

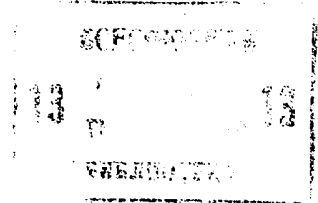


(51)4 Н 02 J 3/06

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

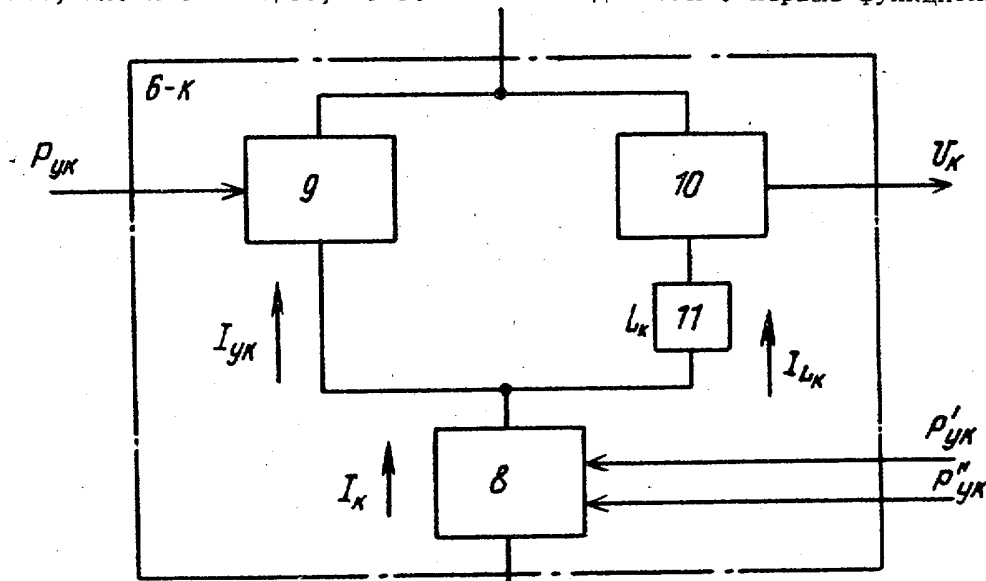
К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ



- (21) 3996964/24-07
- (22) 29.12.85
- (46) 07.05.88. Бюл. № 17
- (71) Всесоюзный государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт энергетических систем и электрических сетей "Энергосетьпроект"
- (72) С. И. Хмельник
- (53) 621.316.728(088.8)
- (56) Авторское свидетельство СССР № 1089698, кл. Н 02 J 3/06, 1984.
Авторское свидетельство СССР № 1197004, кл. Н 02 J 3/06, 1984.
Авторское свидетельство СССР № 1164822, кл. Н 02 J 3/06, 1985.
Авторское свидетельство СССР № 1354335, кл. Н 02 J 3/06, 1984.
Авторское свидетельство СССР № 1257744, кл. Н 02 J 3/06, 1985.

(54) УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

(57) Изобретение относится к области электроэнергетики. Цель изобретения - упрощение устройства и повышение точности регулирования. Устройство содержит блоки телеизмерений генерируемых мощностей, задатчиков уставок по перетокам мощности и генерируемым мощностям, которые подключены к входам блока формирования управляющих воздействий. В состав блока формирования управляющих воздействий входят имитаторы узлов энергосистемы и имитаторы линий электропередачи. Первые управляющие входы всех имитаторов узлов энергосистемы образуют первый вход блока формирования управляющих воздействий. Первые функциональные



Фиг. 3

(19) **SU** (11) **1394326** **A1**

входы всех имитаторов узлов объединены. Вторые функциональные входы имитаторов, узлов энергосистемы и вторые функциональные входы имитаторов линий электропередачи соединены между собой аналогично соединению концов линий электропередач с узлами энергосистемы. Каждый имитатор линии электропередач выполнен в виде включенного между его функциональными входами ограничителя тока с двумя управляющими входами, подключенными к задатчикам уставок по перетокам мощности. Каждый имитатор 6 узла энергосистемы содер-

жит включенные последовательно между его функциональными входами ограничитель тока 8 с двумя управляющими входами, подключенными к задатчикам уставок по генерируемым мощностям, управляемый источник тока 9, усилитель 10 и индуктивность 11. Управляющий вход источника тока 9 подключен к блоку телеизмерений генерируемых мощностей. Благодаря введению индуктивностей в имитаторы узлов энергосистемы моделируется динамика изменения мощности энергосистемы при воздействии на нее регуляторов. 5 ил.

1

Изобретение относится к электроэнергетике.

Цель изобретения - упрощение устройства и повышение точности регулирования.

