

## СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДСТАНЦИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

*Способ адаптивного управления, автоматическое регулирование напряжения и реактивной мощности, и системы автоматического управления на подстанциях*

*Ключевые слова: высоковольтные подстанции, управления, регулирования, напряжения, реактивные мощности, управляемые шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы.*

## WAY TO MANAGE AND CONTROL THE SUBSTATION BY MEANS OF REACTIVE POWER COMPENSATION

*Adaptive control method, automatic voltage regulation and reactive power, and automatic control systems at the substations*

*Keywords: high-voltage substations, control, regulation, voltage, power factor, controlled shunt reactors, static thruster compensators.*

**Введение.** В настоящее время для регулирования напряжения на высоковольтных подстанциях применяются принципиально новые управляемые средства компенсации реактивной мощности (СКРМ): управляемые шунтирующие реакторы (УШР), статические тиристорные компенсаторы (СТК), устройства СТАТКОМ, асинхронизированные синхронные компенсаторы и т.д. [1].

Баланс реактивной мощности в энергосистеме сохраняется за счет изменения генерируемой и потребляемой реактивной мощности в соответствии со статическими характеристиками нагрузки по напряжению. Такие изменения заключаются в том, что при снижении напряжения, вызванном уменьшением генерируемой реактивной мощности, потребляемая реактивная мощность уменьшается. Это уменьшение реактивной мощности называют регулирующим эффектом нагрузки, и при напряжениях, близких к номинальному, выражается величиной

$$\frac{dQ}{dU} = 2..5\% \quad (1)$$

которая указывает на каждый процент изменения напряжения возникает изменение реактивной мощности на 2...5%. В результате устанавливается новый баланс реактивной мощности, но уже при пониженном напряжении. Однако такой процесс имеет место лишь при условии, что напряжение больше критического. При напряжении в узле потребления меньше критического регулирующей эффект нагрузки описывается выражением:

$$\frac{dQ}{dU} < 1. \quad (2)$$

Поэтому дальнейшее снижение напряжения будет вызывать дополнительные падения напряжения в сети. Возникнет лавинообразный процесс, называемый лавиной напряжения. В результате произойдет нарушение устойчивости нагрузки, выражающееся в саморазгрузке потребителей. Для предотвращения таких аварийных последствий нужно управлять эффективным распределением реактивной мощности в энергосистеме в узлах нагрузки, т.е. на подстанциях [2].

**Постановка задачи.** Подстанция является важным вспомогательным узлом, соединяющим сети передачи и распределения электроэнергии, а также основным источником сбора данных и важным исполнительным блоком сети. Поэтому у обслуживающего персонала стоит задача согласованного управления подстанционными средствами компенсации реактивной мощности (СКРМ) для поддержания заданного уровня напряжения, минимизации потерь и обеспечения требуемого качества электроэнергии. Но согласованное управление установленных на подстанции СКРМ является весьма сложной задачей, так как уровни напряжения могут существенно изменяться при изменении режимов работы оборудования на подстанциях и прилегающих к ним электрических сетей.

Поэтому возникает необходимость создания для подстанционных СКРМ системы автоматического управления (САУ) в различных эксплуатационных режимах высоковольтных подстанций, которая должна обеспечивать согласованное адаптивное управление СКРМ и, с другой стороны, снижать потери электроэнергии на подстанционных СКРМ и повышать ее качество.

**Решение задачи.** Для разработки САУ отвечающей указанным требованиям, был предложен новый способ управления по обобщенному сигналу пропорциональной суммарной реактивной нагрузки СКРМ на подстанции.

Подстанция представляет собой объект управления, включающий несколько элементов управления и несколько контролируемых величин, т.е. фактически является многомерной многосвязной системой [3,4].

Из фрагмента электрических сетей и подстанций Кыргызстана (рис.1) составлена упрощенная схема подстанции (рис. 2).

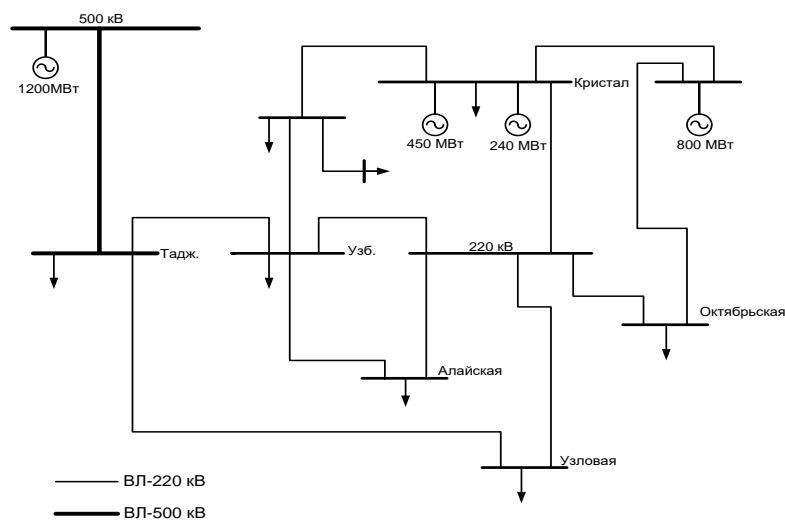


Рис.1. Фрагмент электрических сетей и подстанций Республики.

