

С. Р. БУАЧИДЗЕ

Регулирование активной и реактивной  
мощностей межсистемного звена  
постоянного тока

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН 1957

---

PUBLICATIONS DE L'INSTITUT POLYTECHNIQUE DE TALLINN  
Serie A no. 87 1957

---

S. BOUATGHIDZÉ

Réglage des puissances actives  
et réactives d'un chaînon interréseaux  
à courant continu

EDITIONS DE L'INSTITUT POLYTECHNIQUE DE TALLINN  
TALLINN 1957





Ep. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
Серия А № 87 1957

---

С. Р. БУАЧИДЗЕ

Регулирование активной и реактивной  
мощностей межсистемного звена  
постоянного тока

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН 1957

---

PUBLICATIONS DE L'INSTITUT POLYTECHNIQUE DE TALLINN  
Serie A по. 87 1957

---

S. BOUATGHIDZÉ

Réglage des puissances actives  
et réactives d'un chaînon interréseaux  
à courant continu

EDITIONS DE L'INSTITUT POLYTECHNIQUE DE TALLINN  
TALLINN 1957

Ep. 922

ENSV Teaduste Akadeemia  
Keskraamatukogu





## I. ОСНОВНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ И НАМЕЧЕННАЯ ЦЕЛЬ

Включение в энергетические системы переменного тока автоматически регулируемых промежуточных элементов постоянного тока вносит много оригинальных моментов в общую картину работы этих систем [л. 1 и 2].

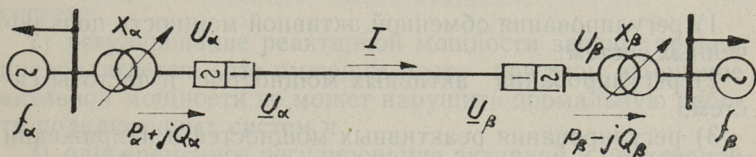


Рис. 1.

Исходная схема дана на рис. 1: две энергосистемы соединяются между собой посредством «звена» постоянного тока; посылающая и приемная системы представлены соответствующими эквивалентными элементами — стационарными агрегатами и потребительскими фидерами, а элемент постоянного тока — агрегатами «трансформатор-преобразователь» и линией [л. 3].

Примем следующие условные обозначения: величины постоянного тока будут подчеркнуты снизу черточкой; величины выпрямительной стороны будут иметь индекс ( $\alpha$ ) — символ угла регулирования (зажигания) выпрямителя, а инверторной — индекс ( $\beta$ ) — символ угла регулирования инвертора.

Здесь мы будем иметь в виду мостовую схему соединения преобразователей, которая, как известно, является наиболее приемлемой для передачи энергии. Преобразователи предполагаются с естественной коммутацией. Полученные при этом заключения нетрудно распространить на случаи использования преобразователей с искусственной коммутацией.

Кроме рассматриваемого здесь случая звено может находиться внутри самой системы (внутрисистемное звено) [л. 1]: оно при этом может 1) быть включено параллельно с линиями переменного тока или 2) составить часть кольцевой сети постоянного или же переменного тока.

Посредством специальных регуляторов, воздействующих на сеточное управление преобразователей, можно автоматически регулировать как передаваемую звеном активную мощность, так и реактивные мощности его выпрямителей и инверторов; в результате, звено представляется для посылающей системы как быстрорегулируемая нагрузка, а для приемной системы как быстрорегулируемый генератор.

Это ценное свойство звена может быть использовано для:

- 1) регулирования обменной активной мощности подключенных систем;
- 2) регулирования активных мощностей и частоты систем;
- 3) регулирования реактивных мощностей и напряжения систем;
- 4) ограничения токов короткого замыкания систем и
- 5) повышения степени синхронной устойчивости станций внутри этих систем [л. 2]; проблема синхронной устойчивости между системами, единственной связью между которыми является звено постоянного тока, полностью снимается.

На регулирующее устройство звена может быть возложено выполнение одной из указанных функций. В общем случае регулятор звена может комплексно учитывать несколько указанных факторов. Предположим например, что на такое устройство возложено регулирование, в первую очередь, частоты подключенной системы. Если при этом произойдет недопустимое изменение напряжения переменного тока или же внутрисистемная синхронная устойчивость очутится под угрозой, то регулятор звена может сработать в направлении восстановления напряжения или же резерва по устойчивости станций, даже если при этом будет допущено, как наименьшее зло, некоторое отклонение частоты.

Кроме того, регулирующие устройства должны обеспечить для самого звена:

- 1) устойчивость инверторов;



- 2) ограничение тока и напряжения звена и
- 3) возможно высокий к. п. д. звена без особого при этом ухудшения к. п. д. прилегающих звеньев переменного тока.

Мы здесь ограничимся рассмотрением некоторых основных моментов проблемы регулирования активной и реактивной мощностей межсистемного звена (рис. 1) в установившихся режимах. К другим упомянутым здесь проблемам мы намерены вернуться позже в отдельных работах.

Поднятые в настоящей работе вопросы будут рассмотрены в следующей последовательности:

- 1) регулирование активной мощности звена, предполагая при этом, что изменение реактивных мощностей, которое сопровождает такое регулирование, не имеет существенного значения для режима работы подключенных систем;
- 2) регулирование реактивной мощности звена, причем предполагается, что имеющее место при этом изменение активной мощности не может нарушить нормальную работу подключенных систем и
- 3) одновременное регулирование активной и реактивной мощностей звена.

## II. СХЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗВЕНА И ЕГО УЧАСТИЕ В РЕГУЛИРОВАНИИ АКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ СИСТЕМ

### А. СХЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

#### 1. Общие соображения

Схемы регулирования звена можно разделить на три основные группы:

- 1) схемы регулирования при мало изменяющемся напряжении постоянного тока;
- 2) схемы регулирования при неизменном постоянном токе и
- 3) схемы комбинированного регулирования по ступенчатой характеристике «ток—мощность»  $I = f(P)$ .

Кроме того, в зависимости от месторасположения регулятора мощности, будем иметь схемы с регулятором на выпрямителе или на инверторе.

Рассмотрим принцип работы этих схем и выявим некоторые их свойства.

## 2. Упрощенные блок-схемы регулирования

### 1) Регулирование при неизменном напряжении.

а) Инвертор регулируется регулятором мощности  $R_{P_\beta}$ , а выпрямитель — регулятором напряжения  $R_{U_\alpha}$  (рис. 2).  
Регулятор  $R_{U_\alpha}$  регулирует напряжение  $\underline{U}_\alpha$  выпрямителя

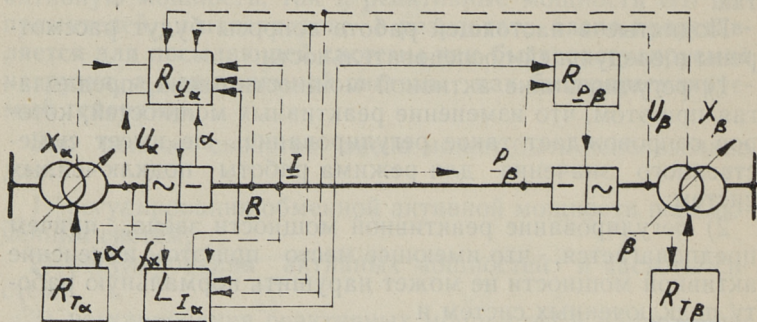


Рис. 2.

(рис. 3) в функции тока  $I$  звена таким образом, чтобы это напряжение  $\underline{U}_{\alpha\beta} = \underline{U}_\alpha - \underline{I}R$ , приведенное к инверторной стороне, держалось ниже линии  $\underline{U}_\delta$  устойчивости инвертора<sup>(1)</sup>.

Если, например, требуется увеличить передаваемую мощность, то регулятор  $R_{P_\beta}$  увеличивает угол ( $\beta$ ) инвертора, что вызывает тенденцию к перемещению рабочей точки (а) направо, вдоль внешней характеристики  $\underline{u}_{\alpha\beta}$  выпрямителя для данного угла ( $\alpha$ ), приведенной к инверторной стороне; тогда вмешивается регулятор  $R_{U_\alpha}$ , который посредством уменьшения угла  $\alpha$  приводит рабочую точку на прямую  $\underline{U}_{\alpha\beta}$ , представляющую собой характеристику этого регулятора, приведенную к инверторному концу; в конечном счете рабочая точка на параболе  $\underline{P}_\beta$  мощности передвинется направо. В случае требования уменьшить мощность будет иметь место обратный процесс.

<sup>(1)</sup> Этот регулятор можно назвать также «регулятором устойчивости инвертора» или же «регулятором компаундирования».



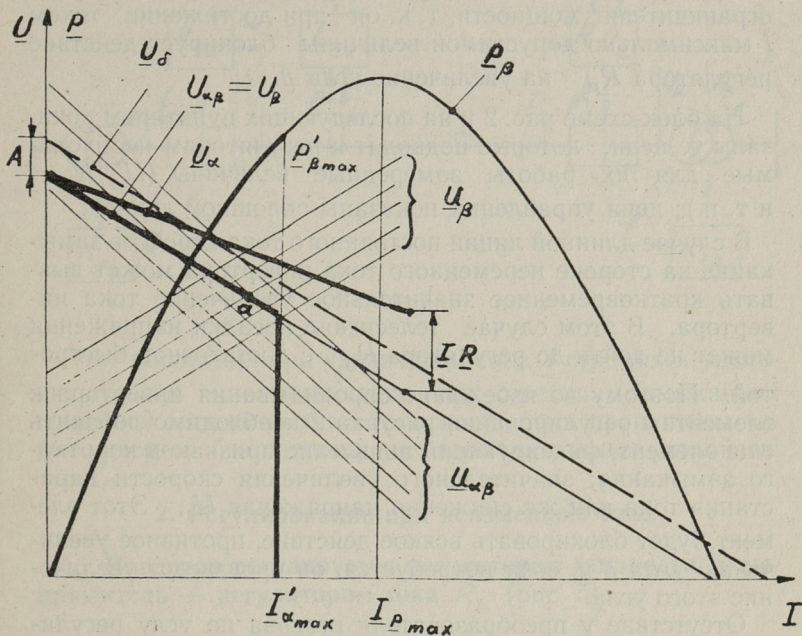


Рис. 3.

Снижение напряжения  $\underline{U}_\beta$  переменного тока инвертора вызывает перемещение вниз линии  $\underline{U}_\delta$  устойчивости инвертора; во избежание опрокидывания инвертора регулятор  $R_{\underline{U}_\alpha}$  контролирует величину  $\underline{U}_\beta$ , которая передается ему по телеканалу связи и, в случае снижения  $\underline{U}_\beta$ , он тоже соответственно перемещает вниз свою характеристику; таким образом эта характеристика постоянно держится ниже линии  $\underline{U}_\delta$ .

Для ограничения тока  $\underline{I}$  звена при перегрузках и коротких замыканиях на стороне постоянного тока устанавливается ограничитель тока  $L_{\underline{I}_\alpha}$  (рис. 2), который блокирует действие регулятора  $R_{\underline{U}_\alpha}$  на снижение  $\alpha$  и подает импульсы на увеличение этого угла.

Кроме того, этот аппарат играет одновременно роль ограничителя мощности, т. к. он при достижении током  $I$  максимально допустимой величины блокирует действие регулятора  $R_{P\beta}$  на увеличение угла  $\beta$ .

На блок-схеме рис. 2 и на последующих пунктиром показаны те цепи, которые подводят к регуляторам необходимые для их работы замеренные величины ( $U_\alpha$ ,  $R_\beta$ ,  $I$  и т. п.); цепи управления показаны сплошной линией.

В случае длинной линии постоянного тока короткое замыкание на стороне переменного тока инвертора может вызвать кратковременное значительное увеличение тока инвертора. В этом случае телесигнал посадки напряжения может не дойти до регулятора  $R_{U_\alpha}$  с достаточной быстротой. Поэтому во избежание опрокидывания инвертора к элементам регулирования рисунка 2 необходимо добавить еще элемент, фиксирующий появление признаков короткого замыкания: значительного увеличения скорости нарастания тока или же снижения напряжения  $U_\beta$ . Этот элемент будет блокировать всякое действие, противное увеличению угла  $\beta$  и, если потребуется, он произведет увеличение этого угла.

Отсутствие у преобразователя резерва по углу регулирования выводит из работы его сеточное управление, что недопустимо [л. 4]. Поддержание этого резерва может быть обеспечено комбинированным действием регуляторов  $R_{T_\beta}$  и  $R_{T_\alpha}^i$  трансформаторов с регулированием под нагрузкой (рис. 2 и последующие) (или же регуляторов синхронных компенсаторов) и регуляторов преобразователей: при достижении предельно допустимых углов  $\alpha_{min}$ ,  $\beta_{min}$ ,  $\alpha_{max}$  и  $\beta_{max}$  первые производят регулирование напряжений  $U_\alpha$  и  $U_\beta$  переменного тока в такую сторону, что регуляторы преобразователей стремятся восстановить соответствующий резерв по углу.

б) Выпрямитель регулируется регулятором мощности  $R_{P_\alpha}$ , а инвертор — регулятором напряжения  $R_{U_\alpha}$  (рис. 4).

Аллор регулирования представлен все тем же рисунком 3. Только по сравнению с предыдущим случаем регуляторы двух концов меняются ролями: регулятор выпрямителя регулирует мощность, а регулятор инвертора поддерживает линию  $U_\beta$  ниже линии устойчивости  $U_\delta$ .



