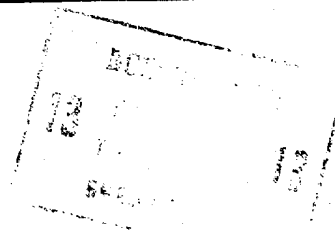




ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

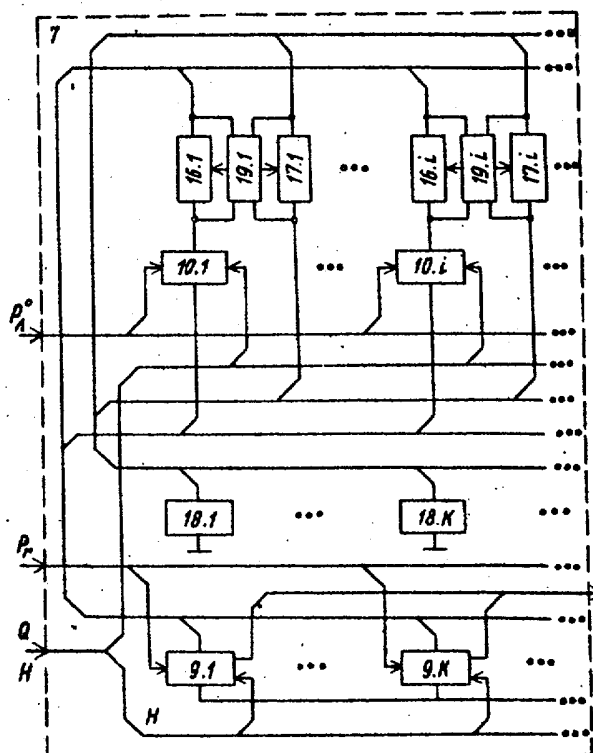


(61) 1164822  
(21) 3865845/24-07  
(22) 11.03.85  
(46) 07.12.86. Бюл. № 45  
(71) Ордена Октябрьской Революции  
всесоюзный государственный проектно-  
изыскательский и научно-исследова-  
тельский институт энергетических сис-  
тем и электрических сетей "Энерго-  
сетьпроект"  
(72) С.И. Хмельник  
(53) 621.316.728(088.8)  
(56) Авторское свидетельство СССР  
№ 1164822, кл. Н 02 J 3/06, 1984.

(54) УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУ-  
ЛИРОВАНИЯ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОС-  
ТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

(57) Изобретение относится к электро-  
технике и является усовершенствова-  
нием изобретения по авт. св.

№ 1164822. Цель изобретения - повыше-  
ние точности регулирования путем  
уменьшения флуктуаций мощности. Для  
достижения цели в блок 7 формирова-  
ния управляющих воздействий введены  
две группы управляемых источников 16  
и 17 тока по количеству имитаторов 10  
линии электропередачи, группа интег-



Фиг.2

(19) **SU** (11) **1275639** **A2**

раторов 18 по количеству имитаторов 9 узлов энергосистемы и группа блоков 19 моделирования зависимости перетоков активной мощности по линии электропередач от разности узловых напряжений. Блок 7 формирования управляющих воздействий представляет собой электрическую цепь, являющуюся моделью энергосистемы. Задача распределения активных мощностей в энергосистеме эквивалентна задаче распределения токов в этой цепи. Блоки 19 моделирования позволяют учитывать

зависимость перетока мощности от сдвига фаз между узловыми напряжениями. На основании информации о величинах узловых мощностей  $P_{\Gamma}$ , уставок перетоков мощностей  $P_{\Delta}^0$  и массовых коэффициентах  $Q$  и  $H$ , поступающих из блоков телеизмерений, и расчета фактических уставок и массовых коэффициентов блок 7 вырабатывает сигналы управления. Устройство обеспечивает высокую точность регулирования в энергосистемах любой конфигурации. 1 з.п.ф-лы, 7 ил.

Изобретение относится к электроэнергетике и является усовершенствованием изобретения по авт.св. № 1164822.

Цель изобретения - повышение точности регулирования путем уменьшения флуктуаций мощности.

На фиг. 1 изображено предлагаемое устройство; на фиг. 2 - блок формирования управляющих воздействий; на фиг. 3 - имитатор узла энергосистемы; на фиг. 4 - имитатор линии электропередач; на фиг. 5 - блок моделирования зависимости перетоков активной мощности по линии электропередач от разности фаз узловых напряжений; на фиг. 6 - энергосистема; на фиг. 7 - электрическая цепь, эквивалентная этой энергосистеме.

Устройство (фиг. 1) содержит соединенный с энергосистемой 1 блок 2 телеизмерений регулируемых параметров и блок 3 задатчиков уставок. С энергосистемой 1 каналом 4 управления мощностью регулирующих объектов связан управляющий блок 5. Входы управляющего блока 5 присоединены к выходам блока 2 телеизмерений регулируемых параметров и блока 3 задатчиков уставок.

Блок 2 телеизмерений состоит из отдельных датчиков 2.1.1, 2.1.2, ... регулируемых перетоков, 2.2.1, 2.2.2, ... генерируемых мощностей. Блок 3 задатчиков уставок состоит из отдельных задатчиков 3.1.1, 3.1.2, ... уставок по перетокам мощности  $P_{\Delta 1}$ ,

$P_{\Delta 2}$  и т.д., 3.2.1, 3.2.2, ..., уставок по генерируемым мощностям  $P_{\Gamma 1}$ ,  $P_{\Gamma 2}$  и т.д.

Множество выходов датчиков 2.1.1, 2.1.2, ... будем называть первым выходом блока 2 телеизмерений; а множество выходов датчиков 2.2.1, 2.2.2, ... - вторым выходом этого блока. Аналогично, множество выходов задатчиков 3.1.1, 3.1.2, ..., 3.2.1, 3.2.2, ... будем называть выходом блока 3 задатчиков уставок.