На фиг. 1 изображено предлагаемое устройство; на фиг. 2 - блок формирования управляющих воздействий; на фиг. 3 - имитатор узла энергосистемы; на фиг. 4 - имитатор линии электропередачи; на фиг. 5 - ограничитель тока.

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 регулируемых объектов связан своим выходом блок 5 формирования управляющих воздействий. Входы этого блока присоединены к выходам блока 2 телеизмерений регулируемых параметров и блока 3 задатчиков уставок.

Блок 2 телеизмерений состоит из отдельных датчиков 2-1, 2-2, ... генерируемых мощностей. Блок 3 задатчиков уставок состоит из задатчиков 3-1-1, 3-1-2, ... уставок по перетокам мощности и задатчиков 3-2-1, 3-2-2, ... уставок по генерируемым мощностям.

Множество выходов датчиков 2-1, 2-2, ... называют выходом блока 2 телеизмерений. Аналогично, множество выходов задатчиков 3-1-1, 3-1-

2

-2, ... 3-2-1, 3-2-2, ... называют выходом блока 3 задатчиков уставок.

Блок 5 формирования управляющих воздействий (фиг. 2) выполнен из имитаторов 6-1, 6-2, ..., 6-k, ... и имитаторов 7-1, 7-2, ..., 7-i, ..., линий электропередач, количество которых определяется количеством узлов и линий электропередач энергосистемы. Каждый имитатор 7 линий электропередач имеет два функциональных и два управляющих входа, а каждый имитатор 6 узла энергосистемы имеет два функциональных входа, три управляющих входа и управляющий выход, причем эти выходы образуют в совокупности выход блока 5 формирования управляющих воздействий в целом. Первые управляющие входы всех имитаторов 6 узлов энергосистемы образуют в совокупности первый вход блока 5 формирования управляющих воздействий, связанный с выходом блока 2 телеизмерений. Первые функциональные входы всех имитаторов 6 узлов энергосистемы объединены. Вторые функциональные входы этих имитаторов 6 и первый и второй функциональные входы всех имитаторов 7 линий электропередач соединены между собой аналогично соединению концов имитируемых линий электропередач с имитируемыми узлами энергосистемы: каждая линия электропередач имитируется одним из имитаторов 7-i, а каждый узел энергосистемы имитируется одним из имитаторов 6-k.

Каждый имитатор 6 узла энергосистемы (фиг. 3) содержит включенные последовательно между его функциональными входами ограничитель 3 тока с двумя управляющими входами и управляемый источник 9 тока, параллельно которому включены последовательно соединенные усилитель 10 и индуктивность 11.

Каждый имитатор 7 линии электропередачи (фиг. 4) выполнен в виде включенного между его функциональными входами ограничителя тока с двумя управляющими входами.

Управляющие входы ограничителей 8 тока во всех имитаторах 6 и 7 образуют в совокупности второй управляющий вход блока 5 формирования управляющих воздействий в целом, соединенный с выходом блока 3 задатчиков уставок.

Ограничитель тока (фиг. 5) содержит два соединенных последовательно управляемых источника 12 и 13 тока, параллельно каждому из которых присоединены диоды 14 и 15, включенные в противоположных направлениях относительно друг друга, причем управляющие входы управляемых источников 12 и 13 тока являются управляющими входами ограничителя тока в целом. Источники 9, 12 и 13 тока, используемые в устройстве, вырабатывают ток постоянной величины, не зависящий от напряжения на зажимах этого источника и определяемый сигналом на его управляющем входе.

Задача регулирования перетоков активной мощности в энергосистеме без кольцевых связей имеет следующую математическую формулировку:

$$I = \sum_{k=1}^n h_k V_k^2; \quad (1)$$

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

$$P_{yk}^* = \sum_{i=1}^p \beta_{ki} P_{\lambda i}^*; \quad (3)$$

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

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

$$P_{\lambda i}^I \leq P_{\lambda i}^* \leq P_{\lambda i}^{II}; \quad (6)$$

$$P_{yk}^I \leq P_{yk}^* \leq P_{yk}^{II}; \quad (7)$$

где V_k - управления, вырабатываемые устройством;
 P_{yk} - измеренные узловые мощности;
 P_{yk}^* - узловые мощности, которые установятся после отработки управлений;
 $P_{\lambda i}^*$ - перетоки мощности, которые установятся после отработки управления;
 P_{yk}^I, P_{yk}^{II} - предельные значения (наименьшее и наибольшее соответственно) узловых мощностей P_{yk} , задаваемые в блоке задатчиков уставок;
 $P_{\lambda i}^I, P_{\lambda i}^{II}$ - то же для перетоков мощностей $P_{\lambda i}$, причем $\beta_{ki} = (0, 1-1)$ в зависимости от соединения k -го узла с i -й линией электропередачи и от направления перетока, принятого за положительное.

