2} - \dot{b}_{v3})/4, \\ \dot{u}_{v3} &= (-\dot{b}_{v1} - \dot{b}_{v2} + 3\dot{b}_{v3})/4, \quad v = \overline{1, n-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

При этом комплексные коэффициенты

$$\begin{aligned} \dot{b}_{v1} &= \dot{U}_{v1} - \dot{U}_{v+1,1} = b_{v1}^E + j b_{v1}^M, \\ \dot{b}_{v2} &= \dot{U}_{v2} - \dot{U}_{v+1,2} = b_{v2}^E + j b_{v2}^M, \end{aligned}$$

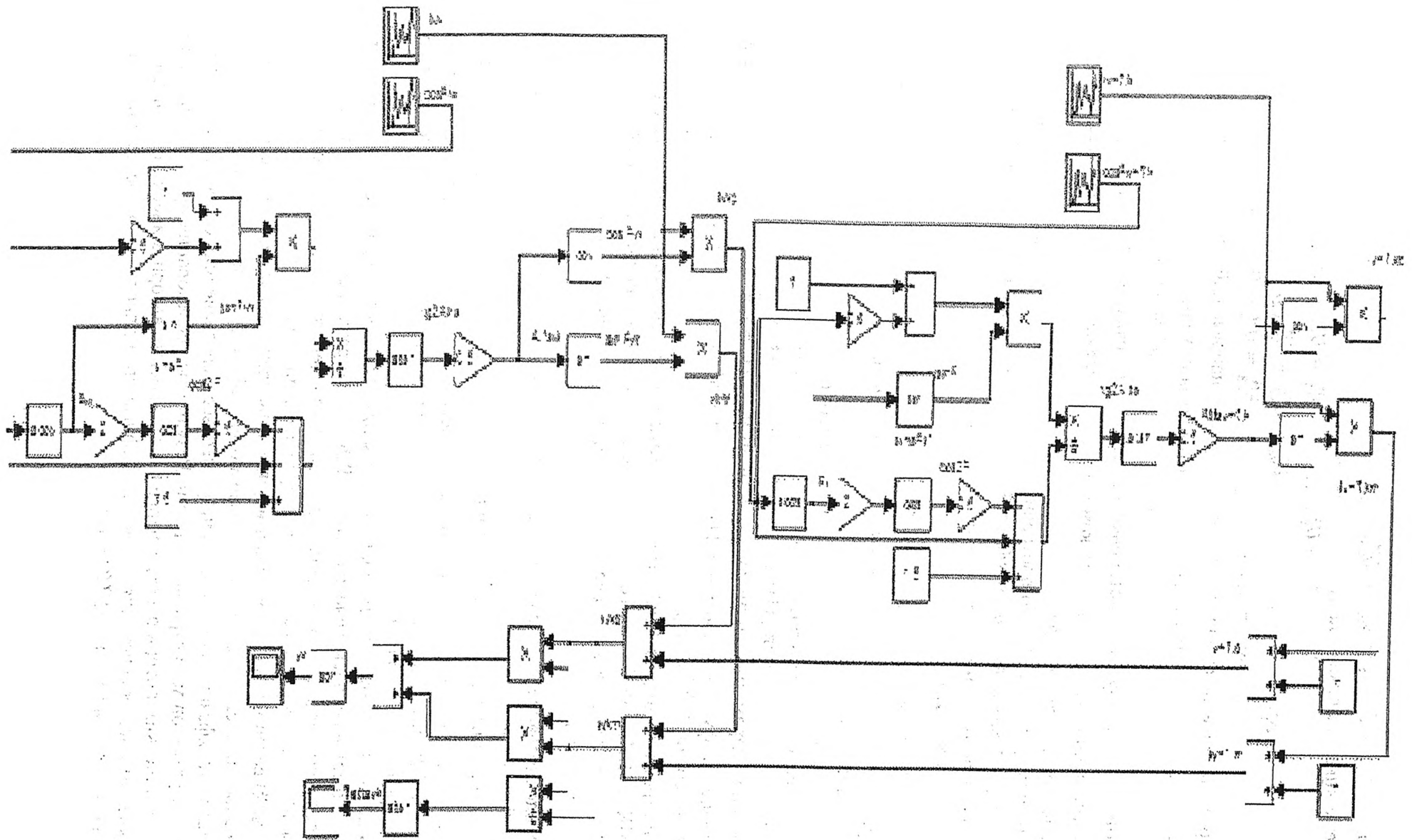


Рис.7. Структурная схема модели МФТ

$$\dot{b}_{v3} = \dot{U}_{v3} - \dot{U}_{v+1,3} = b_{v3}^E + jb_{v3}^M,$$

где вещественные и мнимые части

$$\begin{aligned} b_{v1}^E &= U_{v1}^E - U_{v+1,1}^E, & b_{v1}^M &= U_{v1}^M - U_{v+1,1}^M, \\ b_{v2}^E &= U_{v2}^E - U_{v+1,2}^E, & b_{v2}^M &= U_{v2}^M - U_{v+1,2}^M, \\ b_{v3}^E &= U_{v3}^E - U_{v+1,3}^E, & b_{v3}^M &= U_{v3}^M - U_{v+1,3}^M. \end{aligned} \quad (15)$$