Управляющий блок 5 содержит блок 6 корректирующих фильтров 6.1, 6.2, ..., блок 7 формирования управляющих воздействий и блок 8 расчета фактических уставок и весовых коэффициентов, у которого к трем первым входам присоединены выходы блока 2 телеизмерений и выход задатчика 3 уставок, а четвертый вход соединен с входом блока 6 корректирующих фильтров, выход которого является выходом управляющего блока в целом. У блока 7 формирования управляющих воздействий выход соединен с объединенными входами блока 6 корректирующих фильтров и блока 8 расчета фактических уставок и весовых коэффициентов, два первых входа подключены к выходам этого блока 8, а третий вход соединен с первым выходом блока 2 телеизмерений. Блок формирования управляющих воздействий (фиг. 2) выполнен из имитаторов узлов энергосистемы 9.1, 9.2, ..., 9.к, ..., имитаторов линий электро-

передач 10.1, 10.2, ..., 10.i, ..., количество которых определяется количеством узлов и линий электропередач энергосистемы. Параллельно с управляемым источником 11 тока между двумя функциональными входами имитатора включены последовательно соединенные усилитель 12 и управляемый резистор 13, которые входят в состав каждого имитатора 9 узла энергосистемы (фиг. 3). Управляющие входы управляемого резистора 13 и управляемого источника 11 тока являются соответственно первым и вторым управляющими входами имитатора 9 в целом, а выход усилителя 12 является управляющим выходом имитатора 9 в целом.

Каждый имитатор линии электропередачи 10 (фиг. 4) выполнен в виде параллельно соединенных управляемого источника 14 тока и управляемого резистора 15, подключенных между двумя функциональными входами имитатора, а управляющие входы управляемого резистора 15 и управляемого источника 14 тока являются соответственно первым и вторым управляющими входами имитатора в целом.

В блок формирования управляющих воздействий (фиг. 2) входят две группы управляемых источников тока 16.1, 16.2, ..., 16.i, ..., и 17.1, 17.2, ..., 17.i, ..., количество которых в каждой группе равно количеству имитаторов 10 линии электропередач, группа интеграторов 18.1, 18.2, ..., 18.k, ..., количество которых равно количеству имитаторов 9 узлов энергосистемы, и группа упомянутых блоков моделирования 19.1, 19.2, ..., 19.i, ..., количество которых равно количеству имитаторов 10 линии электропередач.

Каждый имитатор 10 линий электропередач имеет два функциональных и два управляющих входа, а каждый имитатор 9 узла энергосистемы имеет еще и управляющий выход, причем эти выходы образуют в совокупности выход блока 7 формирования управляющих воздействий в целом. Первые управляющие входы всех имитаторов образуют в совокупности первый вход этого блока, вторые управляющие входы всех имитаторов 10 линий электропередач - второй вход этого блока, вторые управляющие входы всех имитаторов 9 узлов энергосистемы - третий вход этого

блока. Первые функциональные входы всех имитаторов 9 узлов энергосистемы объединены. Каждый имитатор 10.i линии электропередач соединен последовательно с управляемым источником 16.i тока первой группы так, что блоки 10.i и 16.i образуют i-ю последовательную цепочку. Эти цепочки и вторые функциональные входы всех имитаторов 9 узлов энергосистемы соединены между собой аналогично соединению концов имитируемых линий электропередач с имитируемыми узлами энергосистемы: каждая линия электропередач имитируется одной из i-х цепочек, а каждый узел энергосистемы имитируется одним из имитаторов 9.k.

Управляемые источники тока 17.i второй группы интеграторы 18.k соединены между собой аналогично соединению концов имитируемых линий электропередач с имитируемыми узлами энергосистемы. Каждая пара управляемых источников тока 16.i и 17.i, в которой один из них принадлежит первой группе, второй - принадлежит второй группе, а оба соответствуют одной и той же имитируемой линии электропередач, подключена к одному из блоков 19.i моделирования так, что первый двухпроводный вход преобразователя включен параллельно с управляемым источником 16.i тока первой группы, второй двухпроводный вход - с управляемым источником 17.i тока второй группы, первый выход блока 19.i моделирования соединен с управляющим входом управляемого источника 16.i тока первой группы, второй выход - с управляющим входом управляемого источника тока 17.i второй группы.

Каждый блок моделирования зависимости перетоков активной мощности по линии электропередач от разности фаз узловых напряжений 19 (фиг. 5) содержит два усилителя 20 и 21, два умножителя 22 и 23, источник 24 постоянного напряжения, синусоидальный 25 и косинусоидальный 26 преобразователи. Два входа первого 20 и второго 21 усилителей являются соответственно первым и вторым двухпроводными входами блока 19 в целом. Выход второго усилителя 21 подключен к входам синусоидального 25 и косинусоидального 26 преобразователей, выход каждого из которых подключен к первому

входу соответственно первого 22 и второго 23 умножителей. К вторым входам этих умножителей 22 и 23 подключен источник 24 постоянного напряжения, а к третьему входу второго умножителя 23 присоединен выход первого усилителя 20. Выходы первого 22 и второго 23 умножителей являются соответственно первым и вторым выходами блока 19 в целом.

Блок 8 расчета содержит две группы схем сравнения, входы которых являются входами блока расчета фактических уставок и весовых коэффициентов в целом. Кроме того, этот блок 8 содержит блоки регистров, выходы которых являются выходами блока 8 расчета фактических уставок и весовых коэффициентов в целом.

Источники 11, 14, 16 и 17 тока, используемые в устройстве, вырабатывают ток постоянной величины, не зависящей от напряжения на зажимах источника тока и определяемой сигналом на его управляющем входе.