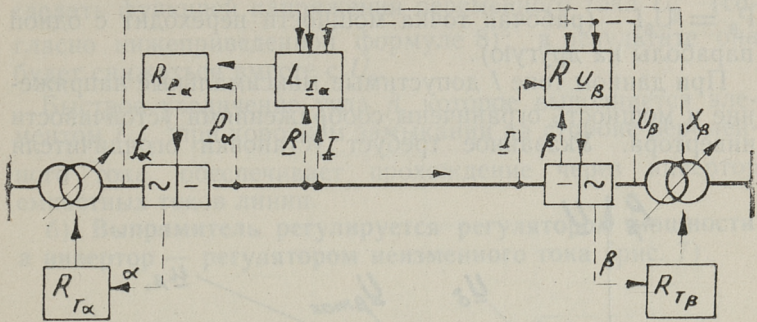


Рис. 4.

Этот последний при увеличении тока  $\underline{I}$  стремится увеличить угол  $\beta$  и появляющиеся при коротких замыканиях приемной сети емкостные токи могут быть пропущены через инвертор без специальных дополнительных устройств.

## 2. Регулирование при неизменном токе

а) Инвертор регулируется регулятором мощности, а выпрямитель — регулятором тока  $R_{I\alpha}$  (рис. 5).

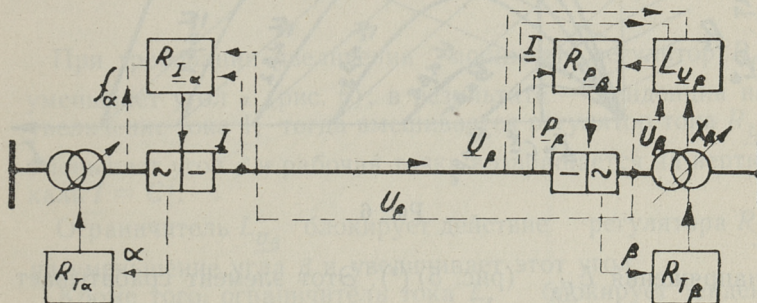


Рис. 5.

При требовании увеличения мощности регулятор  $R_{p\beta}$  уменьшает угол  $\beta$  (рис. 6); в результате — тенденция на снижение тока  $\underline{I}$ ; тогда вмешивается регулятор  $R_{I\alpha}$  уменьшает угол  $\alpha$  и возвращает рабочую точку на вертикаль  $\underline{I} = C \underline{t}$ ; в результате получим увеличение  $\underline{U}_{\beta}$  и

$P_{\beta} = U_{\beta} I$  (рабочая точка мощности переходит с одной параболы на другую).

При данном токе  $I$  допустимые максимальные напряжение и мощность ограничены соображениями устойчивости инвертора. Указанное требует установки ограничителя

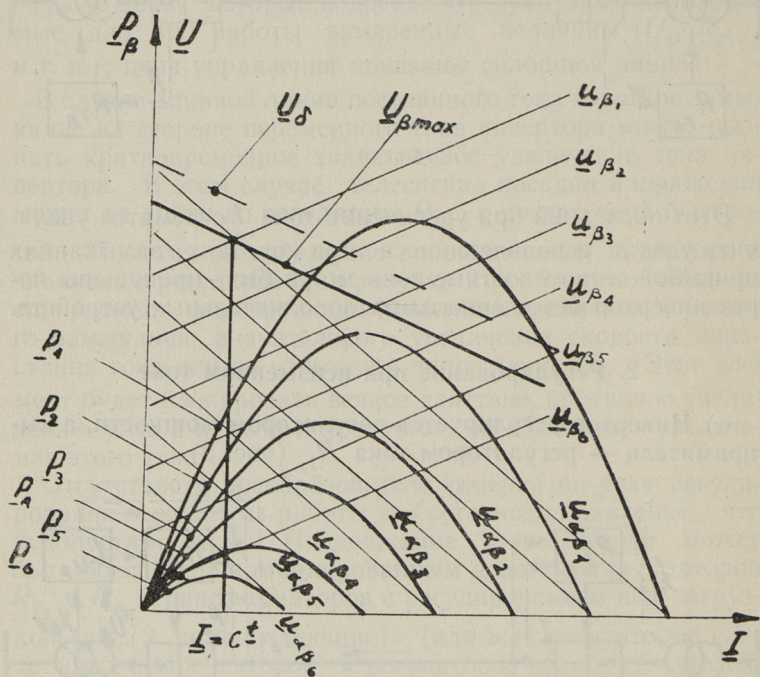


Рис. 6.

напряжения  $L_{U_{\beta}}$  (рис. 5) <sup>(2)</sup>. Этот элемент срабатывает при достижении максимально допустимой при данном токе величины напряжения  $U_{\beta max}$  (рис. 6) и блокирует тенденцию на его дальнейшее увеличение посредством разрыва цепи регулятора  $R_{P_{\beta}}$  на уменьшение угла  $\beta$ ; кроме того, если требуется, он сам дает импульсы на увеличение этого угла. Сверх того, уставку тока регулятора  $R_{I_c}$  можно

<sup>(2)</sup> Этот регулятор можно назвать также «регулятором устойчивости инвертора».



сделать функцией напряжения переменного тока  $U_\beta$  (согласно нижеприведенной формуле 8); в результате она будет снижаться вместе с  $U_\beta$ .

Быстрое увеличение угла  $\beta$ , которое выполняется элементом  $L_{U_\beta}$  при коротком замыкании на стороне переменного тока, обеспечивает прохождение через инвертор емкостных токов линии.

б) Выпрямитель регулируется регулятором мощности, а инвертор — регулятором неизменного тока (рис. 7).

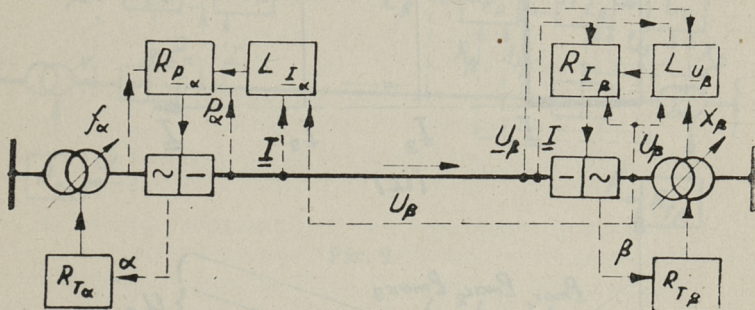


Рис. 7.

При требовании увеличения мощности регулятор  $R_{P_\alpha}$  уменьшает угол  $\alpha$  (рис. 6); в результате — тенденция на увеличение тока  $I$ ; тогда вмешивается регулятор тока  $R_{I_\beta}$ , уменьшает угол  $\beta$  и рабочая точка возвращается на вертикаль  $I = C^t$ .

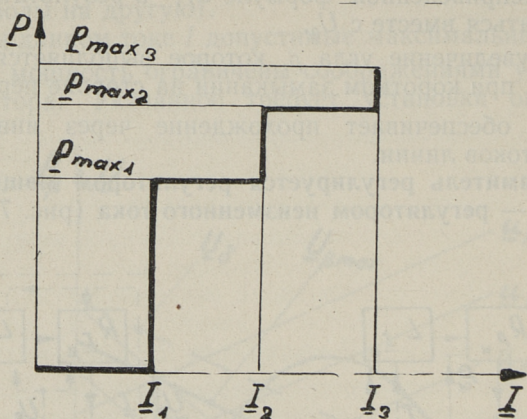
Ограничитель  $L_{U_\beta}$  блокирует действие регулятора  $R_{I_\beta}$  на уменьшение угла  $\beta$  и увеличивает этот угол.

Кроме того, ограничитель тока  $L_{I_\alpha}$  блокирует тенденцию регулятора  $R_{P_\alpha}$  на снижение угла  $\alpha$  и увеличивает этот угол.

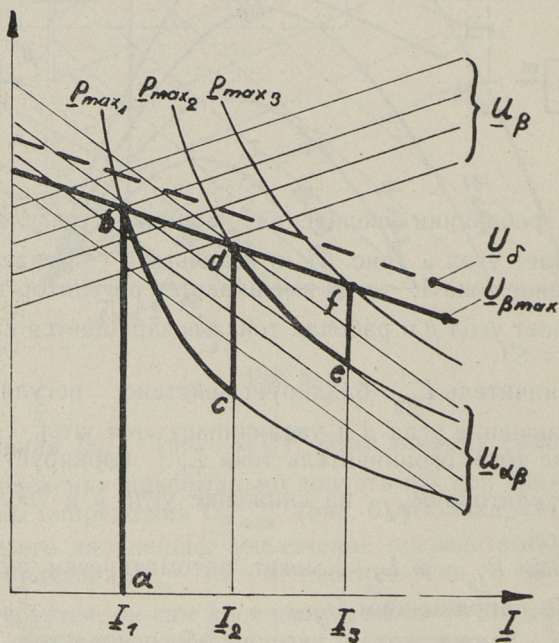
Уставки  $R_{I_\beta}$  и  $L_{I_\alpha}$  могут автоматически снижаться вместе с напряжением  $U_\beta$ .

Здесь, также как и выше, обеспечивается пропуск емкостных токов через инвертор при коротких замыканиях.

3) Комбинированное регулирование по ступеньчатой характеристике «ток-мощность»  $\underline{I} = f(\underline{P})$ .



(a)



(b)

Рис. 8.





чины, то уставка тока регулятора  $R_{I\beta}$  автоматически переключается на следующую, низшую ступень; в результате, рабочая точка проходит в обратную сторону тот же путь между двумя ступенями, (на рис. 8 в переход со второй ступени на первую совершается вдоль сегмента  $(cb)$ ).

Ограничитель мощности  $L_{P\alpha}$  (рис. 9) срабатывает в момент достижения верхней, крайней точки последней ступени (точка  $f$  на рис. 8 в) и блокирует импульсы на уменьшение угла  $\beta$ .

Роль ограничителя тока  $L_{I\alpha}$  та же, что в случае схемы рис. 7.

При снижении напряжения  $U_\beta$ , вызванного, например, коротким замыканием на стороне переменного тока инвертора, линия максимальных напряжений  $U_{\beta max}$  перемещается вниз; в результате зоны регулируемых напряжений и мощностей отдельных ступеней уменьшаются.

**в) Инвертор регулируется регулятором мощности, а выпрямитель — регулятором неизменного тока.**

Регулирование в пределах ступени может быть выполнено таким же образом как на рис. 5. Но осуществление перехода с одной ступени на другую затрудняется, т. к. действие регуляторов мощности  $R_{P\beta}$  и тока  $R_{I\alpha}$  получается взаимно противоречивым. Поэтому мы эту схему рассматривать не будем.

### 3. Анализ некоторых схем регулирования

В рамках данной работы ограничимся подробным рассмотрением только двух из вышеуказанных схем.

В последующем мы будем пренебрегать: 1) высшими гармониками тока и напряжения; 2) намагничивающими токами и активными сопротивлениями преобразовательных трансформаторов, и 3) токами утечки высоковольтной линии постоянного тока.

1) Регулирование при неизменном напряжении, с регулятором мощности на инверторе и регулятором напряжения на выпрямителе (рис. 2 и 3).

а) Выбор параметров системы регулирования.

Как известно, при мостовом соединении напряжение на



стороне постоянного тока выпрямителя с естественной коммутацией для данного угла  $\alpha$ ,

$$\underline{u}_\alpha = 2,34 U_\alpha \cos \alpha - \frac{IX_\alpha}{\pi/3} = \underline{U}_\beta + \underline{RI}, \quad (1')$$

где  $U_\alpha$  — напряжение со стороны переменного тока,  $X_\alpha$  — реактанс трансформатора,  $\underline{U}_\beta$  — напряжение на стороне постоянного тока инвертора и  $\underline{R}$  — сопротивление линии постоянного тока.

Это напряжение, приведенное к инвертору, будет уменьшено на потерю напряжения  $\underline{RI}$  в линии:

$$\underline{u}_{\alpha\beta} = 2,34 U_\alpha \cos \alpha - I \left( \frac{X_\alpha}{\pi/3} + \underline{R} \right) = \underline{u}_\beta. \quad (1'')$$

Аналогично, напряжение инвертора для данного угла  $\beta$ ,

$$\underline{u}_\beta = 2,34 U_\beta \cos \beta + \frac{IX_\beta}{\pi/3}. \quad (1''')$$

Линия устойчивости инвертора  $\underline{U}_\delta = f(I)$  (рис. 3) дается соотношением

$$\underline{U}_\delta = 2,34 U_\beta \cos \delta - \frac{IX_\beta}{\pi/3}, \quad (2)$$

где  $\delta$  — угол опрокидывания инвертора.

Приведенная к инверторному концу характеристика регулятора напряжения  $\underline{U}_{\alpha\beta} = f(I)$  должна лечь ниже линии  $\underline{U}_\delta$  устойчивости инвертора. Беря характеристику  $\underline{U}_{\alpha\beta}$  параллельной линии  $\underline{U}_\delta$  (рис. 3), получим для рабочей точки:

$$\underline{U}_{\alpha\beta} = \underline{U}_\delta - A = \underline{u}_\beta \quad (3')$$

где  $A = C\underline{I}$  представляет собой запас безопасности по напряжению.