В отличие от известного здесь и далее узловые мощности обозначаются символом P_{yk} для отличия их от генерируемых мощностей $P_{гk}$ и мощностей нагрузки P_n , причем

$$P_{yk} = P_{гk} - P_n. \quad (8)$$

Кроме того, имеет место уравнение

$$P_{yk}(t) = \sum_{k=1}^n \beta_{ki} P_{\lambda i}(t) \quad (9)$$

аналогично уравнению (3), т.е. в любой момент времени t узловая мощность равна сумме перетоков по линиям передач, сходящимся в данном узле.

В дальнейшем полагают, что узлы подразделяются на генерирующие, где $P_{yk} = P_{гk}$, и нагрузочные, где $P_{yk} = -P_{nk}$, причем в имитаторах 6 нагрузочных узлов усилителя 10, индуктивности 11 и ограничителя 8 отсутствуют.

Математическая модель (1)-(7) не учитывает динамику процесса регулирования и поэтому в известном устройстве применяются корректирующие фильтры, которые обеспечивают необходимые качества динамического процесса регулирования - устойчивость, быстрое действие, величину перерегулирования. В предлагаемом устройстве эти фильтры отсутствуют, а математическая формулировка задачи регулиро-

вания учитывает дополнительно требования по стабилизации частоты в переходный период регулирования и заключается в следующем.

В энергосистеме узловые мощности $P_{yк}(t)$ и потоки $P_{лi}(t)$ в каждый момент времени t связаны соотношением (9). Регулятор в каждый момент времени t вырабатывает производную $\dot{P}_{гк}(t)$ по времени от генерируемой в k -м узле мощности $P_{гк}(t)$. Энергосистема реализует эту производную, т.е.

$$P_{гк}(t) = P_{гк}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{P}_{гк} dt. \quad (10) \quad 15$$

Регулирование необходимо выполнять таким образом, чтобы при начальном условии

$$\sum_{k=1}^n P_{yк}(t_0) = 0 \quad (11) \quad 20$$

ограничении

$$\sum_{k=1}^n \dot{P}_{yк}(t) = 0 \quad (12) \quad 25$$

и ограничителях (6), (7) и (9) минимизировался функционал вида

$$\varphi = \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n h_k \dot{P}_{yк}^2 dt, \quad (13) \quad 30$$

где t_0 - начальный момент времени;

t - текущий момент времени;

h_{ki}, β_{ki} - коэффициенты, аналогичные коэффициентам в задаче (1)-(7), причем для нагруженных узлов $h_k = 0$.

Итак, должна решаться задача

$$[(6), (7), (9), (11), (12), (13)], \quad 14) \quad 40$$

В этой задаче уравнение (1) соответствует уравнению (4), уравнение (12) отражает требование постоянства частоты в переходный период, а минимизация функционала (13) соответствует минимизации скоростей $\dot{P}_{гк}$ изменения генерируемых мощностей. Ограничения (7) относятся только к генерирующим узлам.

Таким образом, регулирование потоков является вариационной задачей (14) минимизации функционала (13) при наличии ограничений в виде равенств и неравенств, где неизвестны $P_{лi}, P_{гк}, \dot{P}_{гк}$, а данными являются

$P_{гк}, P'_{гк}, P''_{гк}, P'_{лi}, P''_{лi}$ и коэффициенты h_k и β_{ki} . Эта задача решается электрической цепью, являющейся моделью энергосистемы и, одновременно, физической моделью этой задачи. Эта электрическая цепь образуется в блоке 5 формирования управляющих воздействий и имеет следующие компоненты и параметры: $I_{yк}$ - ток управляемого напряжения источника 9 тока (ИТУН), входящего в состав имитатора 6-к узла энергосистемы; L_k - индуктивность 11, входящая в состав имитатора 6-к генерирующего узла энергосистемы; $I_{i,k}$ - ток, протекающий через индуктивность L_k и усилитель 10, входящие в состав имитатора 6-к узла энергосистемы; I_k - ток, протекающий через ограничитель 8 тока (ОТ_к), входящий в состав имитатора 6-к узла энергосистемы; $I_{лi}$ - ток, протекающий через ограничитель тока (ОТ_i), входящий в состав имитатора 7- i линии электропередач.

В этой цепи соблюдается первый закон Кирхгофа, т.е.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0; \quad (15) \quad 30$$

$$I_k = I_{yк} + I_{Lk}; \quad (16) \quad 40$$

$$I_k = \sum_{i=1}^{\ell} \beta_{ki} I_{лi}. \quad (17) \quad 45$$

Последнее соотношение следует из (3) и того, что конфигурация электрической цепи повторяет конфигурацию энергосистемы. Уравнение (15) следует из того, что первые функциональные входы всех имитаторов 6-к объединены. Наконец, уравнение (16) следует из схемы имитатора 6-к (фиг. 3).