В известном устройстве блок 7 формирования управляющих воздействий решает следующую задачу: минимизировать  $I$  при условиях

$$I = \sum_{i=1}^l q_i (P_{\Lambda_i}^* - P_{\Lambda_i}^0)^2 + \sum_{k=1}^n h_k V_k^2; \quad (1)$$

$$P_{гк}^* = P_{гк} + V_k; \quad (2)$$

$$P_{гк}^* = \sum_{i=1}^l \beta_{ik} P_{\Lambda_i}^*; \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^n V_k = 0; \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n P_{гк} = 0; \quad (5)$$

где  $V_k$  - управления;  
 $P_{гк}$  - измеренные узловые мощности;  
 $P_{гк}^*$  - узловые мощности, которые должны установиться после отработки управлений;  
 $P_{\Lambda_i}$  - измеренные перетоки мощности;  
 $P_{\Lambda_i}^*$  - перетоки мощности, которые должны установиться после отработки управлений;  
 $q_i, h_i$  - весовые коэффициенты, причем

$$\beta_{ki} = (0, 1-1)$$

в зависимости от соединения  $k$ -го узла с  $i$ -й линией электропередач и от

направления перетока, принятого за положительное.

В указанной задаче неизвестны  $V_k, P_{гк}^*, P_{\Lambda_i}^*$ , а данными являются  $q_i, h_k, \beta_{ki}, P_{\Lambda_i}^0, P_{гк}$ , причем последние связаны уравнением (5).

После реализации управлений  $V_k$  в энергосистеме устанавливаются узловые мощности  $P_{гк}^*$  и перетоки мощности  $P_{\Lambda_i}^*$ .

Если за время отработки управлений не было возмущений нагрузки, то

где  $P_{гк}^* = P_{гк}$  определяется по (2). При тех же условиях

лишь в том случае, если система уравнений (3) при  $k=1-n$  имеет единственное решение. В частности, такому требованию удовлетворяют энергосистемы без кольцевых связей.

В энергосистеме с кольцевыми связями может быть

хотя и  $P_{\Lambda_i}^*$ , и  $P_{гк}^*$  удовлетворяют уравнению (3). Для таких энергосистем условия задачи (1)-(5) должны быть дополнены уравнением, определяющим  $P_{\Lambda_i}^*$  через другие параметры энергосистемы. Известно, например, что

$$P_{\Lambda_i}^* = \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} P_{гк}^*,$$

где  $\alpha_{ki}$  - коэффициенты влияния. Однако эти коэффициенты не всегда можно определить. Поэтому в предлагаемом устройстве используется уравнение

$$P_{\Lambda_i}^* = a_i \sin \delta_i, \quad (6)$$

где  $\delta_i$  - разность фаз напряжений на концах линии электропередач;

$a_i$  - постоянный (при данных параметрах линии электропередач и модулях напряжения на ее концах) коэффициент.

При этом

$$\delta_i^* = \sum_{k=1}^n \beta_{ki} \varphi_k, \quad (7)$$

где  $\beta_{ki}$  - коэффициенты, входящие в формулу (3);  
 $\varphi_k$  - фаза напряжения  $k$ -го узла.

Фазы напряжений измеряются относительно фазы напряжения некоторого базового угла. Поэтому можно считать, что

$$\varphi_1 = 0. \quad (8)$$

Таким образом, для энергосистемы произвольной конфигурации должна решаться следующая задача: минимизировать I при условиях (1)-(8), где неизвестны  $V_k, P_{гk}^*, P_{\Lambda i}^*, \delta_i, \varphi_k$ , а данными являются  $q_i, h_k, \beta_{ki}, a_i, P_{\Lambda i}^0, P_{гk}$ .

**П р и м е р.** Пусть энергосистема (фиг. 6) состоит из узлов, в которых находятся источники мощностей  $P_{г1}, P_{г2}, P_{г3}$ . Узлы соединены линиями электропередач с перетоками  $P_{\Lambda 1}, P_{\Lambda 2}, P_{\Lambda 3}$ . Напряжения в узлах имеют фазы  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ . Уравнения (1)-(7) для этой энергосистемы принимают вид

$$I = \sum_{i=1}^3 q_i (P_{\Lambda i}^* - P_{\Lambda i}^0)^2 + \sum_{k=1}^3 h_k V_k^2; \quad (1a)$$

$$P_{гk}^* = P_{гk} + V_k, \quad k=1,2,3; \quad (2a)$$

$$P_{г1}^* = P_{\Lambda 1}^* + P_{\Lambda 2}^*, \quad P_{г2}^* = P_{\Lambda 3}^* - P_{\Lambda 1}^*, \quad (3a)$$

$$P_{г3}^* = -P_{\Lambda 2}^* - P_{\Lambda 3}^*; \quad (4a)$$

$$V_1 + V_2 + V_3 = 0; \quad (5a)$$

$$P_{г1} + P_{г2} + P_{г3} = 0; \quad (6a)$$

$$P_{\Lambda i}^* = a_i \sin \delta_i, \quad i=1,2,3; \quad (7a)$$

$$\delta_1 = \varphi_1 - \varphi_2, \quad \delta_2 = \varphi_1 - \varphi_3, \quad \delta_3 = \varphi_2 - \varphi_3. \quad (7a)$$

Уравнения (1)-(7) могут быть записаны в матричной форме соответственно в виде уравнений (9)-(15)

$$I = (P^* - P^0)^T Q (P^* - P^0) + V^T N V; \quad (9)$$

$$P^* = P_g + V; \quad (10)$$

$$P^* = B P_{\Lambda}^*; \quad (11)$$

$$E V = 0; \quad (12)$$

$$E P_g = 0; \quad (13)$$

$$P^* = A \sin \delta; \quad (14)$$

$$\delta = B^T \varphi; \quad (15)$$

где  $P_{\Lambda}^*, P_{\Lambda}^0, V, P_g^*, P_g, \delta, \varphi$  - векторы с компонентами  $P_{\Lambda i}^*, P_{\Lambda i}^0, V_k, P_{гk}^*, P_{гk}, \delta_k, \varphi_k$  соответственно;

$Q, N, A$  - диагональные матрицы с компонентами  $q_i, h_k, a_i$  соответственно;

$E$  - вектор-строка единиц;

$T$  - знак транспонирования вектора или матрицы;

$B$  - матрица коэффициентов  $\beta_{ki}$ .