В результате вещественные и мнимые части напряжений  $\dot{u}_v$  на  $v$ -ых участках нейтрального провода с учетом (11) определяются по формулам:

$$u_v^E = u_{v1}^E + u_{v2}^E + u_{v3}^E, \quad u_v^M = u_{v1}^M + u_{v2}^M + u_{v3}^M. \quad (16)$$

Таким образом, путем подстановки найденных напряжений  $\dot{u}_{v1}$ ,  $\dot{u}_{v2}$ ,  $\dot{u}_{v3}$  в правые части соотношения (12) определяем комплексные напряжения  $\dot{u}_v$  на соответствующих участках нейтрального провода.

На основе формул (12)-(16) построена структурная схема модели МФН для двух соседних электрических контуров трехфазной сети с номерами  $v$  и  $(v+1)$ , которая показана на рис.8. Здесь обозначения имеют следующий смысл:

$$\begin{aligned} U_{v+1,k} &= U_{v+1,k}, \quad \cos F_{v+1,k} = \cos \varphi_{v+1,k}, \quad U_{v+1,kb} = U_{v+1,k}^E, \\ U_{v+1,km} &= U_{v+1,k}^M, \quad \text{Alfa}_{v+1} = \alpha_{v+1,k}, \quad \text{Psi}_{v+1} = \psi_{v+1,k}. \end{aligned}$$

В результате обобщенный алгоритм моделирования распределительной сети включает следующие основные этапы:

1. Задание структуры распределительной сети (рис.1).
2. Определение характеристик и параметров процессов функционирования трансформаторной подстанции (ТП) и нагрузок абонентов сети.
3. Задание параметров датчиков ДСЧ<sub>k</sub> и ДСЧ<sub>vk</sub> ( $v = \overline{1, n}$ ,  $k = \overline{1, 3}$ ), моделирующих процессы функционирования ТП и нагрузок абонентов сети со счетчиками электроэнергии Сч<sup>ТП</sup> и Сч<sub>vk</sub>.
4. Построение модели РЭС заданной структуры с использованием моделей МФС, МКТ, МКН, МФТ и МФН, структурные схемы которых представлены на рис. 4-8.
5. Задание интервала моделирования  $[t_q, t_{q+1}]$  и циклов наблюдения  $[t_q, t_{q+1}]$ ,  $q = \overline{1, m-1}$ .
6. Моделирование распределительной сети с использованием ее модели, построенной на этапе 4.
7. Определение векторов  $\dot{i}_k$ ,  $\dot{u}_k$ ,  $\dot{u}$  и  $\dot{j}$  для всех интервалов  $[t_q, t_{q+1}]$ ,  $q = \overline{1, m-1}$ .

Результаты моделирования можно использовать для идентификации состояния моделируемой РЭС и оценки технических потерь электроэнергии в межабонентских участках магистральной линии сети.

**Выводы.** Предложен подход к моделированию физических процессов, протекающих в распределительных электрических сетях (РЭС) с напряжением 0,4 кВ, функционирующих в несимметричном режиме. Для построения моделей процессов производится декомпозиция РЭС на структурные звенья и преобразование переменных состояний (токов, напряжений) сетей в комплексную форму, что позволяет использовать известные физические законы для электрических цепей. Разработанный подход дает возможность построения моделей трехфазных сетей при априори неизвестных значениях сопротивлений межабонентских участков магистральной линии. Результаты исследований ориентированы для оценки технических потерь электроэнергии и построения алгоритмического и специального программного обеспечения задач идентификации и диагностики состояний распределительных сетей в составе АИИС КУЭ.