Рассмотрим теперь ограничитель тока (фиг. 5), где i - ток, протекающий через ограничитель тока в целом; i_1, i_2 - токи, управляемых напряжением источников тока ИТУН₁, 12 и ИТУН₂, 13 соответственно, d_1, d_2 - токи, протекающие через диоды D_1 , 14 и D_2 , 15 соответственно.

Очевидно,

$$i = i_1 + d_1; \quad (18) \quad 50$$

$$i = i_2 - d_2; \quad (19) \quad 55$$

$$d_1 \geq 0 \quad (20)$$

$$d_2 \geq 0 \quad (21)$$

Из (18) - (21) следует, что

$$i_1 \leq i \leq i_2 \quad (22)$$

Для ограничителей тока ОТ_к 8 и ОТ_г 7 обозначают токи i , i_1 , i_2 соответственно через I_k , I_k' , I_k'' и I_{Λ_i} , I_{Λ_i}' и I_{Λ_i}'' .

Тогда из (22) получают

$$I_k' \leq I_k \leq I_k'' \quad (23)$$

$$I_k' \leq I_{\Lambda_i} \leq I_{\Lambda_i}'' \quad (24)$$

Устройство функционирует следующим образом.

Из блока 2 телеизмерений на управляющие входы источников 9-к тока поступают величины P_{y_k} , устанавливая величину тока этих источников

$$I_{y_k} = \frac{1}{\alpha} P_{y_k}, \quad (25)$$

где α - данный коэффициент.

Из блока 3 задатчиков уставок на управляющие входы источников 12 и 13 тока, входящих в состав ограничителей 8 тока, поступают величины уставок P_{y_k}' , P_{y_k}'' , P_{Λ_i}' , P_{Λ_i}'' соответственно. Эти величины устанавливают токи

$$I_k' = \frac{1}{\alpha} P_{y_k}'; \quad I_k'' = \frac{1}{\alpha} P_{y_k}'';$$

$$I_{\Lambda_i}' = \frac{1}{\alpha} P_{\Lambda_i}'; \quad I_{\Lambda_i}'' = \frac{1}{\alpha} P_{\Lambda_i}'' \quad (26)$$

Сигналы с выхода усилителей (УС_к)

$$V_k = -\alpha I_{L_k} \quad (27)$$

поступают на выход блока 5 формирования управляющих воздействий, откуда через канал 4 направляется в энергосистему 1 для изменения мощности $P_{гк}$ регулирующих объектов. Эти мощности за время (период телеизмерения и выдачи управляющих воздействий) изменяются на величину V_k . Кроме того, за это же время мощности нагрузки $P_{нк}$ также изменяются. Новые значения узловых генерирующих мощностей принимают значение

$$P_{гк}(t+\tau) = P_{гк}(t) + V_k(t) \quad (28)$$

В зависимости от этого изменяются также текущие значения регулируемых перетоков P_{Λ_i} (формула 9). После следующего цикла измерения соответствующие телесигналы вновь подаются на входы ИТУН 9, в результате чего обрывается замкнутый контур системы регулирования.

Сравнивая (25), (27) и (28), замечают, что для имитаторов генерирующих узлов

$$I_{y_k}(t+\tau) = I_{y_k}(t) - I_{L_k}(t) \quad (29)$$

Из (16) следует, что

$$I_k(t+\tau) - I_k(t) = I_{гк}(t+\tau) - I_{гк}(t) + I_{L_k}(t+\tau) - I_{L_k}(t) \quad (30)$$

Совмещая (29) и (30), находят, что в имитаторах генерирующих узлов

$$I_k(t+\tau) - I_k(t) = I_{L_k}(t+\tau) - 2 I_{L_k}(t) \quad (31)$$

При малых τ можно считать, что

$$I_k(t+\tau) - I_k(t) = \tau \dot{I}_k(t),$$

$$I_{L_k}(t+\tau) - I_{L_k}(t) = \tau \dot{I}_{L_k}(t).$$

Учитывая, эти соотношения, из (31) находят

$$\tau \dot{I}_k(t) = \tau \dot{I}_{L_k}(t) - I_{L_k}(t) \quad (32)$$

Ток в индуктивности изменяется медленно, поэтому можно принять допущение

$$|\tau \dot{I}_{L_k}(t)| \ll |I_{L_k}(t)|,$$

откуда получают

$$\dot{I}_k(t) = -\frac{1}{\tau} I_{L_k}(t) \quad (33)$$

Напряжение на индуктивности 11 и на ИТУН_к 9 (входным сопротивлением УС_к 10 пренебрегают)

$$e_k = -L_k \dot{I}_{L_k} \quad (34)$$

Из (33) и (34) следует, что на ИТУН_к 9 присутствует напряжение

$$e_k = S_k \ddot{I}_k, \quad (35)$$

где

$$S_k = L_k / \tau \quad (36)$$

Таким образом, часть имитатора 6-к генерирующего узла, состоящая из элементов 9 - 11, соединенных с k-м узлом энергосистемы 1 цепями прямой и обратной связью, описывается уравнением (35). Для краткости дальнейшего изложения эту часть называют супериндуктивностью S_k .