В частности, для нашего примера

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}; \quad B^T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Итак, для энергосистемы произвольной конфигурации должна решаться следующая задача математического программирования: минимизировать I при условиях (8)-(15). Для решения этой

задачи воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. При этом задача сводится к решению следующей системы уравнений: (8), (10)-(15) и

$$2Q(P_{\Lambda}^* - P_{\Lambda}^0) - B^T \eta + \delta = 0; \quad (17)$$

$$2N V + \eta + \xi E^T = 0; \quad (18)$$

$$-A(\delta^* \cos \delta) + \lambda = 0; \quad (19)$$

$$B \lambda = 0, \quad (20)$$

где  $\xi$  - неопределенный множитель Лагранжа, соответствующий условию (12);

$\eta$  - вектор неопределенных множителей Лагранжа, соответствующий условиям (10) и (11);

$\delta$  и  $\lambda$  - векторы неопределенных множителей Лагранжа, соответствующие условиям (14) и (15) (знаком \* в (19) обозначается покомпонентное умножение векторов  $\delta$  и  $\cos \delta$ ).

Уравнения (10) и (11) могут быть объединены в одно:

$$P_g + V = B P_{\Lambda}^*. \quad (21)$$

Уравнения (17) и (18) также могут быть объединены. Из (18) находим

$$-B^T \eta = 2B^T N V + \xi B^T E^T.$$

Но  $B^T E^T = 0$ , так как в каждой строке матрицы  $B^T$  содержится равно по одной "1" и "-1". Следовательно,

$$-B^T \eta = 2B^T N V.$$

Объединяя последнее уравнение с (17), получаем:

$$2Q(P_{\Lambda}^* - P_{\Lambda}^0) + 2B^T N V + \delta = 0. \quad (22)$$

Таким образом, задача минимизации I при условиях (8)-(15) эквивалентна решению системы уравнений [(8), (12), (14), (15), (19)-(22)]

относительно неизвестных  $P_{\Lambda}^*, V, P_g^*, \delta, \eta, \xi, \lambda$ .

Известными здесь являются матрицы  $Q, N, B, A$  и векторы  $P_{\Lambda}^0, P_g$ , причем последний удовлетворяет условию (13).

В частности, для нашего примера уравнения (19)-(22) приобретают вид

$$\left. \begin{aligned} -a_1 \delta_1 \cos \delta_1 + \lambda_1 &= 0; \\ -a_2 \delta_2 \cos \delta_2 + \lambda_2 &= 0; \\ -a_3 \delta_3 \cos \delta_3 + \lambda_3 &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (19a)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 + \lambda_2 &= 0; \\ \lambda_3 - \lambda_1 &= 0; \\ -\lambda_2 - \lambda_3 &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (20a)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{г1} + V_1 &= P_{\Lambda 1}^* + P_{\Lambda 2}^*; \\ P_{г2} + V_2 &= P_{\Lambda 3}^* - P_{\Lambda 1}^*; \\ P_{г3} + V_3 &= -P_{\Lambda 2}^* - P_{\Lambda 3}^*; \end{aligned} \right\} \quad (21a)$$

$$\left. \begin{aligned} 2q_1 (P_{\Lambda 1}^* - P_{\Lambda 1}^0) + 2h_1 V_1 - 2h_2 V_2 + \delta_1 &= 0; \\ 2q_2 (P_{\Lambda 2}^* - P_{\Lambda 2}^0) + 2h_1 V_1 - 2h_3 V_3 + \delta_2 &= 0; \\ 2q_3 (P_{\Lambda 3}^* - P_{\Lambda 3}^0) + 2h_2 V_2 - 2h_3 V_3 + \delta_3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (22a)$$

Таким образом, для этого примера система уравнений (23) приобретает вид уравнений (8), (4а), (6а), (7а), (19а)-(22а).

Рассмотрим систему уравнений, отличающуюся от (23) тем, что уравнение (20) заменено следующими двумя уравнениями:

$$\alpha = B\lambda, \quad (24)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -q\alpha, \quad (25)$$

где  $q$  - постоянный коэффициент.

Итак рассматривается система уравнений

$$[(8), (12), (14), (15), (19), (21), (22), (24), (25)]. \quad (26)$$

Очевидно,  $d\varphi/dt=0$  при  $\alpha=0$ . В этой точке процесс изменения  $\varphi$  прекращается и решения систем (23) и (26) совпадают.

Таким образом, установившееся решение системы уравнений (26) является решением системы уравнений (23).

В предлагаемом устройстве система уравнений (26) решается электрической цепью, являющейся моделью энергосистемы и, одновременно, физической моделью этой задачи.

Рассмотрим электрическую цепь (фиг. 7), которая должна быть образована в блоке 7 формирования управляющих воздействий имитаторами 9 и 10 и управляемыми источниками 16 тока первой группы для энергосистемы, изображенной на фиг. 6. В этой электрической цепи приняты следующие обозначения:

$r_k$  - сопротивление резистора 13, входящего в состав имитатора 9.k;

$R_i$  - сопротивление резистора 15, входящего в состав имитатора 10.i;

$I_{гk}$  - ток источника 11 тока, входящего в состав имитатора 9.k;

$I_{\Lambda k}^o$  - ток источника 14 тока, входящего в состав имитатора 10.i;

$I_{гk}$  - ток, протекающий через резистор  $r_k$ ;

$I_{Ri}$  - ток, протекающий через резистор  $R_i$ ;

$I_{\Lambda i}$  - ток источника 16.i тока, входящего в первую группу;

$e_i$  - напряжение источника 16.i тока, входящего в первую группу (положительное направление тока и напряжения

этого источника указано на фиг. 7 стрелкой для тока  $I_{\Lambda i}$  и знаками + и - для напряжения  $e_i$ ).

