

О. ТЕРНО

**К ВОПРОСУ О РЕГУЛИРОВАНИИ  
ЧАСТОТЫ В ОБЪЕДИНЕННЫХ  
ЭНЕРГОСИСТЕМАХ**

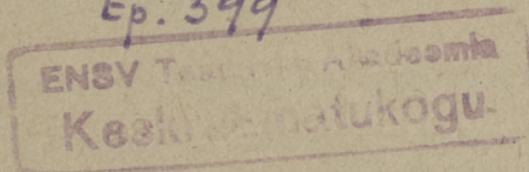
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957 г.



О. ТЕРНО

# К ВОПРОСУ О РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ В ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Бр. 399



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957 г.



## **К ВОПРОСУ О РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ В ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ**

На состоявшихся в последнее время совещаниях и конференциях по автоматизации энергосистем особое внимание привлекали работы трех организаций: Энергетического Института Академии Наук СССР (ЭНИН), Центральной Научно-исследовательской электротехнической лаборатории Министерства Электростанций (ЦНИЭЛ) и организации по Реконструкции Государственных Районных Электростанций (ОРГРЭС). Эти работы посвящены разработке новых схем и методов автоматического регулирования частоты и мощности в энергосистемах и их объединениях, с учетом экономических характеристик станций и систем.

Исследованием регулирования частоты и мощности в объединенных энергосистемах занимается также коллектив кафедры «Электрические станции» Ленинградского Политехнического Института им. М. И. Калинина, а в настоящее время этими вопросами начала также заниматься кафедра «Электрические станции, сети и системы» Таллинского Политехнического Института.

Пользуясь случаем осветить некоторые вопросы о работах указанных кафедр по исследованию схем и методов автоматического регулирования частоты, приводим ниже также краткую характеристику других аналогичных работ по известным нам материалам.

### **1. О требованиях к регулированию частоты и мощности.**

«Основные требования к автоматическому регулированию частоты и мощности в объединенных энергосистемах» (л. 1) утверждены Техническим Управлением Министерства Электростанций в 1955 г. и будут в ближайшее время опубликованы в журнале «Электрические станции».

В основном, в этих требованиях излагаются с достаточ-

ной ясностью уже установившиеся положения по данному вопросу. Следует, однако, отметить, что некоторые вопросы, имеющие значение, в «Основных требованиях» не отражены.

Первым таким вопросом является учет потерь в межсистемных линиях при экономическом распределении нагрузки между системами. Учет потерь необходим уже в существующих объединениях (напр. Уральское объединение) и будет иметь еще большее значение с ростом длины межсистемных линий и передаваемой по ним мощности. В то же время учет потерь в сетях заметно усложняет схемы и устройства экономического распределения нагрузки.

Во-вторых, следует считаться с тем, что в объединенных системах почти всегда встречаются системы, связанные с другими системами объединения слабой связью. Под слабой связью в данной работе подразумевается линия, пропускная способность которой (по устойчивости) недостаточна для передачи мощности, требуемой по условиям экономичности. В таких случаях важное значение приобретает увеличение максимальной допустимой мощности (уменьшение запаса устойчивости), так как оно позволяет улучшить экономичность параллельной работы.

В зависимости от режима нагрузки и, соответственно, от режима обменной мощности, больший или меньший эффект достигается здесь быстродействующим регулированием обменной мощности. В литературе имеется ряд примеров, где быстродействующим регулированием обменной мощности достигнуто значительное увеличение передаваемой мощности (л. 2).

В-третьих, с достижением максимальной допустимой мощности межсистемных линий нарушается экономическое распределение нагрузки между системами. Методы регулирования частоты должны в таком случае с одной стороны обеспечить экономическое распределение нагрузки между станциями внутри систем, а с другой стороны — максимально возможную экономичность в распределении нагрузки между системами.