Имитатор генерирующего узла 6-к можно считать состоящим из последовательно соединенных супериндуктивности S_k и OT_k 8-к. Электрическая цепь блока 5 формирования управляющих воздействий в целом также содержит только супериндуктивности S_k , источники 9-к тока в имитаторах 6-к нагрузочных узлов, ограничители 8-к тока. Ограничители состоят из диодов и источников постоянного тока. Следовательно, электрическая цепь устройства содержит только супериндуктивности, диоды и источники тока.

Далее показано, что такая электрическая цепь решает вариационную задачу минимизации функционала

$$F = \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n S_k \dot{I}_k^2 dt \quad (37)$$

при ограничениях, накладываемых на токи I_k супериндуктивностей первым законом Кирхгофа и требованием положительности диодных токов. В нашем случае эти ограничения имеют вид (15), (17), (23) и (24). Следовательно, электрическая цепь устройства решает задачу

$$[(15), (17), (23), (24), (37)]. \quad (38)$$

Покажем, что эта задача эквивалентна задаче (14), которую должно решать предлагаемое устройство.

Полагая, что управляющие воздействия V_k реализуются равномерно за время τ , находят

$$\dot{P}_{гk}(t) = \frac{1}{\tau} V_k(t) \quad (39)$$

или, учитывая (27) и (33),

$$\dot{P}_{гk}(t) = \alpha \dot{I}_k(t). \quad (40)$$

Для нагрузочных узлов аналогичное (но строгое) равенство следует из (25), так как в соответствующих имитаторах 6-к индуктивности 11 и усилителя 10 отсутствуют. Таким образом,

$$\dot{P}_{гk}(t) \approx \alpha \dot{I}_k(t). \quad (41)$$

Функционирование устройства начинается с того, что в момент времени t_0 измеряются $P_{гk}(t_0)$ и в соответствии с (25) устанавливаются $I_{гk}(t_0)$. Величины $P_{гk}(t_0)$ удовлетворяют условию (11). Токи через индуктивность в момент включения равны нулю, т.е.

$$I_{Lk}(t_0) = 0 \quad (42)$$

и

$$I_k(t_0) = i_{гk}(t_0). \quad (43)$$

Следовательно,

$$\sum_{k=1}^n I_k(t_0) = 0 \quad (44)$$

Из (15) и (44) следует, что

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k(t_0) = 0. \quad (45)$$

Из (11) и (15) следует (44) и (45).

Для нагрузочных узлов $I_k = I_{гk}$ и, как следует из (25),

$$I_k(t) = \frac{1}{\alpha} P_{гk}(t). \quad (46)$$

Для генерирующих узлов равенство (46) следует приближенно из (25), (43) и (40). Из (9), (16) и (46) следует, что

$$I_{\lambda i}(t) = \frac{1}{\alpha} P_{\lambda i}(t). \quad (47)$$

Таким образом, токи I_k , $I_{\lambda i}$, \dot{I}_k , \dot{I}'_k , \dot{I}''_k , $\dot{I}'_{\lambda i}$, $\dot{I}''_{\lambda i}$ отличаются от мощностей $P_{гk}$, $P_{\lambda i}$, $\dot{P}_{гk}$, $\dot{P}_{гk}$, $\dot{P}_{гk}$, $\dot{P}'_{\lambda i}$, $\dot{P}''_{\lambda i}$ только множителем $1/\alpha$. Положим еще

$$L_k = \frac{1}{\alpha} \tau h_k. \quad (48)$$

Тогда

$$S_k = h_k/\alpha. \quad (49)$$

При этом формулы (6), (7), (9), (11) - (13) отличаются от формул (24), (23), (17), (44), (45) и (37) только

множителем $1/\alpha$. Следовательно, задачи (14) и (38) совпадают. Единственным требованием для этого является выполнение условия (11), при котором (как показано) уравнение (15) в задаче (38) может быть заменено на уравнения (44) и (45).

Остается доказать принятое ранее предложение о том, что электрическая цепь с супериндуктивностями, источниками тока и диодами решает вариационную задачу.