По первому закону Кирхгофа находим:

$$\left. \begin{aligned} I_{г1} + I_{г1} &= I_{\Lambda 1} + I_{\Lambda 2}; \\ I_{г2} + I_{г2} &= I_{\Lambda 3} - I_{\Lambda 1}; \\ I_{г3} + I_{г3} &= -I_{\Lambda 2} - I_{\Lambda 3}; \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$I_{г1} + I_{г2} + I_{г3} + I_{г1} + I_{г2} + I_{г3} = 0; \quad (30)$$

$$I_{\Lambda i} = I_{\Lambda i}^o + I_{Ri}. \quad (31)$$

Если кроме того, токи источников 11 тока выбраны так, что

$$I_{г1} + I_{г2} + I_{г3} = 0, \quad (32)$$

то из (30) и (32) следует, что

$$I_{г1} + I_{г2} + I_{г3} = 0. \quad (33)$$

По второму закону Кирхгофа находим:

$$\left. \begin{aligned} R_1 (I_{\Lambda 1} - I_{\Lambda 1}^o) + r_1 I_{г1} - r_2 I_{г2} + e_1 &= 0; \\ R_2 (I_{\Lambda 2} - I_{\Lambda 2}^o) + r_1 I_{г1} - r_3 I_{г3} + e_2 &= 0; \\ R_3 (I_{\Lambda 3} - I_{\Lambda 3}^o) + r_2 I_{г2} - r_3 I_{г3} + e_3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Рассмотрим еще электрическую цепь (фиг. 7), которая должна быть образована в блоке 7 формирования управляющих воздействий управляемыми источниками 17 тока второй группы и интеграторами 18 для энергосистемы, изображенной на фиг. 6. В этой электрической цепи приняты следующие обозначения:  $I_i$  - ток источника 17 тока, входящего во вторую группу;  $I_{ик}$  - ток интегратора 18;  $U_k$  - напряжение интегратора 18.

Очевидно,

$$\left. \begin{aligned} I_{и1} &= I_1 + I_2; \\ I_{и2} &= I_3 - I_1; \\ I_{и3} &= -I_2 - I_3. \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Обозначим через  $\Delta_i$  напряжения на источниках 17 тока (на фиг. 7 знаками + и - отмечены положительные направления этих напряжений, а стрелкой - положительное направление токов  $I_i$  этих источников).

Очевидно

$$\Delta_1 = U_2 - U_1; \quad \Delta_2 = U_3 - U_1; \quad \Delta_3 = U_3 - U_2. \quad (36)$$

Интеграторы 18-k устройства функционируют в соответствии с формулой

$$\frac{dU_k}{dt} = -GI_{ик}, \quad (37)$$

где  $G$  - постоянный коэффициент.

Блок 19 моделирования функционирует следующим образом.

Между двумя входами первого 20

и второго 21 усилителей включаются внешние источники напряжения  $e$  и  $\Delta$  соответственно. Усилители 20 и 21 передают эти напряжения на свои

выходы. Выход второго усилителя 21 подключен к входам синусоидального и косинусоидального преобразователей, которые преобразуют входное напряжение  $\Delta$  и выходные напряжения  $\sin \Delta$  и  $\cos \Delta$  соответственно. Источник 24 напряжения вырабатывает постоянное напряжение  $\mathcal{Q}$ ..

Первый умножитель 22 перемножает напряжения  $\sin \Delta$  (на первом входе),  $q$  (на втором входе) и вырабатывает на своем выходе их произведение. Таким образом, на первом выходе преобразователя 19.i возникает напряжение

$$x_i = a_i \sin \Delta_i \quad (38)$$

Второй умножитель 23 перемножает напряжения  $\cos \Delta$  (на первом входе),  $a$  (на втором входе),  $e$  (на третьем входе) и вырабатывает на своем выходе их произведение.

Таким образом, на втором выходе преобразователя 19.i возникает напряжение

$$y_i = a_i e_i \cos \Delta_i \quad (39)$$

Рассмотрим пример реализации функциональных преобразователей - синусного 25 и косинусного 26. Известно, что для энергетических расчетов можно принять

$$\sin \Delta \approx 0,855 - 0,094 \Delta^2 \dots$$

Отсюда следует, что

$$\cos \Delta \approx 1 - 0,366 \Delta^2.$$

Эти формулы содержат операции вычитания и умножения и поэтому соответствующие функциональные преобразователи могут быть реализованы на блоках вычитания и умножения.

Таким образом, электрическая схема (фиг. 7) функционирует в соответствии с формулами (29)-(39).

В установившемся режиме

$$\frac{dU_k}{dt} = 0, \quad (40)$$

$$\text{т.е. } I_{ик} = 0 \quad (41)$$

и, как следует из (35),

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 &= 0; \\ I_3 - I_1 &= 0; \\ -I_2 - I_3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Таким образом, электрическая схема (фиг. 7) реализует в установившемся режиме формулы (29), (33), (34), (36), (38), (42).

Если в этих формулах переобозначить величины

$$e_i, r_k, R_i, I_{гк}, I_{\Lambda_i}^0, I_{гк}, I_{R_i}, I_{\Lambda_i}, I_i, I_{ик}, U_k, \Delta_i, x_i, y_i, \dots$$

соответственно на

$$b_i^0, h_k, q_i, P_{гк}, P_{\Lambda_i}^0, V_k, (P_{\Lambda_i}^* - P_{\Lambda_i}^0), P_{\Lambda_i}^*, \lambda_i, \alpha_k, \varphi_k, \delta_i, P_{\Lambda_i}^*, \lambda_i,$$

то перечисленные формулы превратятся соответственно в формулы (21a), (4a), (22a), (7a), (6a), (19a), (20a). Следовательно, задача, решаемая электрическими схемами (фиг.7), эквивалентна задаче, которую необходимо решить для регулирования перетоков в энергосистеме, изображенной на фиг. 6.