## 2. Экономичное распределение активной нагрузки.

В основу экономического распределения нагрузки между электростанциями положены характеристики частичных расходов (относительных приростов) станций. Эти характеристики показывают потребность в

дополнительных расходах для выработки последующего мегаватта мощности. Они представляют собой сложные криволинейные зависимости, которые, как правило, имеют поднимающийся характер, и которые в общем выражаются функцией

$$\delta = f(P),$$

где  $P$  — мощность станции (мгвт),  
 $\delta$  — частичный удельный расход.

Предположим, что дана система из  $n$  станций, между которыми надо распределять суммарную нагрузку системы. Следовательно имеем  $n$  характеристик экономичности:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= f_1(P_1), \\ \delta_2 &= f_2(P_2), \\ &\vdots \\ \delta_n &= f_n(P_n), \end{aligned}$$

по которым необходимо найти такие мощности отдельных станций  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , чтобы

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_{\Sigma n},$$

где  $P_{\Sigma n}$  — суммарная нагрузка системы, и чтобы расходы на производство электроэнергии в системе были бы минимальные. Можно показать [напр. (л. 3)], что максимальная экономичность работы всей системы достигается тогда, когда мощности отдельных станций выбраны так, чтобы

$$\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_n, \quad (1)$$

т. е. если все станции по своим экономическим характеристикам работают на равенстве частичных удельных расходов. Такой результат получен с предположением, что все характеристики имеют поднимающийся характер, и что потери в сетях ничтожно малы.

В реальных системах следует однако считаться с потерями в сетях, которые могут существенно изменить картину экономического распределения нагрузки. При наличии заметных потерь в системе условие экономичности пишется в виде

$$\frac{\delta_1}{1 - \sigma_1} = \frac{\delta_2}{1 - \sigma_2} = \dots = \frac{\delta_n}{1 - \sigma_n} = \delta_0 \quad (2)$$

где  $\sigma_i$  — частичные удельные потери в сетях для  $i$ -ой станции (системы),

$\delta_0$  — средний частичный удельный расход системы (объединения).

Предполагая, что объединение из  $n$  систем можно рассматривать как систему, состоящую из  $n$  эквивалентных станций, можно  $\sigma_i$  выражать в виде.

$$\sigma_i = K_1^i P_{206} + K_2^i P_{206} + \dots + K_n^i P_{i06} \quad (3)$$

где  $P_{i06}$  — обменные мощности в межсистемных линиях,

$K_k^i$  — соответствующие долевые коэффициенты.

Таким образом, из (2) имеем для обеспечения максимальной экономичности с учетом потерь в сетях

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \delta_0 (1 - \sigma_1) = \delta_0 - \Delta \delta_1, \\ \delta_2 &= \delta_0 (1 - \sigma_2) = \delta_0 - \Delta \delta_2, \\ &\dots \\ \delta_n &= \delta_0 (1 - \sigma_n) = \delta_0 - \Delta \delta_n, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Delta \delta_i = \delta_0 \sigma_i$ .

Устройства экономического распределения нагрузки должны обеспечить для изолированных систем с малыми потерями в сетях выполнение условия (1), для объединенных систем и изолированных систем с большими потерями в сетях выполнение условия (2) или (4). К настоящему времени разработан ряд конструкций таких автоматических устройств. Большинство из них позволяет выполнять только условие (1). Все они основаны на моделировании экономических характеристик  $\delta = f(P)$  станций. Эту криволинейную сложную зависимость можно моделировать шаблонами, многоконтактными переключателями с переключаемым сопротивлением или электронными лампами. При моделировании шаблонами на шаблоны опираются рычаги. Вертикальное положение рычага моделирует мощность, горизонтальное перемещение рамки — изменение частичного удельного расхода. В многоконтактных переключателях ток через сопротивление моделирует мощность, перемещение подвижного контакта — изменение частичного удельного расхода. В моделях с электронными лампами подводимое напряжение моделирует частичный удельный расход, а ток через лампы — мощность.

Соответствующая комбинация отдельных элементов позволяет осуществлять выполнение условий (1) и (2).

Для выполнения условия (1) в первом случае все шаблоны прикрепляются к общей подвижной рамке, а подвижные контакты многоконтактных переключателей прикрепляются к общему валу. Для выполнения условия (2)

для всех станций (систем) величины  $\delta_i$  разные, и поэтому устройство гораздо усложняется.