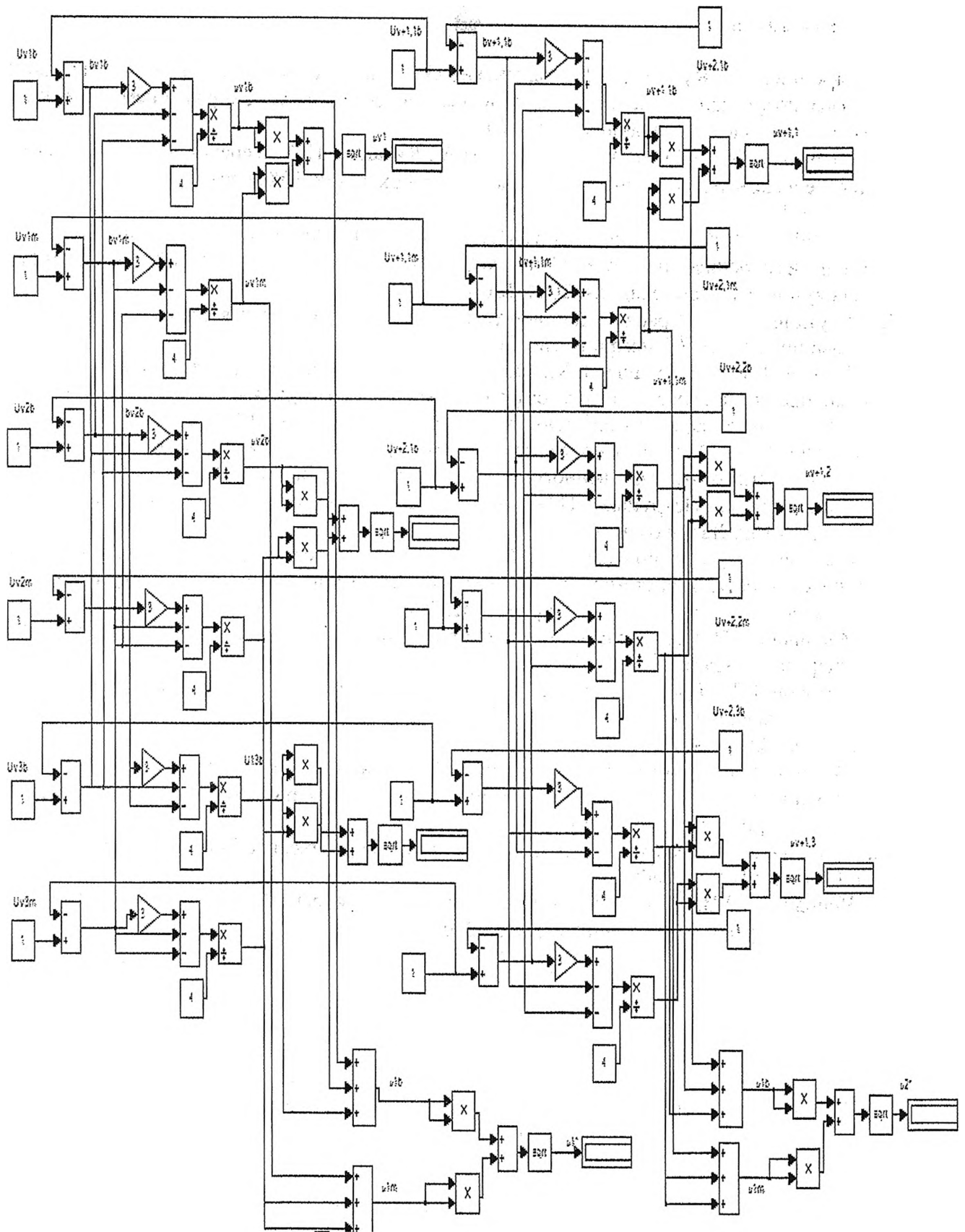


Рис.8. Структурная схема модели МФН

## Литература

1. Сапронов А.А., Кужиков С.Л., Тынянский В.Г. Оперативное выявление неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях напряжением до 1 кВ // Изв.вузов. Электромеханика. 2004. №1.
2. Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хребтов Н.А., Киташин П.А., Терехов К.И. Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ // Fractal simulation. 2013. №1.
3. Хлебников В.К., Подгорный Д.Э. Методика расчета потерь электроэнергии в сети 0,38 кВ по измерениям напряжений и токов с учетом схемно-технической информации. - Изв.вузов. Электромеханика, 2004. №6.1.
4. Арутюнян А.Г. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях // Электричество. 2015. №10.
5. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме идентификации состояний распределительных сетей в системах автоматизации контроля и учета электроэнергии // URL: Автоматизация и управление в технических системах. 2016. №3.
6. Игумнов С. Н. Автоматизированная система проектирования АИИС КУЭ // Известия Волгоградского государственного технического университета. –2008, Том 8, №5.
7. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Диагностика электрических цепей и систем. – Владивосток: Дальнаука, 2013.
8. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К. Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автоматизации учета и управления энергопотреблением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. №11.
9. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 288 с.
10. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К. К проблеме оптимизации несимметричных режимов работы распределительных сетей // Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика. 2016. №6.
11. Войтов О.Н., Мантров В.А., Семенова Л.В. Анализ несимметричных режимов электроэнергетических систем и управление ими // Электричество.- 1999. № 10.-С. 2-18.//Электричество, 1999, № 10. - С. 2-6.
12. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В. Теоретические основы электротехники. Т.1. –СПб.: Питер, 2009.
13. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.,СПб., 2008.