В общем случае, электрическая схема, образуемая в блоке 7 формирования управляющих воздействий, описывается следующей системой уравнений:

$$I_r + I_r = B I_{\Lambda}; \quad (43)$$

$$E(I_r + I_r) = 0; \quad (44)$$

$$B(I_{\Lambda} - I_{\Lambda}^0) - B^T r I_r + e = 0; \quad (45)$$

$$I_{ик} = B I_i; \quad (46)$$

$$\Delta = B^T U; \quad (47)$$

$$\frac{dU}{dt} = -G I_{ик}; \quad (48)$$

$$x = A \sin \Delta; \quad (49)$$

$$y = A(e * \cos \Delta); \quad (50)$$

где  $I_r, I_r, I_{\Lambda}, I_{ик}, I, U, \Delta, x, y, I_{\Lambda}^0$  векторы с компонентами  $I_{гк}, I_{гк}, I_{\Lambda_i}, I_{ик}, I_i, U_k, \Delta_i, x_i, y_i, I_{\Lambda_i}^0$  соответственно.

Как будет показано, токи  $I_{гк}$  устанавливаются таким образом, что

$$E I_r = 0. \quad (51)$$

При этом из (44) и (51) следует, что

$$E I_r = 0. \quad (52)$$

Кроме того, будет показано, что

$$U_i = 0. \quad (53)$$

Пусть  $d$  - постоянный коэффициент и

$$I_{гк} = d P_{гк}; \quad (54)$$

$$I_{гк} = d V_k; \quad (55)$$

$$I_{\Lambda_i}^0 = d P_{\Lambda_i}^0; \quad (56)$$

$$I_{\Lambda_i} = d P_{\Lambda_i}^*; \quad (57)$$

$$R_i = 2q_i / d^2; \quad (58)$$

$$r_k = 2h_k / d^2; \quad (59)$$

$$e_i = \delta_i / d; \quad (60)$$

$$I_{ик} = \alpha_k; \quad (61)$$

$$\Delta_i = \delta_i; \quad (62)$$

$$U_k = \varphi_k; \quad (63)$$

$$G = q; \quad (64)$$

$$x_i = P_{\Lambda_i}^*; \quad (65)$$

$$y_i = \lambda_i / d; \quad (66)$$

$$I_i = \lambda_i. \quad (67)$$

При этом уравнения (8), (13), (12) (14), (15), (19), (21), (22), (24), (25) полностью эквивалентны соответственно уравнениям (53), (51), (52), (49), (47), (50), (43), (45), (46), (48), т.е. в электрической цепи устройства решается задача (26), реше-

ние которой в установившемся режиме совпадает с решением задачи (23), т.е. с решением задачи минимизации  $I$  при условиях (8)-(15).

Устройство в целом функционирует следующим образом.

Из блока 2 телеизмерений на управляющие входы источников 11 тока поступают величины  $P_{гк}$ , устанавливая величину тока  $I_{гк}$  этих источников в соответствии с (54). Величины  $P_{гк}$  удовлетворяют соотношению (13) и, следовательно, выполняется условие (51). Из блока 8 расчета фактических уставок и весовых коэффициентов на управляющие входы источников 14 тока подаются величины  $P_{Ai}^0$ , устанавливая величину тока  $I_{Ai}$  этих источников в соответствии с (56).

Кроме того, из блока 8 расчета фактических уставок и весовых коэффициентов на управляющие входы резисторов 13 и 15 подаются величины весовых коэффициентов  $h_k$  и  $q_i$ , соответственно, устанавливая величины сопротивлений  $r_k$  и  $R_i$  этих резисторов в соответствии с (58) и (59).

У интегратора 18-1, соответствующего базовому узлу, коэффициент  $G_i = 0$ .

Поэтому  $dU_i/dt = 0$  и напряжение на интеграторе 18.1 не изменяется, т.е. выполняется соотношение (53). Напряжения на других интеграторах 18-к изменяются в соответствии с (48). Процесс этого изменения проследим, начиная с того момента  $t_0$ , когда

$$U = U(t_0), \quad e = e(t_0).$$

В зависимости от  $U$  устанавливаются  $\Delta$  (47). Напряжения  $\Delta$  и  $e$  поступают на входы блоков 19.i, которые на своих выходах вырабатывают напряжения  $X$  и  $Y$  (49) и (50). Эти напряжения поступают на управляющие входы управляемых источников тока 16.i и 17.i, устанавливая величины токов этих источников

$$I_{Ai} = dX_i; \quad I_i = dY_i.$$

Таким образом, удовлетворяются соотношения (57), (65)-(67).

При образованных таким образом токах  $I_r$ ,  $I_\Lambda$ ,  $I_\Lambda^0$ ,  $I$  в электрической цепи устройства решаются уравнения (43)-(46) и устанавливаются токи  $I_r$ ,  $I_\Lambda$ , а также новые значения напряжений  $e$ . Напряжения  $U$  также изменяют свое значение по (48). По новым значениям  $U$  и  $e$  вновь устанавливаются

ливаются  $\Delta$ ,  $X$ ,  $Y$  и т.д. Процесс продолжается до тех пор, пока токи  $I_i \neq 0$ .

При  $I_i = 0$  переходный процесс прекращается. При этом на интеграторах 18 устанавливаются напряжения  $U$ , численно равные фазам реальных узловых напряжений (63). Напряжения на источниках 17 тока оказываются численно равными сдвигам фаз  $\delta$  соседних узлов (62). В резисторах 13 устанавливаются токи  $I_r$ . Эти токи протекают также через усилители 12 (с малым входным сопротивлением). Таким образом, сигналы на выходах усилителей 12 оказываются пропорциональными управлениям  $V_k$  (55). Эти сигналы подаются на входы блока 6 корректирующих фильтров. Заметим, что блок 6 выбирается известным в технике автоматического регулирования образом из соображений обеспечения необходимого качества динамического процесса регулирования (устойчивости, быстродействия, величины перерегулирования).

Сигналы с выхода блока 6 корректирующих фильтров поступают через канал 4 в энергосистему 1 для изменения мощности регулирующих объектов. В результате этого меняются текущие значения регулируемых параметров энергосистемы. После следующего цикла измерения соответствующие телесигналы вновь подаются на управляющие входы источников 11 и 14 тока, в результате чего образуется замкнутый контур системы регулирования.