Наиболее удобным решением следует считать построение моделей экономических характеристик с помощью многоконтактных переключателей с применением в качестве последних шаговых искателей двухсторонним ходом (АНРАН).

### 3. Предложенные методы экономического регулирования частоты.

Как уже отмечалось, методы регулирования частоты, учитывающие экономические характеристики станций и систем разработаны в течение последних лет тремя отечественными организациями: ЦНИЭЛ'ом, ЭНИН'ом и ОРГРЭС'ом.

Поскольку материалы о соответствующих работах ОРГРЭС'а опубликованы в литературе (л. 4; л. 5), ограничиваемся здесь только замечаниями.

Схема ОРГРЭС является центральным интегральным регулированием с экономическим распределением нагрузки. На регулирующие станции передаются сигналы, пропорциональные заданной мощности. Интегрирующим элементом является моторчик экономического распределителя активной нагрузки (ЭКРАН'а). Экономические характеристики моделируются шаблонами, прикрепленными к общей рамке.

Регулирование частоты и мощности из одного центра в небольших системах не вызывает трудностей. Однако, для крупных объединений такая централизация не является целесообразным. Схема становится ненадежной и ее эксплуатация сложной. Центральное расположение экономических характеристик заставляет диспетчерский персонал объединения постоянно заниматься сменой характеристик и не позволяет автоматизировать этот процесс.

По разработанной конструкции ЭКРАН'а невозможно выполнение условия (2), выполняется только условие (1), так как невозможно осуществлять сдвиг шаблонов относительно друг друга. Предлагаемое введение поправки по потерям в мощность не дает нужного результата.

По схеме можно обменную мощность регулировать, как это и предлагают авторы. Однако, с достижением макси-

муна передаваемой мощности нарушается экономическое распределение нагрузки между станциями в системах, связанных слабой связью.

Затруднительно осуществлять быстродействующее регулирование обменной мощности, поскольку в цепи регулирования будем в данном случае иметь постоянные времени аппаратуры телеизмерения и телепередачи.

Можно также спорить о преимуществе шаблонов перед многоконтактными переключателями. При работе автора в течение года с многократными переключателями не было ни одного случая неисправности из-за ненадежного контакта.

На основе вышесказанного можно сказать, что схема ОРГРЭС'а может дать хорошие результаты в небольших изолированных системах, но для объединенных энергосистем она требует дальнейшей разработки.

Схема ЭНИН'а основана на принципе регулирования частоты со статизмом по обменной мощности (л. 6; л. 7). Авторы схемы утверждают, что отклонение обменной мощности является наиболее целесообразным критерием регулирования крупных энергообъединений, поскольку оно позволяет определить как величину, так и место изменения нагрузки. Это обосновано; однако, для выполнения условия экономичности требуется, чтобы уставки обменных мощностей были определены в соответствии с условиями (2) или (4).

Для выполнения этой задачи необходим центральный распределитель активной нагрузки, в котором моделированы экономические характеристики всех станций объединения, участвующих в регулировании частоты. Измеряя суммарные мощности всех систем и все основные обменные мощности, это устройство вырабатывает наивыгоднейшие уставки обменных мощностей, которые передаются по телеканалам во все системы. В системах вырабатывается величина

$$R_i = \Delta f + K \Delta P_{об i}$$

по которой регулируют станции данной системы.

Как и в предыдущем случае, здесь следует в первую очередь возражать против чрезмерной централизации всей аппаратуры распределения в одно место. Диспетчерский персонал должен заниматься изменением экономических характеристик и автоматизировать этот процесс невозможно. Схема ЭНИН'а предполагает наличие развитой

сети телемеханики, причем в пределах систем аппаратура должна иметь минимальное запаздывание.

Кроме того можно показать, что при наличии существующей аппаратуры телемеханики погрешность в определении наивыгоднейшей обменной мощности может стать соизмеримой с самой величиной.