Это выражение, с учетом (1) и (2), примет следующий вид:

$$\begin{aligned} 2,34 U_\alpha \cos \alpha - I \left( \frac{X_\alpha}{\pi/3} + \underline{R} \right) &= 2,34 U_\beta \cos \delta - \left( \frac{IX_\beta}{\pi/3} + A \right) = \\ &= 2,34 U_\beta \cos \beta + \frac{IX_\beta}{\pi/3} \end{aligned} \quad (3'')$$





Отсюда получим предписываемый регулятору напряжения закон регулирования угла  $\alpha$  (рис. 10, блок-схема регулирования):

$$\cos \alpha = \frac{1}{U_{\alpha}} \left\{ U_{\beta} \cos \delta + 0,43 \left[ I \left( \frac{X_{\alpha} - X_{\beta}}{\pi/3} + \underline{R} \right) - A \right] \right\} \quad (4)$$

С точки зрения безопасности инвертора при несимметричных режимах напряжения переменного тока необходимо считаться в первую очередь с тем фазным напряжением  $U_{\beta}$ , которое наиболее снижается при таких режимах [л. 8] (\*); именно это напряжение должно подводиться к регулятору для составления уравнения (4). Кроме того, необходимо вводить в указанное уравнение наиболее высокое фазное напряжение  $U_{\alpha}$ .

В дальнейшем мы будем иметь в виду случай, когда сопротивления линии и трансформаторов такие, что

$$\left( \frac{X_{\alpha}}{\pi/3} + \underline{R} \right) > \frac{X_{\beta}}{\pi/3}. \quad (5)$$

В данном случае внешняя характеристика  $\underline{u}_{\alpha\beta}$  выпрямителя (1'') будет иметь больший наклон, чем характеристика  $\underline{U}_{\alpha\beta}$  регулятора.

Мощность на приемном конце, с учетом значения  $\underline{U}_{\beta}$  из (3),

$$\underline{P}_{\beta} = \underline{U}_{\beta} I = (2,34 U_{\beta} \cos \delta - A) I - \frac{X_{\beta}}{\pi/3} I^2. \quad (6)$$

Она представляется в виде параболы (рис. 3).

Беря производную от  $\underline{P}_{\beta}$  и приравнявая ее к нулю, получим значение тока, при котором имеет место максимум мощности:

$$\underline{I}_{P_{max}} = \frac{2,34 U_{\beta} \cos \delta - A}{1,91 X_{\beta}}. \quad (7)$$

Зона регулирования должна быть ограничена подымающейся частью параболы, т. к. на ее ниспадающей части 1) активная мощность начинает снижаться при увеличении тока, что осложняет регулирование, 2) снижается к. п. д. звена и 3) увеличивается удельный расход реак-

(\*) На Готландской передаче т. н. консекитивный регулятор регулирует угол  $\beta$  каждого инверторного вентиля в отдельности в функции напряжения анод-катод данного вентиля [л. 9].

тивной мощности звена (см. далее). Поэтому элемент  $L_{I_\alpha}$  (рис. 2 и 10) должен ограничить максимальный ток звена значением  $I_{\alpha max}$ , не превышающим  $I_{P max}$ :

$$I_{\alpha max} = K \frac{2,34 U_\beta \cos \delta - A}{1,91 X_\beta} \quad (8)$$

где  $K \leq 1$ .

Нагрузка звена должна быть ограничена в тех случаях, когда посылающая система перегружается. С этой целью коэффициент ( $K$ ) можно сделать функцией частоты  $f_\alpha$  (рис. 10) или же, еще лучше, функцией вращающегося резерва посылающей системы [л. 5].

### в) Реактивные мощности и к. п. д. звена.

Коэффициент мощности выпрямительного конца

$$\cos \varphi_\alpha \approx \cos \alpha - \frac{X_\alpha I}{2 U_\alpha} \quad (9)$$

или же, принимая во внимание соотношение переменного и постоянного токов,

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}} I_-, \quad (10)$$

$$\cos \varphi_\alpha \approx \cos \alpha - \frac{X_\alpha I_-}{2,45 U_\alpha} \quad (11)$$

Аналогично на инверторной стороне

$$\cos \varphi_\beta \approx \cos \beta + \frac{X_\beta I_-}{2,45 U_\beta} \quad (12)$$

Учитывая полученные выражения, можно определить удельный расход реактивной мощности на выпрямителе:

$$q_\alpha = \frac{\sin \varphi_\alpha}{\cos \varphi_\alpha} = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_\alpha} - 1} \text{ KVAR/KW}, \quad (13')$$

или

$$q_\alpha = \sqrt{\frac{1}{\left(\cos \alpha - \frac{X_\alpha I_-}{2,45 U_\alpha}\right)^2} - 1} \text{ KVAR/KW}, \quad (13'')$$

и на инверторе:

$$q_\beta = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_\beta} - 1} \text{ KVAR/KW}, \quad (14')$$



или же

$$q_{\beta} = \sqrt{\frac{1}{\left(\cos\beta + \frac{X_{\beta} I}{2,45 U_{\beta}}\right)^2} - 1} \text{ KVAR/KW.} \quad (14'')$$

Но более выгодно знать удельный расход  $q_{\alpha\beta}$  выпрямителя по отношению к мощности  $P_{\beta}$ , выданной в приемную систему. Обозначая через  $Q_{\alpha}$  реактивную мощность выпрямителя получим

$$q_{\alpha\beta} = \frac{Q_{\alpha}}{P_{\beta}} = q_{\alpha} \frac{P_{\beta} + R I^2}{P_{\beta}} = q_{\alpha} \left(1 + \frac{R I^2}{P_{\beta}}\right) \text{ KVAR/KW} \quad (15')$$

где, с учетом (10),

$$P_{\beta} = 3U_{\beta} I \cos\varphi_{\beta} = 2,45U_{\beta} I \cos\varphi_{\beta} \quad (16)$$

Опираясь на (13') и (16) получим из (15'):

$$q_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_{\alpha}} - 1} \left(1 + \frac{R I}{2,45 U_{\beta} \cos\varphi_{\beta}}\right) \text{ KVAR/KW} \quad (15'')$$

Суммарный удельный расход звена, приведенный к мощности  $P_{\beta}$ .

$$q = q_{\alpha\beta} + q_p \text{ KVAR/KW.} \quad (17)$$

В данном частном случае регулирования эти общие выражения могут быть использованы следующим образом. Подставляя в (11) значение  $\cos\alpha$  из (4), получим

$$\cos\varphi_{\alpha} = \frac{1}{U_{\alpha}} \left\{ U_{\beta} \cos\delta + 0,43 \left[ I \left( R - \frac{X_{\beta}}{\pi/3} \right) - A \right] \right\}. \quad (18)$$

С другой стороны, из (3''),

$$\cos\beta = \cos\delta - \frac{1,91X_{\beta}I + A}{2,34U_{\beta}}. \quad (19)$$

Подставляя это значение (4) в (12), получим

$$\cos\varphi_{\beta} = \cos\delta - \frac{0,41X_{\beta}I + 0,43A}{U_{\beta}}. \quad (20)$$

(4) Отметим здесь, что уравнение (19) представляет собой закон регулирования угла  $\beta$ , предписываемый регулятору напряжения в случае его установки на инверторе, согласно схемы рис. 4.

Используя значения (18) и (20) коэффициентов мощности, можно рассчитать удельные расходы звена согласно (14'), (15'') и (17).

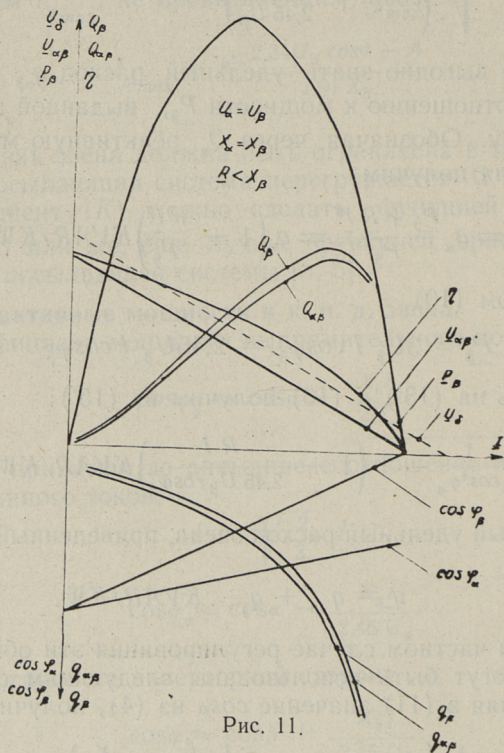


Рис. 11.

К. п. д. звена

$$\eta = \frac{U_\beta}{U_\beta + RI} 100 = \frac{100}{1 + \frac{RI}{U_\beta}}, \quad (21')$$

или, считаясь со значением  $U_\beta$  в (3),

$$\eta = \frac{100}{1 + \frac{R}{2,34 U_\beta \cos \delta - A} - \frac{X_\beta}{\pi/3}} \quad (21'')$$

Рис. 11 дает аллюр регулируемых величин в функции тока звена при применении данной схемы.



2) Ступенчатое регулирование с регулятором мощности на выпрямителе и регулятором неизменного тока на инверторе (рис. 8, 9 и 12).

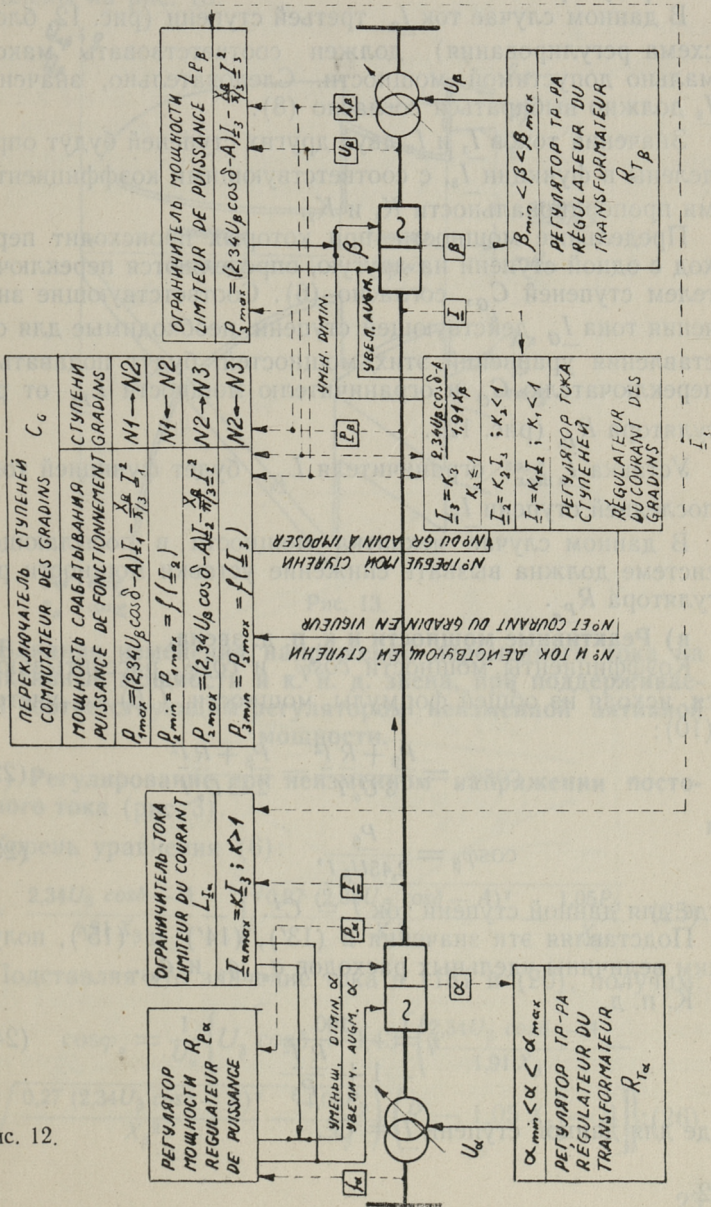


Рис. 12.

### а) Выбор параметров системы регулирования

Будем опираться на выбранный пример трехступенчатого регулирования.

В данном случае ток  $\underline{I}_3$  третьей ступени (рис. 12, блок-схема регулирования) должен соответствовать максимально допустимой мощности. Следовательно, значение  $\underline{I}_3$  должно выбираться согласно (8).

Значения токов  $\underline{I}_1$  и  $\underline{I}_2$  двух других ступеней будут определены в функции  $\underline{I}_3$ , с соответствующими коэффициентами пропорциональности  $K_1$  и  $K_2$ .

Предельные мощности, при которых происходит переход с одной ступени на другую, определяются переключателем ступеней  $C_G$ , согласно (6). Соответствующие значения тока  $\underline{I}_G$  действующей ступени, необходимые для составления уравнений этих мощностей, будут подаваться переключателю  $C_G$  и ограничителю мощности  $L_{P_\beta}$  от регулятора  $R_{I_\beta}$  (рис. 12).

Уставка  $\underline{I}_{\alpha \max}$  ограничителя  $L_{I_\alpha}$  будет функцией тока последней ступени  $\underline{I}_3$ .

В данном случае нехватка мощности в посылающей системе должна вызвать снижение уставки мощности регулятора  $R_{P_\alpha}$ .