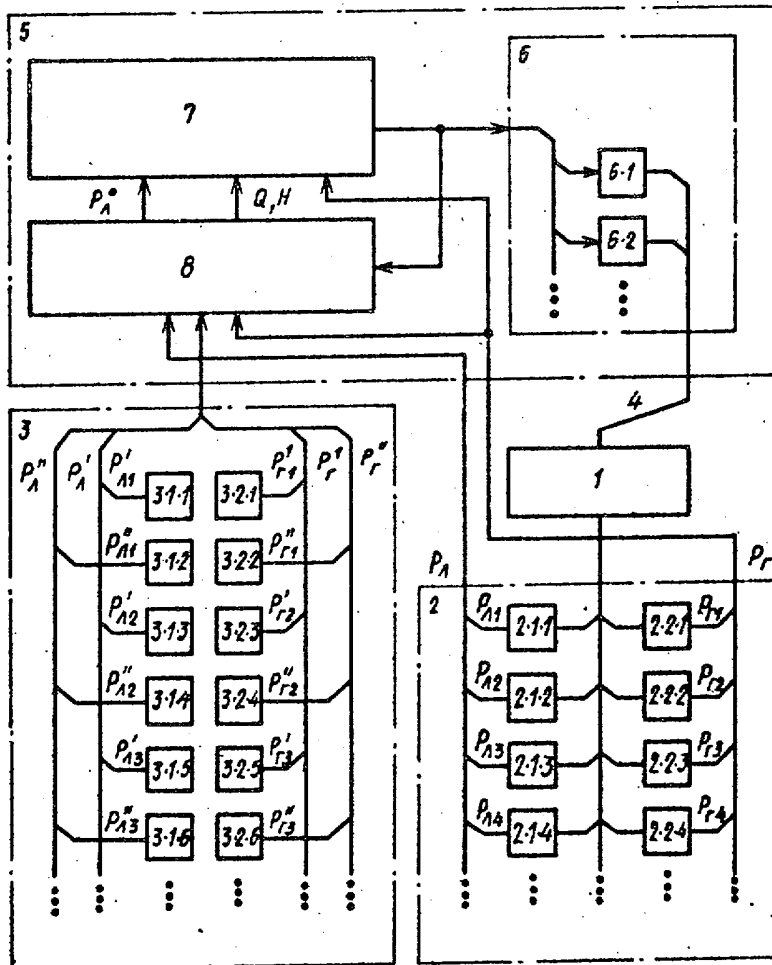
#### Формула изобретения

1. Устройство автоматического регулирования перетоков активной мощности в энергосистеме по авт. св. № 1164822, отличающееся тем, что, с целью повышения точности регулирования путем уменьшения флуктуаций мощности, в блок формирования управляющих воздействий дополнительно введены две группы управляемых источников тока, число которых в каждой группе равно числу имитаторов линии электропередач, группа интеграторов, число которых равно числу имитаторов узлов энергосистемы, и группа блоков моделирования зависимости перетоков активной мощности по линии электропередач от разности фаз узловых напряжений, число которых равно числу имитаторов линии электропере-

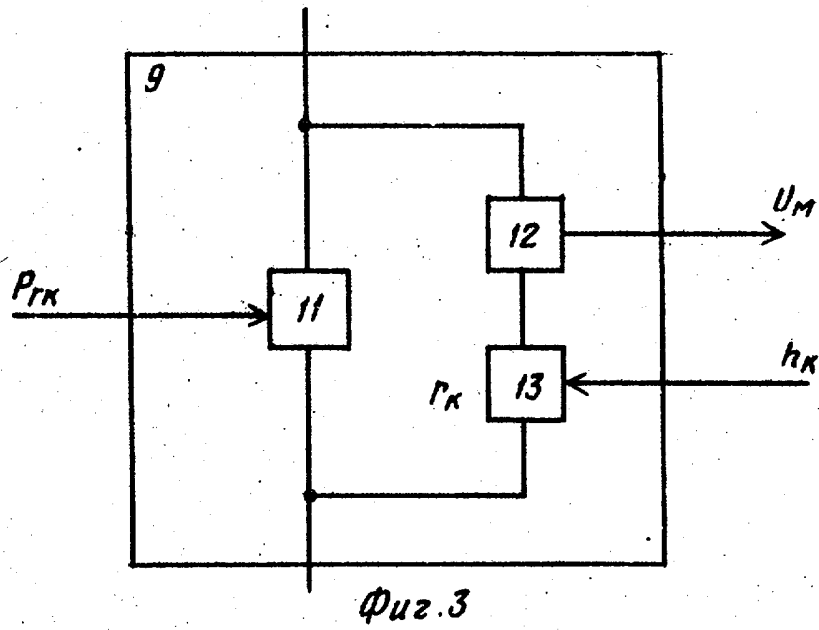


дач, при этом последовательно с каждым имитатором линии электропередач включен один из управляемых источников тока первой группы, управляемые источники тока второй группы и интеграторы соединены между собой аналогично соединению концов имитируемых линий электропередач с имитируемыми узлами энергосистемы, причем каждая пара управляемых источников тока, в которой один из них принадлежит первой группе, другой - второй группе, а оба соответствуют одной и той же имитируемой линии электропередач, подключена к одному из указанных блоков моделирования так, что первый двухпроводный его вход включен параллельно управляемому источнику тока первой группы, второй двухпроводный вход - управляемому источнику тока второй группы, первый его выход соединен с управляющим входом управляемого источника тока первой группы, второй выход - с управляющим входом управляемого источника тока второй группы.