В условиях объединенных энергосистем схема ЭНИН'а становится громоздкой, ее эксплуатация сложна и надежность работы схемы снижается. Аппаратура, предназначенная для определения уставок обменной мощности, не разработана.

Схема автоматического регулирования частоты в объединенных энергосистемах, предложенная ЦНИЭЛ'ом (л. 8, л. 9) основана на принципе интегрального регулирования.

На всех регулирующих станциях установлены модели экономических характеристик, являющиеся устройствами распределения активной нагрузки между агрегатами станции.

Введением линейной зависимости между величинами частичного удельного расхода и интегрального отклонения

$$\delta = k \int \Delta f dt = k \Delta \varphi$$

обеспечивается выполнение условия (1), поскольку величина интегрального отклонения для всех станций объединения одинакова.

В случае необходимости можно в отдельных системах измерять соответствующие обменные мощности и выработать поправку на учет потерь в сетях, чем так же обеспечивается выполнение условия (2).

Источники эталонной частоты с выявительными элементами интегрального отклонения находятся в диспетчерских пунктах энергосистем объединения. Это дает системам определенную автономность и повышает надежность работы схемы. Поскольку модели экономических характеристик находятся на станциях, в ЦДП систем и объединения не требуется никакой аппаратуры, моделирующей часто изменяющиеся экономические характеристики станций. Это освобождает диспетчерский персонал от постоянного вмешательства в работу схемы и заметно упрощает ее эксплуатацию.

Местное расположение моделей экономических характеристик в ряде случаев позволяет автоматизировать про-

цесс их изменения при изменении показателей экономичности.

Для правильного учета потерь в сетях требуется в случае сложной конфигурации объединения иметь во всех системах телеизмерения всех основных обменных мощностей, что чрезмерно усложняет схему телемеханики. Такая схема учета потерь явно не является приемлемым.

Для ограничения перетоков по линиям с ограниченной пропускной способностью в схеме ЦНИЭЛ предлагается выделить в системе станцию, осуществляющую астатическое регулирование обменной мощности. В таком случае нарушается экономическое распределение нагрузки не только между системами, а также между станциями внутри систем.

Таким образом, схема ЦНИЭЛ'а хотя и является наиболее простым, надежным и удобным в эксплуатации, все же не может быть рекомендована к применению в объединениях со слабыми связями.

#### 4. Пути создания новых схем.

Как показывает краткий обзор предложенных схем, ни один из них не свободен от недостатков и не удовлетворяет полностью требованиям, которые предъявляются крупными энергообъединениями.

При разработке более совершенного и приемлемого метода регулирования частоты целесообразно, положить в основу новой схемы регулирования частоты и мощности следующее:

а) Местное расположение моделей экономических характеристик.

Расположение моделей экономических характеристик на станциях позволяет стационарному персоналу быстро и оперативно изменить настройку модели при изменении показателей экономичности станции без вмешательства дежурного персонала ЦДП системы. При этом в ряде случаев можно осуществлять автоматическое изменение характеристики;

б) Отказ от измерения суммарной мощности объединения для экономического распределения нагрузки и выявление изменения суммарной нагрузки  $\Sigma P$  косвенным путем (отклонением частоты или ее интегральным отклонением).

Это позволяет значительно уменьшить влияние погрешностей телемеханики на процесс регулирования частоты и распределения нагрузки;

в) Применение централизованного телеканала (во всяком случае внутри систем) и передача единого сигнала, характеризующего величину частичного удельного расхода для всех станций.

Это диктуется местным расположением моделей экономических характеристик, и в ряде случаев позволяет экономить в числе телеканалов.

г) Быстродействующее регулирование обменной мощности в режимах, близких к пределу устойчивости;

д) В объединениях со сложной конфигурацией применение центрального выявления поправок на учет потерь в сетях  $\sigma_i$  или  $\Delta\delta_i$ .

Поскольку величины  $\sigma_i$  или  $\Delta\delta_i = \sigma_i\delta_0$  не зависят от экономических характеристик систем, то для выполнения этой задачи в ЦДП ОДУ не требуется установить моделей экономических характеристик. Центральное выявление  $\sigma_i$  позволяет экономить в числе телеканалов;

е) В объединениях с простой конфигурацией — местное выявление поправки  $\sigma_i$  и  $\Delta\delta_i$ .