Электрическая цепь, содержащая источники напряжения и тока и диоды, описывается системой уравнений вида

$$N_H I_H + N_C I_C + N_D I_D = 0; \quad (50)$$

$$N_H^T \varphi = e_H; \quad (51)$$

$$N_C^T \varphi = e_C; \quad (52)$$

$$N_D^T \varphi = -e_D; \quad (53)$$

$$I_D^T e_D = 0; \quad (54)$$

$$I_D \geq 0; \quad (55)$$

$$e_D \leq 0; \quad (56)$$

где (50) является уравнением первого закона Кирхгофа, а

I_H, I_C, I_D - векторы токов источников напряжения, источников тока и диодов соответственно;

e_H, e_C, e_D - векторы напряжений на этих же элементах;

φ - вектор потенциалов в узлах электрической цепи;

N_H, N_C, N_D - матрицы из элементов 0, 1, -1; их конфигурация определяется конфигурацией электрической цепи;

T - знак транспортирования матрицы.

В нашей электрической цепи роль источника напряжения играет супериндуктивность, для которой имеет место соотношение (35). Следовательно,

$$e_H = S \dot{I}_H, \quad (57)$$

где S - диагональная матрица с компонентами S_k или, как следует из (51) и (57)

$$N_H^T \varphi = S \dot{I}_H. \quad (58)$$

Уравнение (52) может быть исключено, так как вектор e_C не входит в другие соотношения. Поэтому наша электрическая цепь описывается системой уравнений

$$[(50), (53) - (56), (58)]. \quad (59)$$

Необходимо доказать, что решение этой системы эквивалентно решению вариационной задачи вида: минимизировать функционал

$$F = \int_{t_0}^t \dot{I}_H^T S \dot{I}_H dt \quad (60)$$

при ограничениях (50) и (55).

В соответствии с методом множителей Лагранжа эта задача эквивалентна минимизации функционала

$$F^* = \int_{t_0}^t (\dot{I}_H^T S \dot{I}_H + \eta (N_H I_H + N_C I_C + N_D I_D) - \lambda^T I_D) dt \quad (61)$$

по функциям $I(t)$ и $\eta(t)$ при ограничении (55) и условии дополняющей нежесткости вида

$$\lambda^T I_D = 0, \quad (62)$$

где I - вектор всех токов I_H, I_C, I_D ;

η, λ - векторы множителей Лагранжа. а выражение в скобках при множителе η совпадает с левой частью условия (50). Условие (62) определяет, что множители $\lambda_k = 0$ при строгом соблюдении ограничения (55), когда $I_{Dk} > 0$.

Обозначим подинтегральную функцию через

$$f(I, \dot{I}, \eta, \lambda) = \dot{I}_H^T S \dot{I}_H + \eta (N_H I_H + N_C I_C + N_D I_D) + \lambda^T I_D. \quad (63)$$

Для решения этой задачи рассмотрим функцию Эйлера-Лагранжа

$$\begin{aligned} \Phi_I &= \frac{\partial f}{\partial I} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial f}{\partial \dot{I}} \right); \\ \Phi_\eta &= \frac{\partial f}{\partial \eta} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial f}{\partial \dot{\eta}} \right) \end{aligned} \quad (64)$$

и функцию Вейерштрасса

$$E = f(I, \dot{I}, \eta, \lambda) - F(I, z, \eta, \lambda) - (\dot{I} - z) \frac{\partial}{\partial I} (f(I, z, \eta, \lambda)), \quad (65)$$

где z - вектор, подставляемый в указанные случаи вместо вектора I .

После дифференцирования f по векторам I_H , I_C , I_D из (64) находят

$$\Phi_I = \left\{ \begin{array}{l} N_H^T \eta - 2 S \ddot{I}_H \\ 0, \\ N_D^T \eta - \lambda \end{array} \right\}. \quad (66)$$

Здесь вторая строка обращается в ноль, так как ток I_C является постоянным (по определению). Дифференцирование f по вектору η приводит к уравнению (50).

Функция (65) после подстановки и дифференцирования принимает вид

$$E = \dot{I}_H^T S \dot{I}_H - z_H^T S z_H - \frac{2}{2} (\dot{I}_H - z_H) S z_H \quad (67)$$

или

$$E = S (\dot{I}_H - z_H)^2. \quad (68)$$

Отсюда следует, что функционал (61) при ограничениях (55) и (62) минимизируется, если соблюдаются условия (50) и

$$N_H^T \eta - 2 S \ddot{I}_H = 0; \quad (69)$$

$$N_D^T \eta - \lambda = 0; \quad (70)$$

$$S \geq 0 \quad (71)$$

так как при этом $\Phi_1 = 0$, $\Phi_2 = 0$ и $E \geq 0$. Из того, что оптимум функционала является минимумом (а не максимумом), следует, что

$$\lambda \geq 0. \quad (72)$$

Супериндуктивность S_k по определению удовлетворяет соотношению (71). Следовательно, задача минимизации (60) при ограничениях (50) и (55) эквивалентна решению системы уравнений и неравенств