### в) Реактивные мощности и к. п. д. звена.

Коэффициенты мощности  $\cos \varphi_\alpha$  и  $\cos \varphi_\beta$  рассчитываются, исходя из общей формулы мощности (16), с учетом (10):

$$\cos \varphi_\alpha = \frac{P_\beta + R I^2}{3 U_\alpha I} = \frac{P_\beta + R I^2}{2,45 U_\alpha I} \quad (22)$$

и

$$\cos \varphi_\beta = \frac{P_\beta}{2,45 U_\beta I}, \quad (23)$$

где для данной ступени ток  $I = C I_t$ .

Подставляя эти значения в (13'), (14') и (15'), получим величины удельных расходов  $q_\alpha$ ,  $q_\beta$  и  $q_{\alpha\beta}$ .

К. п. д.

$$\eta = \frac{100}{1 + \frac{R I^2}{P_\beta}} \quad (24)$$

где для данной ступени  $I = C I_t$ .



Кривые, соответствующие данному регулированию, для звена, имеющего те же параметры, что на рис. 11, представлены на рис. 13.

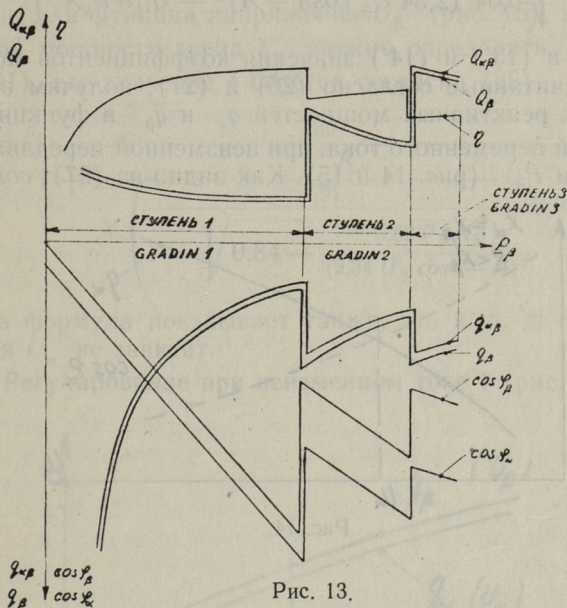


Рис. 13.

4. Влияние изменения напряжений переменного тока на реактивные мощности и к. п. д. звена, при поддерживаемой соответствующим регулятором неизменной активной мощности.

1) Регулирование при неизменном напряжении постоянного тока (рис. 3).

Корень уравнения (6):

$$I = \frac{2,34U_{\beta} \cos \delta - A}{1,91 X_{\beta}} - \sqrt{\frac{0,27 (2,34U_{\beta} \cos \delta - A)^2}{X_{\beta}^2} - \frac{1,05P_{\beta}}{X_{\beta}}} \quad (25)$$

Подставляя это значение тока в (18) и (20), получим:

$$\cos \varphi_{\alpha} = \frac{1}{U_{\alpha}} \left\{ U_{\beta} \cos \delta + 0,43 \left[ \left( \frac{2,34U_{\beta} \cos \delta - A}{1,91 X_{\beta}} - \sqrt{\frac{0,27 (2,34U_{\beta} \cos \delta - A)^2}{X_{\beta}^2} - \frac{1,05P_{\beta}}{X_{\beta}}} \right) (R - 1,05 X_{\beta}) - A \right] \right\}; \quad (26)$$

$$\cos \varphi_{\beta} = 0,5 \cos \delta - \frac{1}{U_{\beta}} \left( 0,22A - \sqrt{0,04 (2,34 U_{\beta} \cos \delta - A)^2 - 0,18 P_{\beta} X_{\beta}} \right) \quad (27)$$

Вводя в (13') и (14') значения коэффициентов мощности, рассчитанные согласно (26) и (27), получим аллюр удельных реактивных мощностей  $q_{\alpha}$  и  $q_{\beta}$  в функции напряжений переменного тока, при неизменной передаваемой мощности  $P_{\beta}$  (рис. 14 и 15). Как видно из (27),  $\cos \varphi_{\beta}$  и,

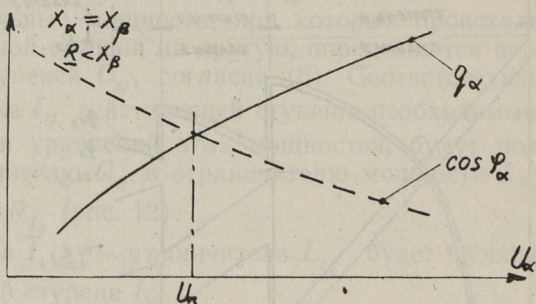


Рис. 14.

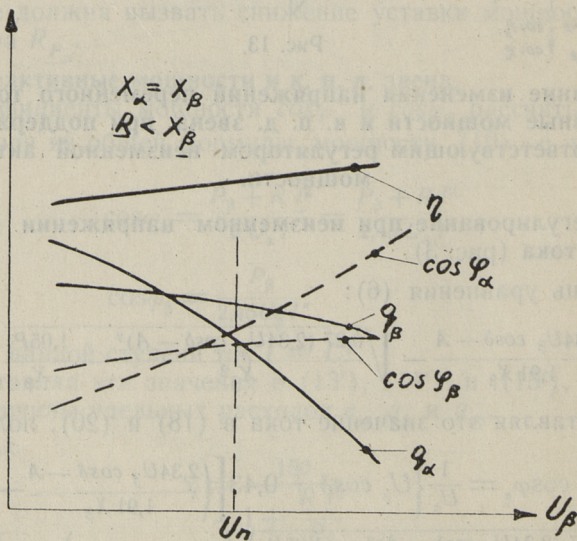


Рис. 15.



следовательно, удельный расход на инверторной стороне  $q_{\beta}$  не зависят от напряжения выпрямительной стороны  $U_{\alpha}$ .

К. п. д. в функции напряжения  $U_{\beta}$  (рис. 15), при неизменной мощности звена  $\underline{P}_{\beta}$  можно определить, опираясь на (21), где значение  $\underline{I}$  берется согласно (25):

$$\eta = \frac{100}{1 + \frac{R}{X_{\beta} \left( 1 - \sqrt{0,84 - \frac{3,82 P_{\beta} X_{\beta}}{(2,34 U_{\beta} \cos \delta - A)^2}} - 0,95 \right)}}$$

Эта формула показывает также, что к. п. д. от напряжения  $U_{\alpha}$  не зависит.

## 2) Регулирование при неизменном токе $\underline{I}$ (рис. 6).

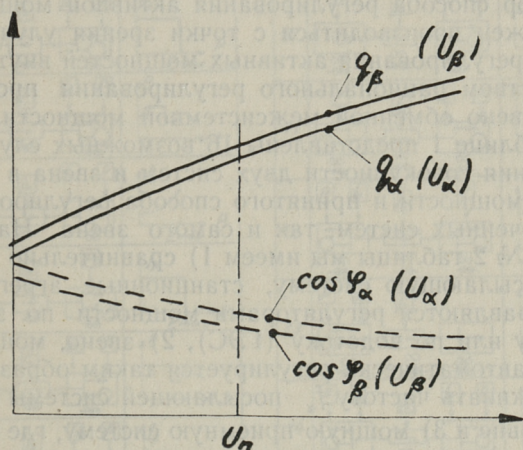


Рис. 16.

В выражениях коэффициентов мощности (22) и (23) величины  $\underline{P}_{\beta}$  и  $\underline{I}$  остаются неизменными. Таким образом, эти коэффициенты и пропорциональные им удельные расходы реактивной мощности зависят каждый только от своего напряжения  $U_{\beta}$  или  $U_{\alpha}$  (рис. 16).

Формула (24) показывает, что при неизменных  $\underline{P}_\beta$  и  $\underline{I}$  и данном  $\underline{R} = C\underline{t}$  к. п. д. звена от напряжений переменного тока не зависит.

## Б. Регулирование активной мощности межсистемного звена.

### 1. Различные способы регулирования звена.

Частоты двух систем, имеющих связь через звено постоянного тока, могут быть выбраны разными, также как их методы регулирования, что есть одно из преимуществ применения такого звена.

Мощность, протекающую через звено, можно регулировать или 1) в функции частоты подключенной системы, посылающей или же приемной, или же 2) по заданному графику. В первом случае регулирующее устройство звена выполняет роль регулятора частоты, а во втором — регулятора заданной мощности.

Выбор способа регулирования активной мощности звена должен производиться с точки зрения улучшения качества регулирования активных мощностей внутри систем, посредством рационального регулирования протекающей через звено обменной межсистемной мощности.

В таблице 1 представлены 16 возможных случаев регулирования совокупности двух систем и звена в зависимости от мощности и принятого способа регулирования как подключенных систем, так и самого звена. Например, в случае № 2 таблицы мы имеем 1) сравнительно маломощную посылающую систему, стационарные агрегаты которой управляются регуляторами мощности по заданному графику или по водотоку (ГЭС), 2) звено, мощность которого автоматически регулируется таким образом, чтобы поддерживать частоту  $f_\alpha$  посылающей системы на заданном уровне и 3) мощную приемную систему, где стационарные агрегаты управляются регуляторами частоты  $f_\beta$  и, возможно, еще регуляторами мощности по графику.

В случаях №№ 6 и 9 таблицы звено регулируется регулятором мощности по заданному диспетчером графику.

В случаях 4 и 7 таблицы астатическое регулирование частоты возлагается на соответствующие станции систем, а регулятор звена изменяет обменную мощность в функции частоты, причем характеристика регулятора имеет статизм или же она криволинейна.



# ТАБЛИЦА I TABLEAU I

СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ И ЧАСТОТ КОМПЛЕКСА  
"ПОСЫЛАЮЩАЯ СИСТЕМА—ЗВЕНО—ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА"

MODES DE RÉGLAGE DES PUISSANCES ACTIVES ET DES FRÉQUENCES DU  
COMPLEXE "RÉSEAU ÉMETTEUR—CHAÎNON—RÉSEAU RECEPTEUR"

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

LEGENDE

- $\square P$  РЕГУЛЯТОР МОЩНОСТИ
- $\square f_a$  РЕГУЛЯТОР ЧАСТОТЫ ПОСЫЛАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
- $\square f_b$  РЕГУЛЯТОР ЧАСТОТЫ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ

- $\rightarrow$  ЗВЕНО ПОСТОЯННОГО ТОКА
- $\infty$  МОЩНАЯ СИСТЕМА ИЛИ ЗВЕНО
- $\infty$  СИЛАМОЩНАЯ СИСТЕМА ИЛИ ЗВЕНО

№	СХЕМА КОМПЛЕКСА SCHEMA DU COMPLEXE	ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГУЛЯТОРА ЗВЕНА CARACTÉRISTIQUE DU RÉGULATEUR DE CHAÎNON
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

№	СХЕМА КОМПЛЕКСА SCHEMA DU COMPLEXE	ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГУЛЯТОРА ЗВЕНА CARACTÉRISTIQUE DU RÉGULATEUR DE CHAÎNON
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		

Мы здесь будем иметь в виду регулирование частоты по методу «ведущей станции». Полученные заключения нетрудно распространить на те случаи, когда частота регулируется другими методами, как например, по «виртуальному статизму», «фазе — мощности», «задающему вектору» и т. п. [л. 1].

## 2. Выбор схемы регулирования звена.

На этот выбор влияют в основном: 1) принятый способ регулирования; 2) соображения о балансе реактивной мощности по концам звена; 3) место установки (на выпрямителе или на инверторе) регулятора мощности звена и 4) роль, которую может играть звено при решении проблемы синхронной устойчивости внутри подключенных систем. К последнему вопросу мы намерены вернуться в отдельной работе, а здесь будем предполагать, что он не влияет на выбор схемы.

Регулятор мощности желательно установить на стороне той системы, параметр которой он призван регулировать. В противном случае потребуется установка соответствующей телесигнализации вдоль звена. Возьмем, например, случай № 2 таблицы, где регулятор звена поддерживает частоту посылающей системы. Здесь лучше взять схему, рис. 4 или 9, с регулятором на выпрямителе.

Что касается потребления реактивной мощности, мы видим, что при применении регулирования: 1) на неизменное напряжение (схемы рис. 2 и 4) реактивные мощности по концам звена  $Q_{\alpha\beta}$  и  $Q_{\beta}$  (рис. 11), при одинаковых напряжениях  $U_{\alpha}$  и  $U_{\beta}$ , могут, в зависимости от величины сопротивления  $R$  линии (формула 15), различаться между собой в той или иной степени; 2) на неизменный ток или же ступеньчатое (рис. 9) — реактивные мощности на двух концах звена мало отличаются друг от друга. Следовательно, с данной точки зрения регулирование при неизменном напряжении подходит для звена с сравнительно разными по реактивной мощности шинами посылающей и приемной систем, а регулирование на неизменный ток или же ступеньчатое — для звена с приблизительно одинаковыми по такой мощности шинами.

Регулирование на неизменный ток подходит для звеньев, режим работы которых мало отклоняется от номинального, исходя из которого выбирается значение тока  $I$ ; при малых нагрузках ухудшаются к. п. д., коэффициенты



мощности и форма кривой выпрямленного напряжения звена.

Готландское звено шведской системы находится в условиях случая № 5 таблицы: энергия от мощной системы материка передается на остров Готланд через звено постоянного тока. В принципе схема регулирования аналогична схеме рис. 4: регулятор частоты приемной системы воздействует на выпрямители [л. 4].