Таким образом, основные элементы, которые мы считаем целесообразными положить в основу новой схемы, имеются в схеме ЦНИЭЛ'а.

Необходимо ее лишь усовершенствовать для того, чтобы придать ей свойства других схем (напр. схемы ЭНИН'а).

На основе вышеуказанного нами разработана новая схема экономического регулирования частоты в объединенных энергосистемах, названная методом двойного регулирования.

## 5. Двойное регулирование частоты и мощности в энергообъединениях.

Двойным назван разработанный нами метод потому, что в зависимости от загруженности межсистемных слабых связей в нем используется для регулирования частоты один из двух критериев — или интегральное отклонение частоты или же отклонение обменной мощности от максимального заданного значения. Последнее может быть заменено другим параметром, например углом между векторами напряжения на концах слабой связи.

Предлагаемая схема использует основные элементы, содержащиеся в схеме ЦНИЭЛ'а. Модели экономических характеристик типа АНРАН или УРАН расположены на станциях. В ЦДП систем выявляется интегральное отклонение частоты и на станции передается величина

$$\delta = \kappa \int \Delta f dt.$$

Станции принимают по своим экономическим характеристикам нагрузку

$$P_i = \varphi_i \delta = \varphi_i \kappa \int \Delta f dt,$$

где  $\varphi_i$  — наклон экономической характеристики  $i$ -ой станции.

Эта нагрузка соответствует экономичной для станции при данной суммарной нагрузке объединения.

Такова основная схема, совпадающая со схемой ЦНИЭЛ'а. Следует, однако, отметить, что к такой схеме мы пришли, не зная еще о работах, проводимых в ЦНИЭЛ'е.

Это основная схема нами, дополнена рядом новых элементов:

1) Выявление поправки на учет потерь в сетях производится в ЦДП ОДУ. Для этого в нем имеется потенциометрический распределитель, который получает телеизмерения всех основных обменных мощностей.

По показаниям телеваттметров устройство вырабатывает коэффициенты  $\sigma_i$  для каждой системы. Коэффициенты для определения  $\sigma_i$  в зависимости от  $P_{i06}$  постоянные и определяются параметрами межсистемных линий. Величины  $\sigma_i$  могут передаваться по телеканалам в ЦДП систем, где множительные устройства вырабатывают величину  $\Delta \delta_i = \sigma_i \delta_0$ , которая суммируется величиной  $\sigma_0$  с соответствующим знаком. Операция умножения может выполняться также в ЦДП ОДУ. В системы в таком случае передается величина  $\Delta \delta_i$ . Передача в системы величину  $\delta_i = \delta_0 \pm \Delta \delta_i$  нецелесообразна, поскольку влияние погрешности телемеханики в таком случае более велико.

2) Во всех системах, соединенных с объединением слабой связью, выделяется одна станция на быстроедействие регулирование обменной мощности. Критерием быстрогодействия регулирования могут служить следующие функции:

$$\Delta f + k \Delta P_{06} = 0, \dots \dots (5-a)$$

$$k_1 \Delta P_{06} + K_2 \frac{d \Delta P_{06}}{dt} = 0, \dots \dots (5-б)$$

где  $\Delta P_{06} = P_{06}$  факт. —  $P_{06}$  макс. зад.

$$\text{или } K_1 \Delta \Theta_{12} + K_2 \frac{d\Delta \Theta_{12}}{dt} + K_3 \frac{d^2 \Delta \Theta_{12}}{dt^2} = 0, \dots \dots (5-B)$$

где  $\Delta \Theta_{12} = \Theta_{12}$  факт. —  $\Theta_{12}$  макс. зад.

В последнем случае целесообразно осуществлять комбинированное воздействие на открытие направляющего аппарата на возбуждение генератора (л. 10).