$$[(50), (55), (62), (69), (70), (72)]. \quad (73)$$

Легко заметить, что при обозначении

$$\lambda = 2 e_D, \quad \eta = 2\varphi$$

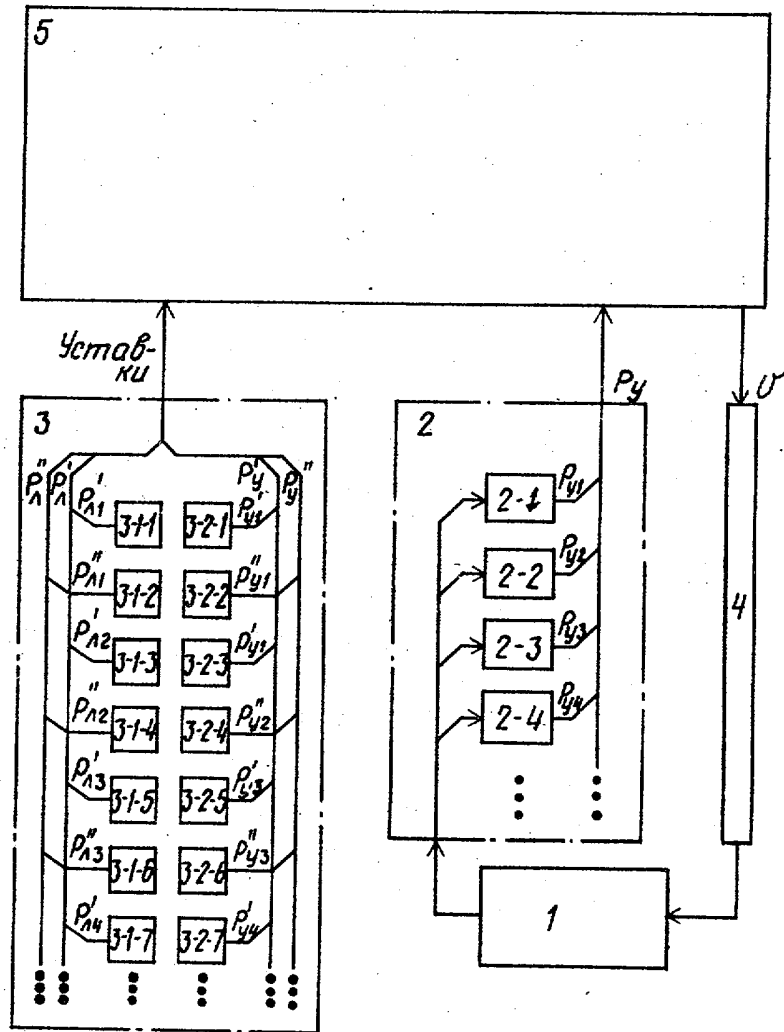
задачи (59) и (73) совпадают. Таким образом, электрическая цепь с супериндуктивностями решает вариационную задачу подобно тому, как обычная электрическая цепь решает задачу квадратичного программирования.

Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

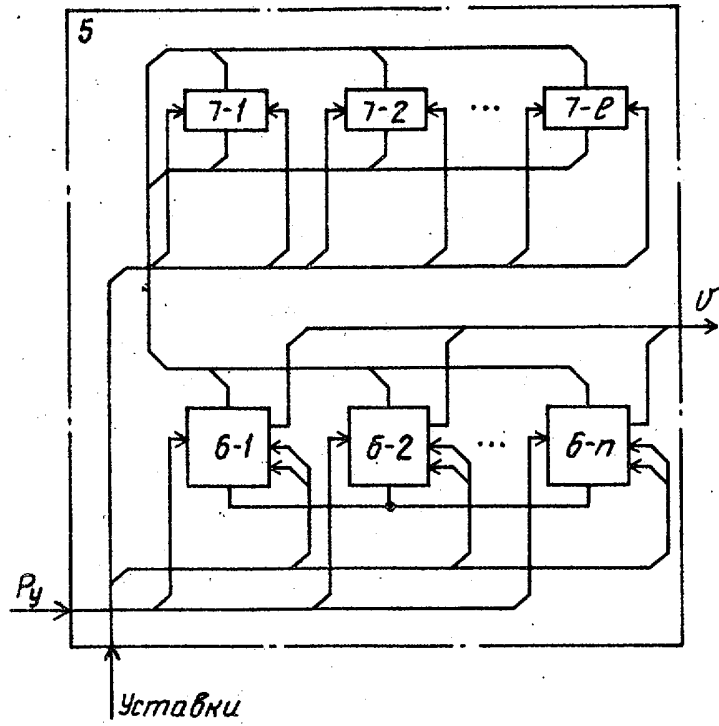
Устройство автоматического регулирования перетоков активной мощности в энергосистеме, содержащее блок телеизмерения регулируемых параметров, состоящий из датчиков узловых мощностей, вход которого соединен с энергосистемой, а выход объединяет выходы датчиков узловых мощностей, блок задатчиков уставок, выход которого объединяет выходы задатчиков уставок, и блок формирования управляющих воздействий, выполненный из имитаторов узлов энергосистемы и имитаторов линий электропередач, количество которых определяется количеством узлов и линий электропередач энергосистемы, каждый имитатор линии электропередач имеет два функциональных входа, а каждый имитатор узла энергосистемы имеет два функциональных входа, первый управляющий вход и управляющий выход, причем эти выходы образуют в совокупности выход блока формирования управляющих воздействий в целом, первые управляющие входы всех имитаторов узлов энергосистемы образуют в совокупности первый вход блока формирования управляющих воздействий, связанный с выходом блока телеизмерений, первые функциональные входы всех имитаторов узлов энергосистемы объединены, вторые функциональные входы этих имитаторов и первый и второй функциональные входы всех имитаторов линий электропередач соединены между собой аналогично соединению концов имитируемых линий электропередач с имитируемыми узлами энергосистемы, каждый имитатор линии электропередачи выполнен в виде включенного между его функциональными входами ограничителя тока с двумя управляющими входами, каждый имитатор узла энергосистемы содержит усилитель, управляемый источник тока и ограничитель тока с двумя управляющими входами, причем этот ограничитель включен последовательно с управляемым источником тока между функциональными входами этого