Схема регулирования первой советской передачи постоянного тока [л. 6 и 7] представляется в виде упрощенной схемы рис. 4: регулятор инвертора регулирует угол  $\beta$ , исходя из соображений его устойчивости; регулятор  $R_{P\alpha}$  рисунка превращен здесь в регулятор неизменного тока, т. е. неизменной мощности в нормальном режиме.

### 3. Скорость регулирования.

В тех случаях, когда требуется астатическое регулирование частоты  $f_\alpha$  или  $f_\beta$  звеном (случаи №№ 1, 2, 4 и т. п. таблицы), быстроотзывчивость преобразователей с сеточным управлением должна быть полностью использована, если только при этом не имеют место толчки нагрузки и колебательный процесс в подключенных маломощных системах и звене, вызванные неодинаковой скоростью срабатывания регулятора звена и регуляторов турбин при изменении частоты.

В последнем случае, а также в тех случаях, когда частота  $f_\alpha$  или  $f_\beta$  регулируется звеном по статической характеристике (случаи №№ 4, 7, 14 и 15 таблицы), необходимо снизить скорость регулирования звена до величины, сравнимой со скоростью регулирования турбин подключенных станций [л. 1].

### 4. Регулирование звена и короткие замыкания.

Во всех рассмотренных схемах регулирования регуляторы или же ограничители тока, а также регуляторы напряжения, снижают ток звена при снижении напряжения переменного тока. В частности, если имеет место короткое замыкание в непосредственной близости от инвертора ( $U_\beta = 0$ ), то ток, идущий от звена, сводится к нулю.

При коротких замыканиях на стороне постоянного тока упомянутые ограничители сводят токи короткого замыка-

ния в установившихся режимах к значениям, мало отличающимся от номинальных.

С другой стороны станции приемной системы не могут питать короткие замыкания, имеющие место на стороне постоянного тока звена или же в посылающей системе, из-за униполярной проводимости звена.

Следовательно, по сравнению со звеном переменного тока, звено постоянного тока значительно снижает токи короткого замыкания; в результате — облегчение соответствующей токопроводящей аппаратуры и чувствительное снижение его стоимости для систем [л. 1].

### III. ЗВЕНО И РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕАКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ СИСТЕМ

Подобранные соответствующим образом схемы регулирования активной мощности звена могут, до некоторой степени, обеспечить также одновременное участие звена в поддержании напряжения прилегающих сетей переменного тока.

Однако, если основным является вопрос регулирования реактивной мощности указанных сетей, то лучше подчинить звено соответствующему регулятору реактивной мощности или напряжения переменного тока. Рассмотрим такое регулирование.

#### А. Схемы регулирования реактивной мощности звена

Использованные схемы будут те же, что в случае регулирования активных мощностей (рис. 2...13); только регулятор реактивной мощности займет место регулятора активной мощности.






















Если например, звено должно участвовать в регулировании реактивной мощности приемных шин, то можно применить блок-схему рис. 10; здесь регулятор  $R_{P_\beta}$  будет заменен регулятором реактивной мощности  $R_{Q_\beta}$ . Уставка  $I_{\alpha_{max}}$  ограничителя тока  $L_{I_\alpha}$  рассчитывается таким же путем, как при регулировании активной мощности (формулы 6...8), но исходя из выражения реактивной мощности  $Q_\beta = 2,45 U_\beta I \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_\beta}$ . В данном случае максимум кривой  $Q_\beta = f(I)$  имеет место при токе, большем чем у  $P_\beta = f(I)$  (рис. 11).



## ТАБЛИЦА II      TABLEAU II

СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ  
КОМПЛЕКСА „ПОСЫЛАЮЩАЯ СИСТЕМА—ЗВЕНО—ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА”

M ODES DE RÉGLAGE DES PUISSANCES RÉACTIVES DU COM-  
PLEXE “RÉSEAU ÉMETTEUR—CHAÎNON—RÉSEAU RÉCEPTEUR”

№2	СХЕМА КОМПЛЕКСА И ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЯТОРОВ SCHEMA DU COMPLEXE ET LES CARACTÉRISTIQUES DES RÉGULATEURS		
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

## В. Регулирование реактивной мощности звена

Возможные способы регулирования реактивной мощности звена показаны в таблице II.

В случае № 1 таблицы выпрямительные шины питаются от генераторов реактивной мощности, управляемых регулятором реактивной мощности по заданному графику  $Q_\alpha$ , а инверторные шины — генераторами реактивной мощности, управляемыми регулятором напряжения  $U_\beta$ ; роль звена заключается в астатическом регулировании напряжения  $U_\alpha$  выпрямительных шин, посредством воздействия на реактивную мощность звена.

В случае № 2 таблицы — положение, обратное случаю № 1: звено регулирует напряжение  $U_\beta$  приемных шин.

В случаях №№ 3 и 4, мы имеем соответственно регулирование звеном, по заданному графику реактивной мощности выпрямительного или же инверторного конца.

В случае № 5 звено производит регулирование реактивной мощности по заданному графику одновременно для двух его концов.

В случаях №№ 6 и 7 реактивная мощность  $Q_\alpha$  или  $Q_\beta$  регулируется в функции напряжения  $U_\alpha$  или  $U_\beta$  согласно заданной кривой, или же прямой со статизмом.

Вышеизложенные общие соображения о выборе схемы регулирования активной мощности звена приложимы и к данному случаю. В частности необходимо удостовериться, что 1) подключенные системы могут без вреда себе воспринять изменения активной обменной мощности, имеющие место при регулировании реактивной мощности и 2) при регулировании реактивной мощности одного конца звена система на противоположном конце не пострадает от соответствующего изменения реактивной мощности.

Так как ступеньчатое регулирование (рис. 13) дает скачкообразное изменение реактивной мощности, оно не подходит для случаев №№ 1, 2, 6 и 7 таблицы, где требуется плавное регулирование этой мощности.

В случае № 5 таблицы можно использовать схему регулирования на неизменный ток или же ступеньчатое регулирование, т. к. они обеспечивают изменение в одну и ту же сторону и в одинаковой пропорции реактивных мощностей на двух концах звена.



Вышеизложенные соображения о скорости регулирования действительны и для данного случая <sup>(5)</sup>.

Гибкость и пределы регулирования увеличиваются, когда звено состоит из нескольких параллельных линий со своими собственными преобразователями: им можно задать различные режимы работы, которые в сумме дадут желаемый закон регулирования мощностей всего звена в целом.

Рассмотрим, в частности, случай звена, состоящего из двух линий с одинаковыми параметрами, снабженных

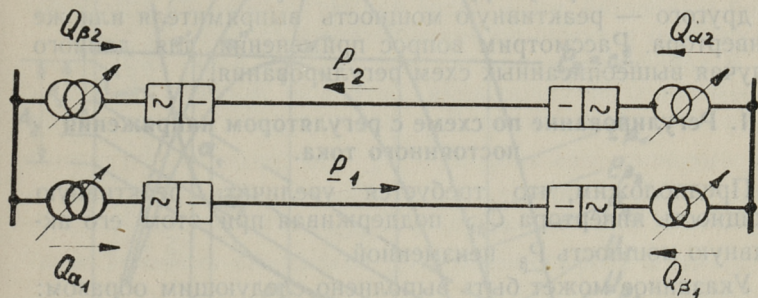


Рис. 17.

регулированием реактивной мощности по одной и той же схеме (рис. 17). Если этим линиям задать режим работы, состоящий в передаче одинаковой активной мощности ( $\underline{P}_1 = \underline{P}_2$ ) во взаимно противоположных направлениях, то на двух концах звена будет иметь место равенство реактивных мощностей:

$$Q_{\alpha 1} + Q_{\beta 2} = Q_{\alpha 2} + Q_{\beta 1},$$

где  $Q_{\alpha 1} = Q_{\alpha}$  и  $Q_{\beta 1} = Q_{\beta 2}$ .

Следовательно, такое звено, которое, например, в нормальных условиях передает активную мощность по обеим линиям в одну и ту же сторону, может быть временно использовано для регулирования реактивных мощностей при

<sup>(5)</sup>. Отметим, что сеточное управление обеспечивает скорость регулирования реактивной мощности преобразователей, превышающую скорость регулирования синхронных машин, снабженных быстродействующим регулированием возбуждения.

отсутствии, в конечном счете, обменной активной мощностью. Однако, не следует терять из виду того, что такое регулирование сопровождается потерей энергии в звене (6).

#### IV. УЧАСТИЕ ЗВЕНА В ОДНОВРЕМЕННОМ РЕГУЛИРОВАНИИ АКТИВНЫХ И РЕАКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ СИСТЕМ

##### А. СХЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Регулятор мощности должен состоять из двух элементов: одного — регулирующего активную мощность звена и другого — реактивную мощность выпрямителя или же инвертора. Рассмотрим вопрос применения для данного случая вышеописанных схем регулирования.

##### 1. Регулирование по схеме с регулятором напряжения постоянного тока.

Предположим, что требуется увеличить реактивную мощность инвертора  $Q_{\beta}$ , поддерживая при этом его активную мощность  $P_{\beta}$  неизменной.

Указанное может быть выполнено следующим образом: если рабочая точка находится на поднимающейся части параболы мощности, то реактивный элемент регулятора мощности начнет увеличивать уставку коэффициента запаса (А), входящего в уравнение (3') регулятора напряжения, что передвигает линию регулирования напряжения  $U_{\beta}$  вниз (рис. 18); в результате, согласно (6), появляется тенденция на снижение  $P_{\beta}$ ; тогда вмешивается активный элемент регулятора мощности и, увеличивая ток  $I$ , восстанавливает  $P_{\beta} = C \underline{t}$ ; таким образом рабочая точка (а) переходит вниз с одной вольтамперной характеристики  $U = f(I)$  на другую, описывая при этом гиперболу  $\underline{P}_{\beta} = C \underline{t}$  (положения рабочей точки  $a_1, a_2, a_3, \dots$ ) или, что тоже самое, передвигается направо, с одной параболы

---

(6) В частности, такое регулирование представляет особый интерес для случая работы звена в параллель с длинной линией переменного тока, кратковременно работающей в холостую или же с малой нагрузкой: звено, снабженное регулятором напряжения переменного тока, представляется в данном случае для линии переменного тока в виде автоматически регулируемых двух шунтовых реакторов, подключенных по концам линии (поперечная компенсация линии) [л. 1].



$P_{\beta} = f(I)$  на другую, вдоль прямой  $P_{\beta} = C^t$  (положения  $a'$ ,  $a''$ ,  $a'''$  ... рабочей точки).

Для правильного действия схемы необходима автоматическая перемена знака действия обоих элементов регу-

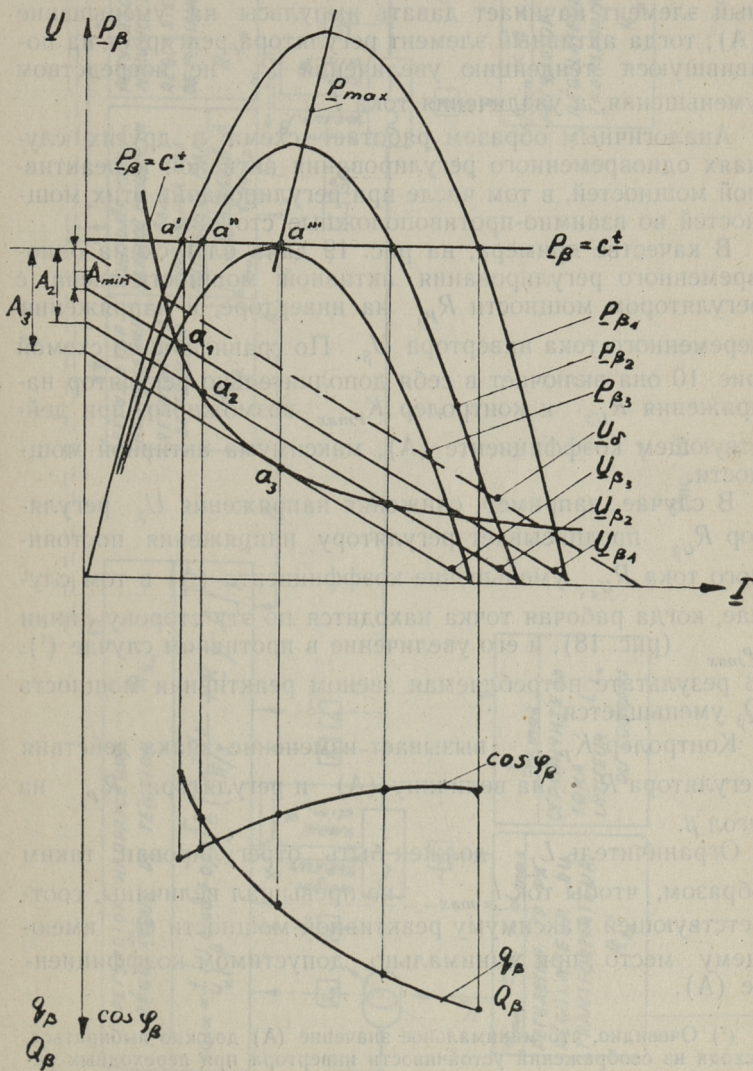


Рис. 18.

лятора мощности при переходе рабочей точки за линию вершин парабол  $\underline{P}_{max}$ . Следовательно, если в описанном случае (рис. 18), при переходе за линию  $\underline{P}_{max}$ , требование на увеличение  $Q_\beta$  все держится, то, в этот раз, реактивный элемент начинает давать импульсы на уменьшение (А); тогда активный элемент регулятора реагирует на появившуюся тенденцию увеличения  $\underline{P}_\beta$  не посредством уменьшения, а увеличения тока  $\underline{I}$ .