В режиме, когда все обменные мощности находятся ниже допустимого максимума по условиям устойчивости, т. е. все

$$\Delta P_i < 0,$$

действует нормальное интегральное регулирование и быстродействующее регулирование обменной мощности отключено. При этом суммарная нагрузка распределяется между всеми системами и станциями по их экономическим характеристикам. Кратковременные изменения нагрузки распределяются между всеми станциями и системами объединения по их статическим характеристикам. При экономическом распределении нагрузки обеспечивается правильный учет потерь в сетях.

Как только в какой-либо связи передаваемая мощность достигает допустимую максимальную величину, поступает в действие в данной системе быстродействующее регулирование обменной мощности. Выделенная на быстродействующее регулирование обменной мощности станция принимает на себя все дальнейшие изменения нагрузки данной системы, если они обуславливают увеличение обменной мощности.

3) С достижением максимума передаваемой мощности прекращается экономическое распределение нагрузки между системами. Выделением одной станции на регулирование обменной мощности нарушается также экономическое распределение нагрузки между станциями внутри этой системы. Для обеспечения экономичности в таком режиме передаваемая на станции величина частичного удельного расхода ставится в зависимость от мощности станции, выделенной на быстродействующее регулирование обменной мощности. Последняя в таком случае становится ведущей для остальных станций этой системы.

Если ведомые станции внутри системы принимают на себя те изменения мощности ведущей станции, которые

превышают некоторую зону нечувствительности  $\pm \varepsilon$ , то можно написать:

$$\delta_i = \kappa \int \Delta f dt \pm \delta_i \kappa \int \Delta f dt \pm \kappa_1 \int (\Delta P_b \pm \varepsilon) dt \quad \dots \quad (6)$$

где  $\Delta P_b = P_b$  зад. —  $P_b$  факт.

$P_b$  зад. — заданная средняя мощность ведущей станции.

По (в) ведомые станции в системе принимают на себя изменение мощности ведущей станции по своим экономическим характеристикам. Обеспечивается поддержание максимальной заданной обменной мощности и экономическое распределение нагрузки внутри системы.

Таким образом схема, основанная на принципах, изложенных в п. 4, обеспечивает максимальную экономичность системы при астатическом регулировании частоты и при всех режимах слабых связей.

Аппаратура, требуемая для выполнения этой задачи, простая, его эксплуатация не сложная, а также обеспечивается надежная работа всего объединения.

Следует, однако, отметить, что отклонение обменной мощности является необходимым, но не достаточным критерием для включения быстродействующего регулирования.

Рассмотрим объединение из двух систем «А» и «В». Положим, что до толчка нагрузки в одной из них мы имеем:

$$\begin{aligned} \Delta P_{об} &= 0, \\ \text{в (6)} \quad \kappa_1^A \int (\Delta P_b^A \pm \varepsilon_A) dt &\neq 0, \\ \kappa_1^B \int (\Delta P_b^B \pm \varepsilon_B) dt &\neq 0, \end{aligned} \quad (7)$$

Т. е. предполагаем такой режим, которому предшествовали достижение максимальной передаваемой мощности и дальнейшее увеличение нагрузки в обеих системах, приводящие к увеличению обменной мощности. Кроме того, предположим, что:

а) Система «А» более экономична, чем система «В», т. е.  $\varphi_A > \varphi_B$

б) Направление перетока мощности из «А» в «В»,

в) Быстродействующее регулирование обменной мощности происходит в обеих системах по (5-а).

Если в таком режиме происходит сброс нагрузки в системе «В», обменная мощность между системами уменьшается. Если критерием включения регулирования по (5-а) является только отклонение обменной мощности,

то в данном случае действовало бы только интегральное регулирование.

При принятых экономических характеристиках это означает, что сброс нагрузки в системе «В» покрывается главным образом за счет сброса экономичной мощности в системе «А». В то же время в системе «В» вырабатывается менее экономичная мощность.

$$\Delta P^B = \varphi_B k_1^B \int (\Delta P_b^B \pm \varepsilon_B) dt \quad (8)$$

Очевидно, что в таком случае сброс в «В» следует покрывать за счет сброса неэкономичной мощности по (8). Следовательно, критерием включения быстродействующего регулирования следует принимать

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{об} &= P_{об} \text{ факт.} - P_{обз} > 0 \\ \int (\Delta P_b^i \pm \varepsilon_i) dt &\neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Условие (9) обязательно для всех объединений из любого числа систем независимо от критерия, применяемого для быстродействующего регулирования обменной мощности.