имитатора, управляющие входы ограничителей тока во всех имитаторах образуют в совокупности второй управляющий вход блока формирования управляющих воздействий в целом, соединенный с выходом блока задатчиков уставок, причем управляющие входы ограничителей тока имитатора линий электропередачи подключены к выходам задатчиков уставок по перетокам мощности, а управляющие входы ограничителей тока имитатора узла энергосистемы подключены к выходам задатчиков уставок по

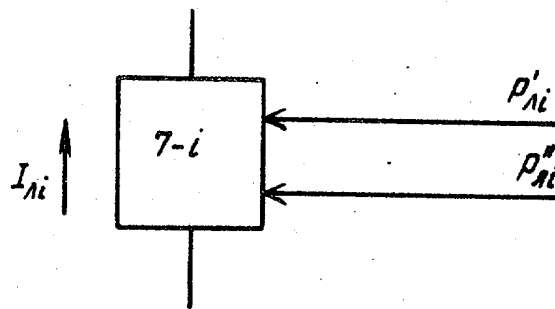
узловым мощностям, отличающемся тем, что, с целью упрощения устройства и повышения точности регулирования, в нем выход блока формирования управляющих воздействий связан через канал управления мощностью регулируемых объектов с энергосистемой, а в каждый имитатор узла энергосистемы дополнительно включена индуктивность, причем усилитель и индуктивность соединены в последовательную цепь, которая включена параллельно с управляемым источником тока.



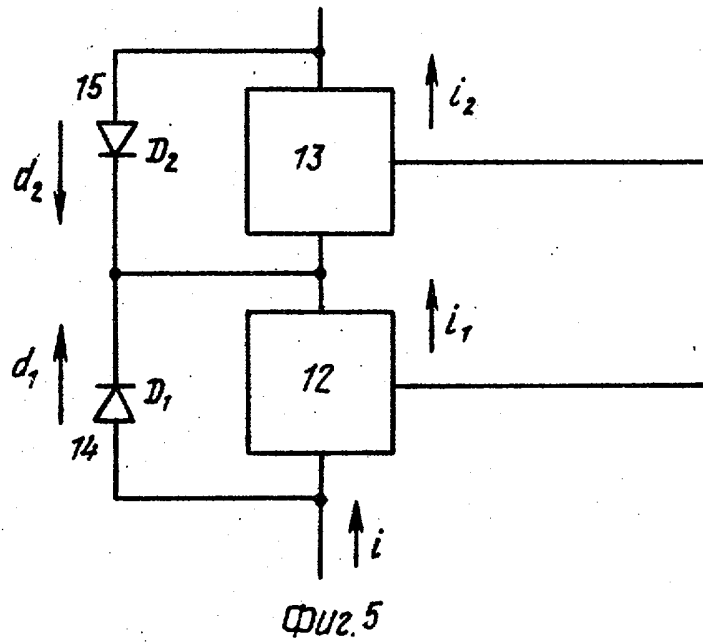
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 4



Составитель К. Фотина
 Редактор Н. Бобкова Техред М. Дидык Корректор М. Пожо

Заказ 2230/51 Тираж 650 Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета СССР
 по делам изобретений и открытий
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Производственно-полиграфическое предприятие, г. Ужгород, ул. Проектная, 4