Аналогичным образом работает схема в других случаях одновременного регулирования активной и реактивной мощностей, в том числе при регулировании этих мощностей во взаимно-противоположные стороны.

В качестве примера, на рис. 19 дана блок-схема одновременного регулирования активной мощности звена, с регулятором мощности  $R_{P_\beta}$  на инверторе, и напряжения переменного тока инвертора  $U_\beta$ . По сравнению со схемой рис. 10 она включает в себя дополнительно регулятор напряжения  $R_{U_\beta}$  и контролер  $K_{P_{max}}$  возможного, при действующем коэффициенте (А), максимума активной мощности.

В случае, например, снижения напряжения  $U_\beta$  регулятор  $R_{U_\beta}$  предписывает регулятору напряжения постоянного тока  $R_{U_\alpha}$  уменьшение коэффициента (А) в том случае, когда рабочая точка находится по эту сторону линии  $\underline{I}_{P_{max}}$  (рис. 18), и его увеличение в противном случае (<sup>7</sup>). В результате потребляемая звеном реактивная мощность  $Q_\beta$  уменьшается.

Контролёр  $K_{P_{max}}$  вызывает изменение знака действия регулятора  $R_{U_\beta}$  на величину (А) и регулятора  $R_{P_\beta}$  на угол  $\beta$ .

Ограничитель  $L_{I_\alpha}$  должен быть отрегулирован таким образом, чтобы ток  $\underline{I}_{\alpha max}$  не превышал величины, соответствующей максимуму реактивной мощности  $Q_\beta$  имеющему место при минимально допустимом коэффициенте (А).

(<sup>7</sup>) Очевидно, что минимальное значение (А) должно выбираться, исходя из соображений устойчивости инвертора при переходных режимах.



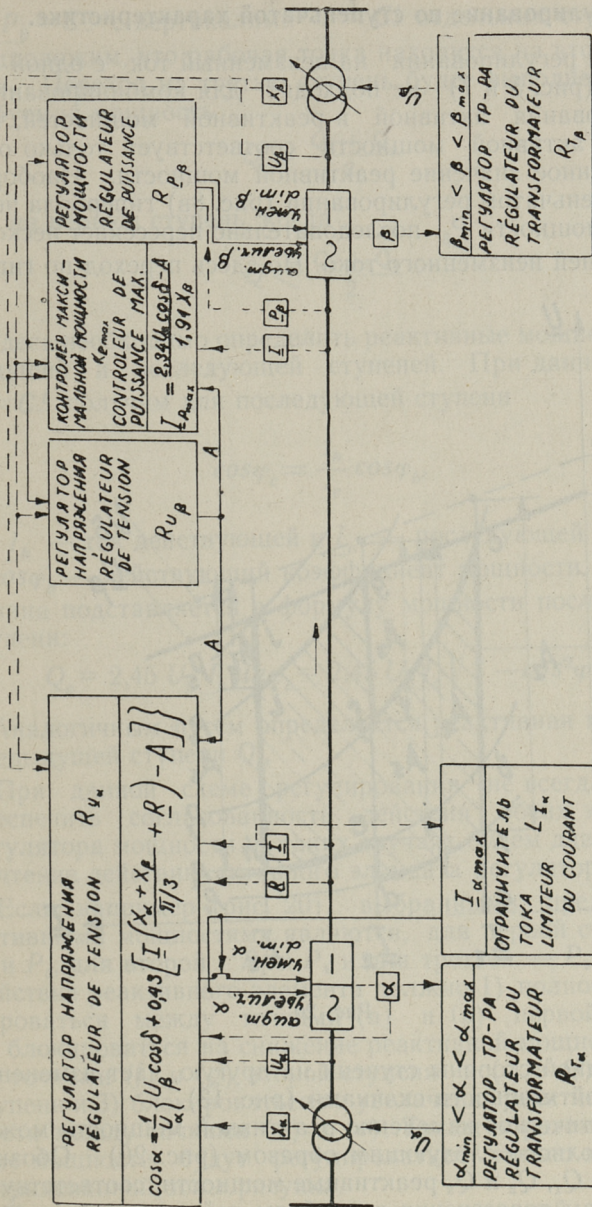


Рис. 19.

## 2. Регулирование по ступеньчатой характеристике.

Схемы регулирования на неизменный ток с одной ступенью (рис. 5 и 7) не подходят для комбинированного регулирования активной и реактивной мощностей, т. к. данной активной мощности соответствует только одно единственное значение реактивной мощности. Наоборот, при ступеньчатом регулировании (рис. 8в) гипербола неизменной мощности  $\underline{P}_\beta$  последовательно пересекает несколько ступеней неизменного тока. Но здесь переход по гипер-

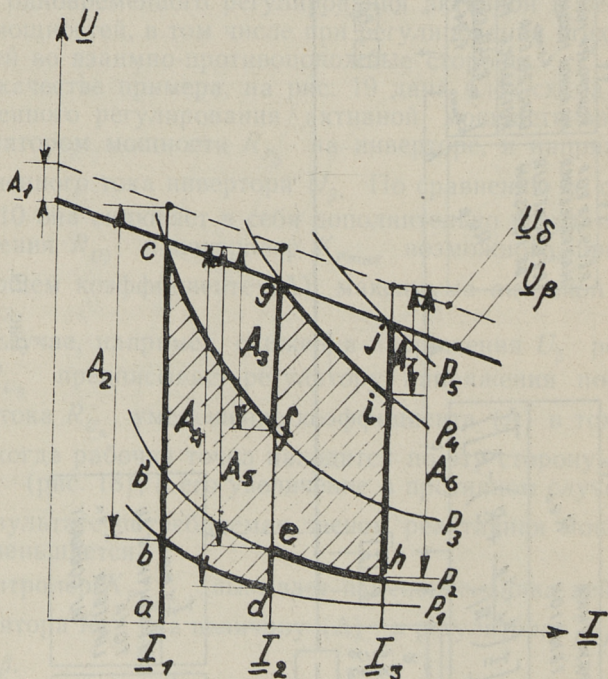


Рис. 20.

боле, с одной стороны ступени на другую, дает изменение реактивной мощности скачками (рис. 13).

Автоматическое изменение реактивной мощности может быть выполнено следующим образом (рис. 20). Обозначим через  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$  реактивные мощности, соответствующие точкам пересечения гиперболы действующей мощно-



сти  $\underline{P}_\beta = C^t$  с вертикалями  $\underline{I} = C^t$  отдельных ступеней и предположим, что рабочая точка находится на второй ступени. Переход на третью ступень будет выполнен, когда требуемая мощность

$$Q > \frac{Q_2 + Q_0}{2} \quad (29')$$

или на первую ступень, когда

$$Q < \frac{Q_2 + Q_1}{2} \quad (29'')$$

Здесь необходимо определить реактивные мощности предыдущей и последующей ступеней. При данном  $U_\beta$  и  $\underline{P}_\beta = C^t$  получим для последующей ступени

$$\cos \varphi_c = \frac{I_b}{I_c} \cos \varphi_b,$$

где  $\underline{I}_b$  — ток действующей и  $\underline{I}_c$  — последующей ступеней и  $\cos \varphi_b$  — действующий коэффициент мощности. Эта величина подставляется в формулу мощности последующей ступени:

$$Q_c = 2,45 U_\beta \underline{I}_c \sin \varphi_c = 2,45 U_\beta \underline{I}_c \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_c}.$$

Аналогичным путем определяется реактивная мощность предыдущей ступени  $Q_a$ .

При данной схеме регулирования не всегда удается обеспечить согласованность действия обоих элементов регулятора мощности. В таких случаях будем давать предпочтение действию активного элемента регулятора.

Если, например (рис. 20), выбранными предельными активными мощностями являются, для первой ступени —  $O$  и  $P_3$ , для второй —  $P_1$  и  $P_4$  и для третьей —  $P_2$  и  $P_5$ , то действие реактивного элемента должно 1) полностью блокироваться между точками (а) и (в) первой ступени, 2) блокироваться на снижение реактивной мощности между точками (f) и (g) второй ступени и (i) и (j) третьей ступени и 3) блокироваться на увеличение реактивной мощности между точками (d) и (e). Таким образом реактивные мощности будут регулироваться только внутри заштрихованной зоны рисунка.

При данной схеме регулирование активной мощности

производится передвижением рабочей точки вдоль вертикали токов ступеней, а реактивной мощности — вдоль гипербол  $P = C \cdot I$  с одной ступени на другую. Предположим, например, что рабочая точка находится в положении ( $b'$ ),

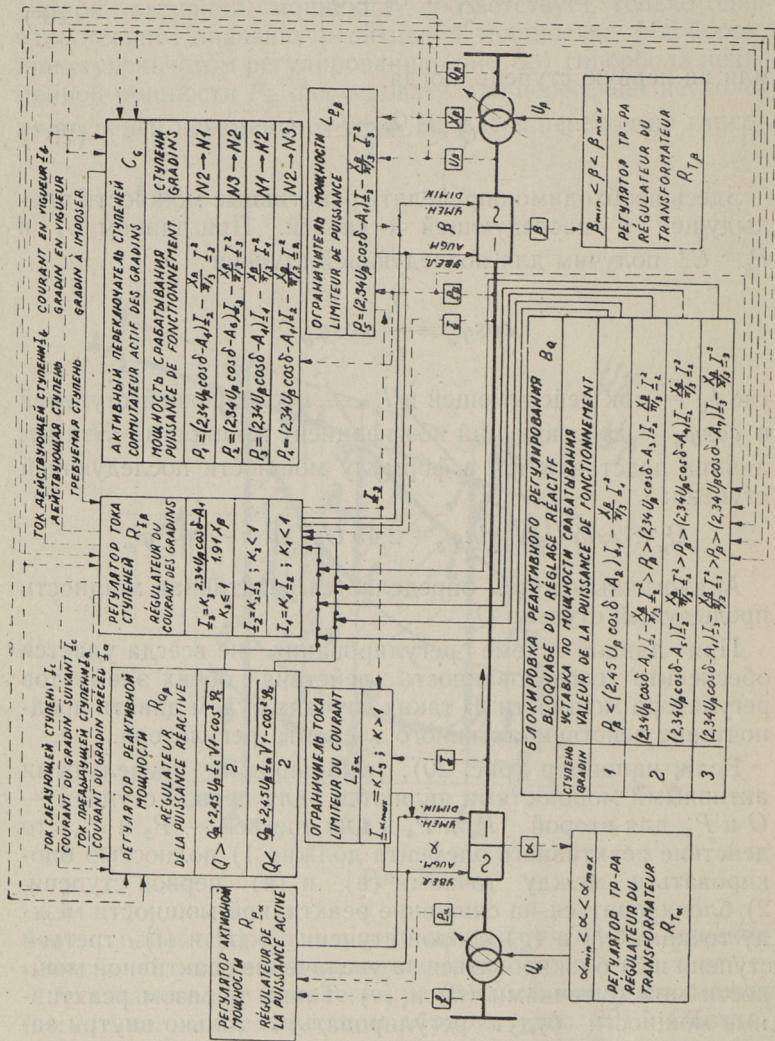


Рис. 21.



на первой ступени. Если срабатывает только активный элемент регулятора мощности, то рабочая точка передвигается вверх или вниз по вертикали  $I_1 = C^t$  первой ступени. Если же срабатывает только реактивный элемент на увеличение реактивной мощности, то рабочая точка передвигается вдоль гиперболы  $P_2 = C^t$  в положение (e) на вторую ступень. Активный элемент регулятора переводит рабочую точку с одной ступени на другую так же как на рис. 8; но при этом максимальная мощность одной ступени уже не является минимальной мощностью последующей ступени.

Блок-схема регулирования с регулятором реактивной мощности  $R_{Q\beta}$  инвертора и регулятором активной мощности звена  $R_{P\alpha}$  дана на рис. 21. Элементы схемы, предназначенные для регулирования активной мощности звена  $P$  действуют таким же образом как в схеме рис. 12.

При выполнении условия (29) регулятор  $R_{Q\beta}$  посылает импульс регулятору тока ступеней  $R_{I\beta}$ ; этот последний, взаимодействуя с регулятором  $R_{P\alpha}$ , производит перевод рабочей точки на соответствующую ступень; в результате — изменение реактивной мощности при данном  $P_\alpha = C^t$ .

Элемент блокировки реактивной мощности  $B_Q$  блокирует импульсы от регулятора  $R_{Q\beta}$  в вышеуказанных случаях [зоны (ab), (de), (fg) и (ij) рис. 20].

## В. Регулирование межсистемного звена.

В данном случае этот вопрос является наложением двух, рассмотренных выше вопросов регулирования с одной стороны активной и с другой — реактивной мощностей звена. Следовательно, для получения рациональных решений необходимо произвести синтез соображений, данных в соответствующих параграфах.

## В. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Активную и реактивную мощности звена можно регулировать: 1) при мало изменяющемся напряжении  $U \approx C^t$ ; 2) при неизменном токе ( $I = C^t$ ) и 3) по ступенчатой характеристике  $I = f(P)$ . Кроме регулятора мощности первый способ регулирования требует еще установки

регулятора напряжения, второй — регулятора тока и третий — регуляторов тока и ступеней.

2. Схемы регулирования, в зависимости от установки регулятора мощности на выпрямителе или на инверторе, получаются разными.