Учитывая, что ведомые станции во всех системах регулируют задаваемую АНРАН'ами мощность со статизмом по частоте, закон регулирования по двойному регулированию можно написать в следующем виде:

для  $n-1$  станций:

$$\Delta f + \varphi_1^k K_f \int \Delta f dt \pm \varphi_1^k \delta_k K_f \int \Delta f dt \pm \varphi_1^k K_k \int (\Delta P_n^k \pm \varepsilon_k) dt = 0 \quad (10)$$

$$\Delta f + \varphi_{n-1}^k K_f \int \Delta f dt \pm \varphi_{n-1}^k \delta_k K_f \int \Delta f dt \pm \varphi_{n-1}^k K_k \int (\Delta P_n^k \pm \varepsilon_k) dt = 0$$

для  $n$ -ой станции:

$K_1 \Delta P_{об} + K_2 \frac{d \Delta P_{об}}{dt} = 0$ , или (5-а) или (5-в). При этом,  $n$ -ая станция участвует в регулировании при выполнении условия (9).

## 6. Ведущая станция в системе

В предлагаемой схеме на регулирование обменной мощности выделяется в каждой системе одна станция, изменение мощности которой перераспределяется между остальными станциями системы по их экономическим характеристикам.

К схеме с ведущей станцией мы пришли при рассмотре-

нии регулирования частоты и мощности в условиях изолированных энергосистем.

Исследование регулирования частоты в системе по методу мнимого статизма применением устройства АНРАН для определения наивыгоднейших заданных мощностей показало, что необходимая мощность станции, предназначенной для компенсации суммарной погрешности, может составлять до 8% мощности системы. Это заставляет искать путей уменьшения суммарной погрешности, обусловленной измерением и распределением суммарной нагрузки системы.

Одной возможностью здесь является измерение и распределение вместо полного значения мощности только ее изменения. Этот принцип является аналогичным принципу «дельта-модуляции», применяемому к теории связи. Построение на его основе схемы регулирования позволяет довести погрешности от телемеханики до практически незначительных величин. Практическое выполнение этой схемы, однако, встречает ряд технических трудностей, и поэтому от ее дальнейшего исследования мы отказались.

С другой стороны, изменение суммарной нагрузки системы равняется изменению мощности станции, выделенной на астатическое регулирование частоты.

Это изменение можно легко измерять и распределять между другими станциями по их экономическим характеристикам. Это и привело к схеме с ведущей по частоте станцией и с экономическим распределением нагрузки. Такой же принцип использован в схеме двойного регулирования. Однако, ведущая станция регулирует здесь не по частоте, а по одной из трех критериев ( $5^a$ ), ( $5^b$ ) или ( $5^в$ ).

Схема с ведущей станцией встретила в свое время возражения (л. 11). В связи с этим было проведено теоретическое и экспериментальное исследование этой схемы. В теоретическом анализе удалось после ряда допущений описывать переходный процесс линейным дифференциальным уравнением шестого порядка. По критерию Гурвица было исследовано влияние некоторых параметров на переходный процесс. При условии, что все изменения мощности распределяются между ведомыми станциями и что заданная средняя мощность является строго постоянной, оказывается, что скорость перераспределения нагрузки между ведомыми станциями должна быть на два порядка

меньше от скорости набора мощности на ведущей станции.

Введением определенной зоны нечувствительности ( $\pm \varepsilon$ ) и включением ведущей станции на работу по экономической характеристике ( $P_{в}^k$  зад. изменяется в зависимости от  $b$ ) можно заметно улучшить динамические свойства этой схемы.

Скорость перераспределения нагрузки можно довести до скорости набора мощности на ведущей станции.

Результаты эксперимента совпали с результатами теоретического анализа.