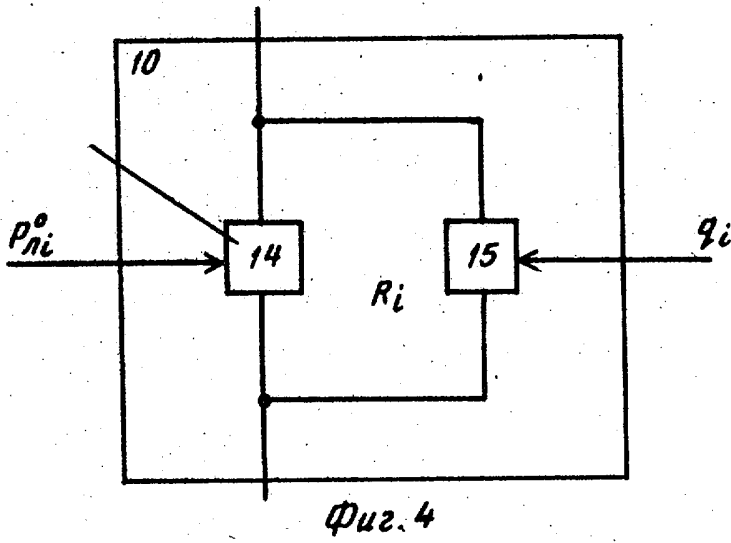
2. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что каждый блок моделирования зависимости потоков активной мощности по линии электропередач от разности фаз узловых напряжений содержит два усилителя, два умножителя, источник постоянного напряжения, синусоидальный и косинусоидальный преобразователи, причем два входа первого и второго усилителей являются соответственно первым и вторым двухпроводными входами блока в целом, выход второго усилителя подключен к входам синусоидального и косинусоидального преобразователей, выход каждого из которых подключен к первому входу соответственно первого и второго умножителей, к вторым входам этих умножителей подключен источник постоянного напряжения, а к третьему входу второго умножителя присоединен выход первого усилителя, при этом выходы первого и второго умножителей являются соответственно первым и вторым выходами блока в целом.



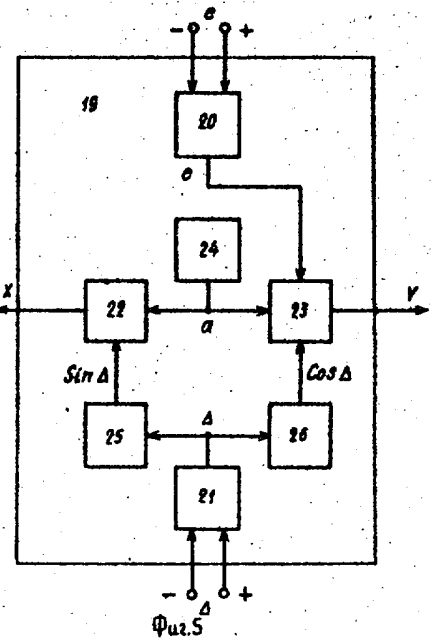
Фиг. 1



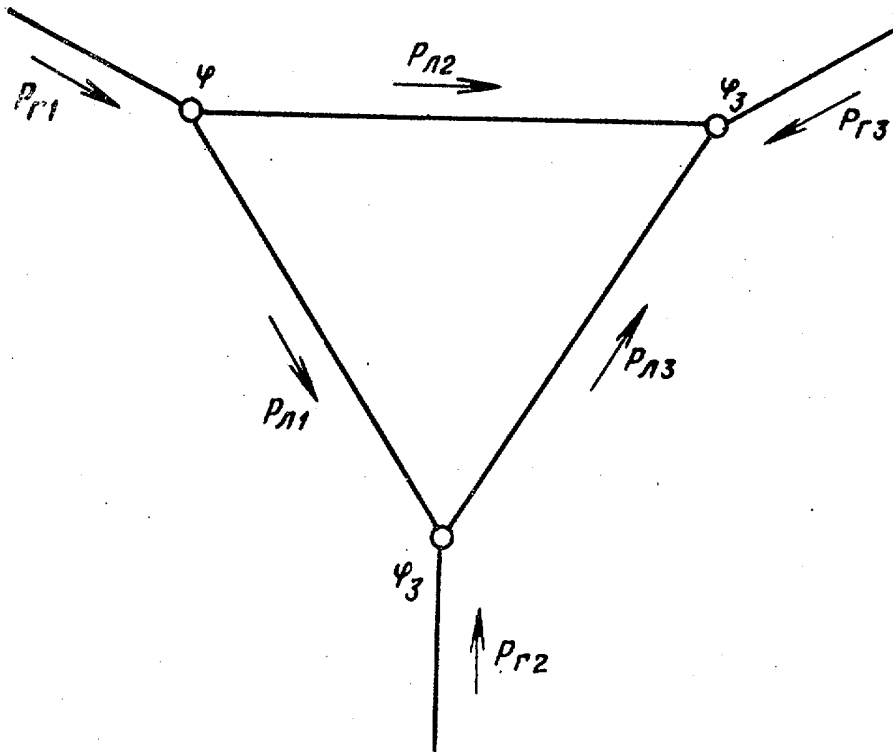
$\varphi_{uz.3}$



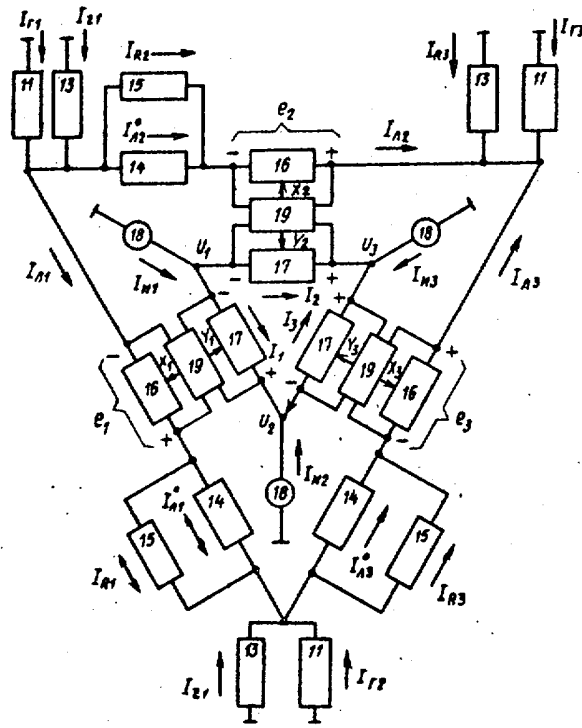
$\varphi_{uz.4}$



$\varphi_{uz.5}$



Фиг. 6



Фиг. 7