3. Преобразовательные трансформаторы должны регулироваться так, чтобы поддерживать запас по углу регулирования преобразователей.

4. В случае регулирования активной мощности звена при  $\underline{U} \approx C^t$ : 1) регулятор напряжения поддерживает напряжение инвертора ниже его линии устойчивости; 2) ограничитель тока не допускает работу на ниспадающей части параболы мощности.

5. В случае регулирования активной мощности по ступеньчатой характеристике: 1) реактивные мощности двух концов звена изменяются пропорционально активной мощности и в одинаковой степени и 2) максимальная и минимальная мощности ступеней являются функцией напряжения переменного тока инвертора и снижаются вместе с ним.

6. При регулировании на  $\underline{U} \approx C^t$  к. п. д. звена зависит от напряжения переменного тока и не зависит от нее в случае регулирования на неизменный ток.

7. Активная мощность звена может регулироваться в функции частоты одной из подключенных систем или же по заданному графику. Возможные случаи регулирования представлены в таблице 1.

8. Реактивные мощности на двух концах звена должны регулироваться с учетом баланса соответствующих мощностей или же напряжений подключенных сетей переменного тока. Таблица II дает различные случаи регулирования реактивной мощности звена.

9. Выбор схемы регулирования звена зависит от: 1) баланса активных и реактивных мощностей подключенных по концам звена сетей; 2) роли звена в поддержании внутрисистемной синхронной устойчивости; 3) того, какой параметр регулируется в основном — частота, активная или же реактивная мощность, и 4) места установки регуляторов мощности.

10. Наличие звена, в зависимости от места короткого замыкания, обеспечивает или полное гашение токов короткого замыкания или же их ограничение.



11. В тех случаях, когда в результате срабатывания регуляторов звена имеют место опасные для самого звена или же для подключенных систем толчки нагрузки, скорость регулирования должна быть снижена.

12. Два параллельно работающих звена с одинаковыми параметрами, передающие одну и ту же мощность во взаимно-противоположные стороны, обеспечивают регулирование реактивных мощностей при отсутствии активной, межсистемной обменной мощности.

13. Можно осуществить комбинированное регулирование активной и реактивной мощности звена. Соответствующий регулятор мощности будет иметь два элемента, активный и реактивный. В схеме регулирования с регулятором напряжения: 1) реактивный элемент воздействует на перемещение характеристики напряжения, а активный — изменяет ток  $I$ ; 2) знак действия обоих элементов меняется при проходе рабочей точки через линию вершин парабол мощности. При ступеньчатом регулировании реактивный элемент изменяет ступень, что дает скачкообразное регулирование реактивной мощности.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматическое регулирование межсистемного звена постоянного тока может обеспечить гибкое и быстрое регулирование активных и реактивных мощностей подключенных систем. Кроме того оно дает решения таких сложных проблем как ограничение токов короткого замыкания, защита от сверхтоков и синхронной устойчивости систем. Эти качества не имеются у звена — линии переменного тока.

При современном состоянии соответствующей техники преобразовательные подстанции обходятся дорого. Поэтому специалисты рекомендуют использование звеньев постоянного тока только для дальних передач энергии, где экономия, получаемая за счет самой линии, покрывает высокую стоимость преобразовательных подстанций.

Однако, показанные в данной работе и частично подтвержденные практикой Готландской передачи ценные качества регулируемого звена постоянного тока дают основание поставить вопрос о применении таких звеньев также и для сравнительно коротких межсистемных связей.

## Литература.

1. С. Р. Буачидзе. О регулировании передачи постоянного тока. «Электричество», 1951, № 5.
2. С. Р. Буачидзе. О роли межсистемного звена постоянного тока в регулировании и устойчивости подключенных энергетических систем. «Бюллетень Энергосбыта Эстонэнерго», 1955, декабрь.
3. С. Р. Буачидзе. Внешняя характеристика эквивалентного преобразователя. «Труды Таллинского Политехнического Института», 1954, серия А, № 58.
4. I. Liden, E. Uhlmann and S. Sviden. The Gotland D. C. Link «ASEA Journal», October 1954.
5. С. Р. Буачидзе. Полностью автоматизированные гидростанции с зарегулированным стоком. «Труды Таллинского Политехнического института», 1956, серия А, № 66.
6. А. М. Некрасов и М. Р. Сонин. Опыт передачи электроэнергии постоянным током высокого напряжения. «Электрические станции», 1955, № 7.
7. В. П. Пименов и М. Р. Сонин. Электропередача постоянного тока высокого напряжения. «Электричество», 1955, № 7.
8. F. Busemann. Practical Reactive Power Requirements of H. V. D. C. Inverters with Natural Commutation. «Direct Current», September 1952.
9. H. Forssell. The Gotland D. C. Link: the Grid Control and Regulation Equipment. «Direct Current», June 1955.



# RÉGLAGE DES PUISSANCES ACTIVES ET RÉACTIVES D'UN CHAÎNON INTERRÉSEAUX À COURANT

par. S. BOUATCHIDZÉ

## SOMMAIRE

### I. Considérations générales.

La fig. 1<sup>(1)</sup> représente le schéma de départ: deux réseaux à courant alternatif sont interconnectés par un chaînon à courant continu.

Les grandeurs à courant continu seront marquées dessous par un trait; celles du côté redresseur auront l'index ( $\alpha$ ) et celles du côté onduleur — l'index ( $\beta$ ).

Le chaînon, avec ses redresseurs et onduleurs à réglage automatique par grilles, se présente pour le réseau émetteur comme une charge et pour le réseau récepteur comme une génératrice, toutes les deux à réglage ultra-rapide.

### II. Les schémas de réglage du chaînon et sa participation au réglage des puissances actives et réactives de réseaux.

#### A. LES SCHÉMAS DE RÉGLAGE.

##### 1. Schémas en bloc simplifiés.

1) Réglage à tension constante.

a) L'onduleur est réglé par le régulateur de puissance  $R_{P_\beta}$  et le redresseur par le régulateur de tension  $R_{U_\alpha}$  (fig. 2).

Le régulateur  $R_{U_\alpha}$  (fig. 3) règle la tension  $\underline{U}_\alpha$  du redresseur de telle manière que la tension du côté onduleur  $\underline{U}_{\alpha\beta} = \underline{U}_\alpha - I\underline{R}$  se maintient au dessous de la ligne de stabilité de l'onduleur  $\underline{U}_\delta$ .

Si, par exemple, il s'agit d'augmentation de la puissance transmise, le régulateur  $R_{P_\beta}$  fait croître l'angle de

(<sup>1</sup>) Pour les figures et formules se reporter au texte russe.

l'onduleur; le régulateur  $R_{U_\alpha}$  intervient et diminue l'angle  $\alpha$  du redresseur, ce qui ramène le point de fonctionnement sur la caractéristique  $U_{\alpha\beta}$  du régulateur rapportée à l'extrémité onduleur; finalement le point de fonctionnement sur la parabole  $P_\beta$  de puissance se trouve déplacé à droite.

Le limiteur du courant  $L_{I_\alpha}$  (fig. 2) bloque l'action du régulateur  $R_{P_\alpha}$ , tendant à l'augmentation de l'angle  $\beta$  durant les court-circuits et surcharges.

Le maintien de la marge de réserve de l'angle de réglage des convertisseurs est assuré par l'action des régulateurs  $R_{T_\alpha}$  et  $R_{T_\beta}$  des transformateurs (fig. 2 et suivantes), qui, en changeant la tension alternative, forcent les régulateurs des convertisseurs à ramener l'angle de réglage aux limites prescrites.

b) Le redresseur est réglé par le régulateur  $R_{P_\alpha}$  de puissance et l'onduleur par le régulateur  $R_{U_\beta}$  de tension (fig. 3 et 4).

Comparé au cas précédent les rôles des régulateurs ici sont inversés.

## 2) Réglage à courant constant.

a) L'onduleur est réglé par le régulateur de puissance et le redresseur par le régulateur  $R_{I_\alpha}$  à courant constant (fig. 5).

En cas de demande d'augmentation de la puissance le régulateur  $R_{P_\beta}$  diminue l'angle  $\beta$  (fig. 6) et le courant  $I$  tend à décroître; alors le régulateur  $R_{I_\alpha}$  diminue l'angle  $\alpha$  et ramène le point de fonctionnement sur la verticale  $I = Cte$ ; il en résulte l'augmentation de  $U_\beta$  et de la puissance  $P_\beta = U_\beta I$  (le point de fonctionnement passe d'une parabole à l'autre).

Pour un courant donné la tension et la puissance maximums admissibles sont limitées par les considérations de la stabilité de l'onduleur; le limiteur de tension  $L_{U_\beta}$  (fig. 5) intervient dès que la tension atteint la valeur  $U_{\beta max}$  (fig. 6) et bloque l'action du régulateur  $R_{P_\beta}$  à la diminution de l'angle  $\beta$ , et, si besoin est, effectuée, lui-même, l'augmentation de cet angle.



b) Le redresseur est réglé par le régulateur de puissance et l'onduleur par le régulateur à courant constant (fig. 7).

Demande d'augmentation de la puissance: le régulateur  $R_{P_\alpha}$  diminue l'angle  $\alpha$  (fig. 6) et le courant  $\underline{I}$  tend à augmenter; alors le régulateur  $R_{I_\beta}$  diminue l'angle  $\beta$ , ce qui ramène le fonctionnement sur la verticale  $\underline{I} = C \underline{t}$ .

Le limiteur du courant  $L_{I_\alpha}$  bloque la tendance du régulateur  $R_{P_\alpha}$  à diminuer l'angle  $\alpha$ .

3) Réglage mixte à caractéristique  $\underline{I} = f(P)$  en gradins.

Par exemple, pour un réglage à trois gradins (fig. 8a) nous aurons la valeur du courant  $\underline{I}_1 = C \underline{t}$  pour les basses puissances,  $\underline{I}_2 = C \underline{t}$  pour les puissances moyennes et  $\underline{I}_3 = C \underline{t}$  pour les fortes puissances.

a) Le redresseur est réglé par le régulateur de puissance et l'onduleur par le régulateur à courant constant (fig. 9).

Le réglage dans les limites d'un gradin se fait de la même manière qu'au cas du schéma de la fig. 7.

Le passage au gradin supérieur s'effectue au moment (fig. 8b) lorsque le point de fonctionnement tend à dépasser les valeurs  $\underline{U}_{\beta \max}$  et  $\underline{P}_{\max}$  correspondantes, imposées par la stabilité de l'onduleur; alors le commutateur des gradins  $C_G$  (fig. 9) impose au régulateur  $R_{I_\beta}$  la valeur du courant de gradin supérieur; le point de fonctionnement, en cheminant le long de la courbe correspondante  $\underline{P}_{\max}$  passe au gradin supérieur.

Le fonctionnement est inverse en cas de la baisse de charge; la puissance limite maximum d'un gradin se présente en même temps comme la puissance limite minimum pour le gradin immédiatement supérieur.

Le rôle des limiteurs  $L_{U_\beta}$  et  $L_{I_\alpha}$  est le même qu'au cas de la fig. 7.

b) L'onduleur est réglé par le régulateur de puissance et le redresseur par le régulateur à courant constant.

Le passage d'un gradin à l'autre paraît difficile à réali-

ser, l'action des régulateurs de puissance  $R_{P_\beta}$  et du courant  $R_{I_\alpha}$  ne s'accordant pas.

## 2. Étude des quelques schémas de réglage

Nous négligerons: 1) les harmoniques supérieurs du courant et de la tension; 2) les courants magnétisants et résistances des transformateurs et 3) les courants des fuites de la ligne à courant continu haute tension.

1) Réglage à tension constante, avec le régulateur de puissance sur l'onduleur et le régulateur de tension sur le redresseur (fig. 2 et 3).

a) Choix des paramètres de réglage.

On sait qu'en cas de connexion en pont la tension continue du redresseur à commutation naturelle  $\underline{U}_\alpha$  est donné par l'expression (1'), où  $U_\alpha$  est la tension alternative,  $X_\alpha$  — la réactance du transformateur,  $\underline{R}$  — la résistance de la ligne à courant continu et  $\underline{u}_\beta$  — la tension continue de l'onduleur.

Cette tension, rapportée à l'onduleur, c. à. d. diminuée de la chute de tension  $\underline{RI}$  dans la ligne, est définie par (1'').

De même, la tension de l'onduleur est donnée par (1''').

La ligne de stabilité  $\underline{U}_\delta = f(I)$  de l'onduleur (fig. 3) est donnée par (2), où  $(\delta)$  — est l'angle de sécurité de l'onduleur.

Suivant (3') la caractéristique  $\underline{U}_{\alpha\beta} = f(I)$  du régulateur de tension, rapportée à l'extrémité onduleur, serait placée au dessous de la ligne  $\underline{U}_\delta$ ; la valeur  $A = C^{te}$  est la marge de sécurité en tension.

En tenant compte des (1) u (2) l'expression (3') prend la forme (3'').

De (3'') on tire l'équation (4), qui donne la loi du réglage de l'angle  $\alpha$ , imposée au régulateur de tension  $R_{\underline{U}_\alpha}$  (fig. 10, schéma en bloc du réglage).

Dans ce qui suit nous supposons que les résistances  $\underline{R}$  de la ligne et  $X_\alpha$  u  $X_\beta$  des transformateurs sont telles qu'on a l'inégalité (5).