Это позволило применять схему с ведущей станцией с экономическим распределением и в схеме двойного регулирования.

\* \* \*

Изложенный выше метод двойного регулирования не претендует на законченность. Сделана лишь первая попытка создать более полную схему регулирования, соответствующую техническим и экономическим требованиям, предъявляемым объединенными системами, т. е. совместно решить техническую и экономическую сторону задачи и делать это возможно проще, обеспечивая удобство и надежность эксплуатации. Могут быть найдены и более совершенные решения рассмотренных вопросов.

### Л и т е р а т у р а :

1. Основные требования к регулированию частоты и мощности в объединенных энергосистемах». ТУ МЭС 1955 г.
2. «Almen; Donclsen «Test of Load and Frequency Control Equipment» Transactions ATEE 1954 p. Ш-А p. 546
3. В. В. Болотов «Теоретические основы выбора экономического режима сложной электроэнергетической системы». Изд. АН СССР, 1947 г.
4. Л. Д. Стернинсон «Работы ОРГРЭС по регулированию частоты в энергосистемах». Электрические станции, 1955, № 10.
5. В. С. Казанский, Л. Д. Стернинсон «Телерегулирование частоты и мощности в энергосистемах». Электричество, 1956, № 1.
6. И. М. Маркович, В. А. Тафт, Н. В. Паутин «Регулирование частоты и обменных потоков активной мощности в объединенной энергетической системе Юга (I этап)». Отчет ЭНИН АН СССР, 1953 г.
7. ЭНИН АН СССР, Гидроэнергопроект МЭС, «Регулирование частоты и мощности в объединенной южной энергосистеме». Отчет ЭНИН АН СССР, 1954 г.
8. ЦНИЭЛ МЭС «Автоматическое регулирование частоты и мощности в энергосистемах». Отчет по теме 2—13, 1953 г.
9. ЦНИЭЛ МЭС «О регулировании частоты в единой высоковольтной сети». Отчет по теме 2—12, 1954 г.
10. М. Р. Линде «Совместное действие регуляторов частоты и мощности и напряжения при регулировании по углу». Диссертация ЛПИ им. М. И. Калинина, 1956 г.
11. I. Labouret «Les oscillations de puissance au cours de réglage de charge dans les reseaux interconnectés» Bulletin d. SFd'E. 1936 mai t. VI p. 487.

## SUMMARY

This paper describes a new method for the control of system, frequency and load with the consideration of economic characteristics of power station (incremental costs) and power losses in tie-lines. This new method of control is called «dual control,» because in dependence on tie-line loading either integral regulation or tie-line bias control (or any method of rapid control of tie-line power) are applied. The integral regulation is adopted, if the powers of all tielines in the interconnection are less of admissible maximum value (considering the reserve of stability). The rapid-control of tie-line power is adopted, if the tie-line power arrives at maximum admissible value. As a criterion of rapid control either deflexion of tie-line power and its derivatives or deflexion of tie-line angle and its derivatives may be used.

Economic load dispatching is secured by mounting in all regulating stations of systems the models of station's economic characteristics (local disposition of models of economic characteristic). For considering the tie-line power losses by economic load dispatching is used central production of correction coefficient to value of incremental costs of all systems.

The method of «dual control» secures one simple and reliable scheme of regulation of frequency and load in great interconnections. The paper also describes some other methods of economic control of system load and frequency.

О. Терно  
К ВОПРОСУ О РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ  
В ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Издательство  
Таллинского Политехнического Института

\*  
Редактор С. Р. Буачидзе  
Технический редактор А. Тамм  
Корректор Б. Тамм

---

Сдано в набор 19. 12. 56. Подписано к печати 10. 1. 57. Бумага 54×84  
1/16. Печатных листов 1,25. По формату 60×92 печатных листов 1,0.  
Учетно-издательских листов 0,83. Тираж 800. МВ-00712. Заказ № 7387.  
Типография «Коммунист», Таллин, ул. Пикк 2.

Цена 60 коп.



Цена 60 коп.

EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00086379 9