La puissance à l'extrémité réceptrice, compte tenu de (3), est donnée par (6): c'est une parabole (fig. 3).

En prenant la dérivée de (6) et l'égalant au zéro, nous aurons l'expression (7) du courant  $I_{P_{max}}$ , correspondant au maximum de la puissance.

La zone du réglage sera réduite à la partie ascendante de la parabole (fig. 3), et la valeur  $I_{\alpha_{max}}$  du réglage de limiteur  $L_{I_{\alpha}}$  est donnée par (8); le coefficient ( $K$ ), pourrait dépendre de la valeur de fréquence  $f_{\alpha}$  du réseau émetteur (fig. 10) et diminuerait avec celui-ci, ce qui réduirait la puissance transmise durant les surcharges du réseau émetteur.

b) Les puissances réactives et le rendement

Le facteur de puissance côté redresseur est donné par (9) ou, en tenant compte de la relation (10) entre les courants alternatif et continu, par (11). De même, l'expression (12) donne ce facteur du côté onduleur.

En partant de ces valeurs on pourrait calculer les puissances spécifiques réactives du côté redresseur ( $q_{\alpha}$ ) et du côté onduleur ( $q_{\beta}$ ) d'après les relations (13) et (14). La puissance spécifique du redresseur  $q_{\alpha\beta}$ , rapportée à la puissance transmise  $P_{\beta}$ , est donnée par (15'), ou bien, en tenant compte de (13') et (16), par (15'').

La puissance spécifique totale du chaînon est donnée par (17).

Ces expressions générales prennent des formes particulières suivantes, propres au réglage considéré: en mettant dans (11) la valeur de  $\cos \alpha$  de (4) nous aurons (18); de (3'') nous tirons la valeur (19) de  $\cos \beta$ ; en mettant cette dernière dans (12) on a (20); ensuite, en utilisant les valeurs (18) et (20) on pourrait calculer, d'après (14'), (15') et (17), les puissances spécifiques.

Le rendement  $\eta$  du chaînon est donné par (21'), ou bien, en tenant compte de la valeur de  $U_{\beta}$  de (3), par (21'').

La figure 11 donne l'allure des grandeurs réglées.

2) Réglage à gradins (fig. 8 et 9).

a) Choix des paramètres de réglage (fig. 12).

Comme le courant  $I_3$  du dernier gradin correspond à la puissance maximum, sa valeur est choisie d'après (8). Les

courants  $\underline{I}_1$  et  $\underline{I}_2$  de deux autres gradins seront fonctions de  $\underline{I}_3$ .

Le commutateur  $C_G$  commande le changement des gradins d'après (6). La valeur  $\underline{I}_G$  du courant de gradin en vigueur est transmise aux commutateur  $C_G$  et limiteur  $\underline{L}_{P_\beta}$  par le régulateur  $R_{I_\beta}$ .

La valeur  $\underline{I}_{\alpha max}$  du limiteur  $\underline{L}_{I_\alpha}$  est la fonction de  $\underline{I}_3$ .

b) Les puissances réactives et le rendement.

Les facteurs de puissance sont calculés à partir de la formule générale (16) de la puissance, et en tenant compte de (10), d'après (22) et (23); dans ces relations le courant  $\underline{I}$  pour chaque gradin est constant.

Pour avoir les puissances réactives spécifiques les valeurs des facteurs de puissance ci-dessus sont introduites dans (13'), (14') et (15').

Les courbes de réglage sont représentées sur la fig. 13.

3. Influence de la variation de tensions alternatives sur les puissances réactives et le rendement, la puissance active  $\underline{P}_\beta$  étant maintenue constante par le régulateur correspondant.

1) Réglage à tension continue constante (fig. 3).

La racine de l'équation (6) est donnée par (25).

Les valeurs (26) et (27) des facteurs de puissance sont obtenues en introduisant la valeur du courant  $\underline{I}$  de (25) dans (18) et (20).

Alors, en introduisant ces valeurs dans (13') et (14'), on obtient les puissances spécifiques  $q_\alpha$  et  $q_\beta$  en fonction des tensions alternatives pour  $\underline{P}_\beta = C^{te}$  (fig. 14 et 15). L'expression (27) fait voir que  $\cos \varphi_\beta$  et, par conséquent  $q_\beta$  ne sont pas influencés par la variation de  $U_\alpha$ .

En partant de (21), et tenant compte de la valeur de  $\underline{I}$  dans (25), on a l'expression (28) du rendement: il ne dépend que de la tension  $U_\beta$  (fig. 15).

2) Réglage à courant constant (fig. 6)

Dans les formules (22) et (23)  $\underline{P}_\beta$  et  $\underline{I}$  sont invariables; donc, les facteurs de puissance et les puissances réactives



spécifiques, qui leur sont proportionnelles, ne dépendent que de leur propre tension  $U_\alpha$  ou  $U_\beta$  (fig. 16).

Pour  $\underline{P}_\beta$ ,  $\underline{I}$  et  $\underline{R}$  invariables le rendement, d'après (24), n'est pas influencé par la variation de tensions alternatives.

## B. Réglage de la puissance active du chaînon.

### 1. Modes de réglage.

On peut régler la puissance active 1) en fonction de la fréquence du réseau émetteur ou récepteur, on bien, 2) d'après un programme établi. Le tableau I donne les cas possibles du réglage.

Par exemple, dans le cas n° 2 du tableau 1) les groupes générateurs du réseau émetteur peu puissant sont réglés par des régulateurs de puissance et ceux du réseau recep-teur puissant par des régulateurs de fréquence et de puissance et 2) la puissance du chaînon est réglé par un régulateur astatique de fréquence  $f_\alpha$  du réseau émetteur.

### 2. Choix de schéma du réglage.

Ce choix est influencé plus particulièrement par 1) le mode du réglage adopté, 2) les considérations de la balance des puissances réactives aux extrémités du chaînon et 3) le rôle qui, éventuellement, pourrait jouer le chaînon dans le problème de la stabilité synchrone interne des réseaux connectés.

### 3. Vitesse du réglage.

La commande par grille assure le réglage ultra-rapide du chaînon. Mais dans le cas du réseau relativement peu puissant un tel réglage pourrait provoquer des forts à-coups. Alors il faudrait réduire la vitesse du réglage à des valeurs comparables avec celles des turbines du réseau.

### 4. Réglage du chaînon et les courts-circuits.

Dans tous les schémas considérés les limiteurs et régulateurs du courant agissent en fonction de la tension  $U_\beta$  et réduisent le courant du chaînon en cas de courts-circuits du côté alternatif de l'onduleur.

Les mêmes limiteurs ramènent les courants de courts-circuits côté continu du chaînon à des valeurs minimales.

### III. Chaînon dans le réglage des puissances réactives de réseaux.

#### A. Schémas de réglage

Les schémas utilisés seront les mêmes qu'au cas du réglage des puissances actives, le régulateur de la puissance réactive prenant la place de celui de la puissance active.

#### B. Réglage de la puissance réactive du chaînon.

Les différents cas de réglage sont représentés dans la tableau II.

Les différents cas de réglage sont représentés dans la ta puissance active sont valables aussi pour le cas présent.

La souplesse et les limites du réglage s'accroissent quand le chaînon se compose de plusieurs lignes, ayant, chacune ses propres convertisseurs.

Pour un chaînon (fig. 17), transportant, par ses deux lignes, la même puissance  $\underline{P}_1 = \underline{P}_2$  on sens inverse, on a l'égalité de puissances réactives aux extrémités du chaînon et la puissance active d'échange est nulle.

### IV. Participation du chaînon au réglage simultané des puissances actives et réactives de réseaux.

#### A. Les schémas de réglage.

##### 1. Réglage avec régulateur de tension.

Le fonctionnement dans le cas d'augmentation de la puissance réactive  $Q_\beta$  de l'onduleur, pour  $\underline{P}_\beta = C^{te}$  le régulateur réactif augmente le coefficient (A) de l'équation (3'), et la ligne  $\underline{U}_\beta$  se déplace vers le bas (fig. 18), ce qui provoque la tendance à la décroissance de  $\underline{P}_\beta$ ; alors le régulateur de  $\underline{P}_\beta$  intervient et, en augmentant le courant, rétablit  $\underline{P}_\beta$ ; le point de fonctionnement (a) de la tension décrit l'hyperbole  $\underline{P}_\beta = C^{te}$ , tandis que le point de fonctionnement de la  $\underline{P}$  puissance suit la droite  $\underline{P}_\beta = C^{te}$ .

Le signe de l'action de deux régulateurs est automatiquement inversé au passage de la ligne  $\underline{P}_{max}$  des sommets des paraboles.

La figure 19 représente le schéma du réglage combiné de la puissance active du chaînon  $\underline{P}_\beta$  et de la tension  $\underline{U}_\beta$ .



Ici le contrôleur  $K_{P_{max}}$  fait changer de signe l'action du régulateur  $R_{U_\beta}$  sur la valeur de (A) et du régulateur  $R_{P_\beta}$  sur l'angle  $\beta$ .

Le limiteur  $L_{I_\alpha}$  est réglé sur le courant correspondant au maximum de puissance réactive.

## 2. Réglage à gradins.

Les schémas à un seul gradin (fig. 5 et 7) ne se prêtent pas au réglage combiné, car pour une puissance active donnée il n'y a qu'une seule valeur possible de la puissance réactive correspondante.

Dans le réglage à plusieurs gradins (fig. 8 b) l'hyperbole  $P_\beta = C^{te}$  coupe successivement les verticales de différents gradins, ce qui donne (fig. 13) le changement de la puissance réactive par sauts ( $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_3$ ).

Le passage automatique (fig. 20) du second au troisième gradin se fait, lorsque la demande de puissance réactive satisfait l'inégalité (29'), et au premier gradin, quand on a la condition (29'').

Sur la figure 20 les puissances limitées sont: pour le premier gradin — O et  $P_3$ , pour le second —  $P_1$  et  $P_4$  et pour le troisième —  $P_2$  et  $P_5$ . De ce fait le réglage de la puissance réactive se fait à l'intérieur de la zone hachurée.

Le schéma d'un tel réglage est celui de la figure 21: le réglage de la puissance active se fait de la même manière que sur la figure 12; une fois la condition (29) remplie, le régulateur  $R_{Q_\beta}$  fait actionner le régulateur  $R_{I_\beta}$  à la suite de l'action combinée des régulateurs  $R_{I_\beta}$  et  $R_{P_\beta}$  le point de fonctionnement passe au gradin correspondant, ce qui entraîne le changement de la puissance réactive pour  $P_\alpha = C^{te}$ .

L'élément  $B_Q$  bloque l'action du régulateur  $R_{Q_\beta}$  lorsque le point de fonctionnement se trouve sur les segments (ab), (de), (fg) et (ij) (fig. 20).

## B. Réglage du chaînon interréseaux

On a à faire à la superposition de deux problèmes ci-dessus du réglage, d'une part des puissances actives et d'autre part des puissances réactives du chaînon, dont il faudrait faire synthèse.

## V. Conclusion

Vu leurs qualités précieuses l'emploi de tels chaînons paraît avantageux même pour des liaisons courtes entre réseaux.



## ОГЛАВЛЕНИЕ. — TABLE DES MATIÈRES

I. Основные соображения и намеченная цель . . . . .	3
II. Схемы регулирования звена и его участие в регулировании активных мощностей систем.	
А. Схемы регулирования.	
1. Общие соображения . . . . .	5
2. Упрощенные блок-схемы регулирования . . . . .	6
3. Анализ некоторых схем регулирования . . . . .	14
4. Влияние изменения напряжений переменного тока на реактивные мощности и к. п. д. звена, при поддер- живаемой соответствующим регулятором неизменной активной мощности . . . . .	23
Б. Регулирование активной мощности межсистемного звена.	
1. Различные способы регулирования звена . . . . .	26
2. Выбор схемы регулирования звена . . . . .	28
3. Скорость регулирования . . . . .	29
4. Регулирование звена и короткие замыкания . . . . .	29
III. Звено и регулирование реактивных мощностей систем.	
А. Схемы регулирования реактивной мощности звена. . . . .	30
Б. Регулирование реактивной мощности звена. . . . .	32
IV. Участие звена в одновременном регулировании активных и реактивных мощностей систем.	
А. Схемы регулирования.	
1. Регулирование по схеме с регулятором напряжения	34
2. Регулирование по ступеньчатой характеристике . . . . .	35
V. Основные результаты и выводы . . . . .	41
VI. Заключение . . . . .	43
Литература . . . . .	44
Sommaire en langue française . . . . .	45

OTLADENIE — TABLE DES MATIÈRES

С. Р. Буачидзе

РЕГУЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЕЙ  
МЕЖСИСТЕМНОГО ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Издательство  
Таллинского Политехнического Института

\*

Редактор Б. Тамм

Технический редактор А. Тамм

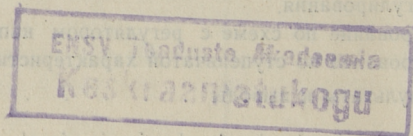
Корректор Х. Эзоп

Сдано в набор 4 I 1957. Подписано к печати 22 II 1957. Бумага  
54×84,  $1/16$ . Печатных листов 3,5. По формату 60×92 печатных  
листов 2,82. Учетно-издательских листов 2,55. Тираж 800. МВ-00037.

Заказ № 113.

Типография «Коммунист», Таллин, ул. Пикк, 2.

Цена руб. 1.75.







Руб. 1.75.

EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00086392 2