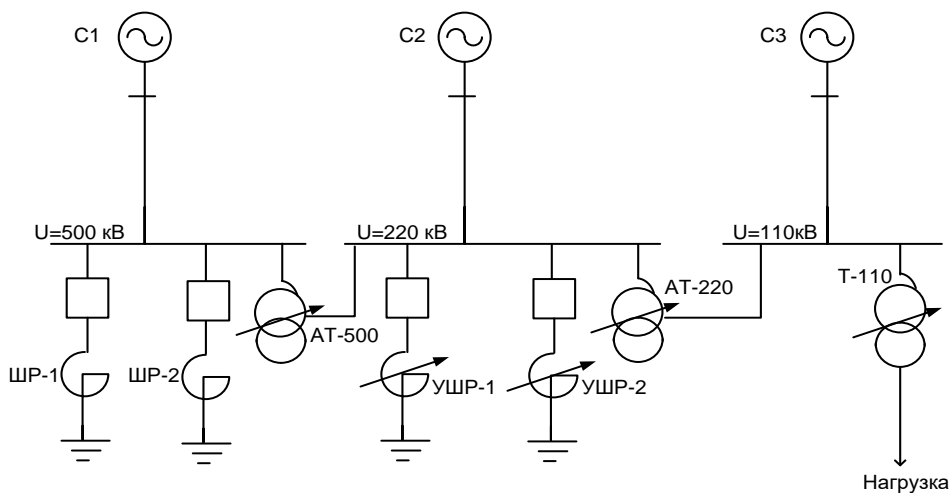


Рис. 2. Упрощенная схема подстанции

На ее основе можно составить расчетную схему замещения (рис. 3).

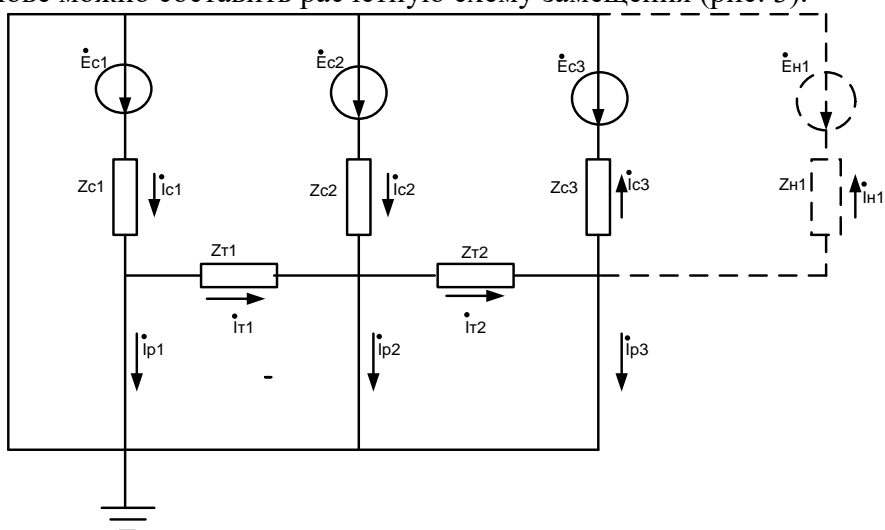


Рис. 3. Расчетная схема замещения.

На схеме замещения введены следующие обозначения:

$\dot{E}_{c1}, \dot{E}_{c2}, \dot{E}_{c3}$  – ЭДС энергосистем С1, С2, С3;

$Z_{c1}, Z_{c2}, Z_{c3}$  – сопротивление связи с энергосистемами С1, С2, С3;

$\dot{I}_{c1}, \dot{I}_{c2}, \dot{I}_{c3}$  – токи энергосистем С1, С2, С3;

$Z_{r1}, Z_{r2}$  – сопротивление автотрансформатора 500/220 кВ и трансформатора 220/110 кВ;

$\dot{I}_{r1}, \dot{I}_{r2}$  – токи через трансформаторы;

$\dot{I}_{p1}, \dot{I}_{p2}, \dot{I}_{p3}$  – токи средств компенсации реактивной мощности на распределительных устройствах 500 кВ, 220 кВ и 110 кВ соответственно.

Средства компенсации реактивной мощности (СКРМ), т.е. управляемые шунтирующие реакторы (УШР), оснащены быстродействующими системами регулирования, поддерживающими заданное значение компенсируемой реактивной мощности. Ток  $I_{p3}$  показан условно в целях определения универсальных расчетных соотношений, в том числе для случая установки СКРМ на стороне 110кВ.

Выбираем в качестве регулируемого параметра  $U_1$ , составим расчетные соотношения по второму закону Кирхгофа, получим систему уравнений для схемы замещения. Следует

отметить, что значения  $\dot{E}_{c1}, \dot{E}_{c2}, \dot{E}_{c3}$  и  $Z_{c1}, Z_{c2}, Z_{c3}, Z_{T1}, Z_{T2}$  меняются в зависимости от работы прилегающих сетей и состава оборудования подстанции в режиме реального времени, а токи  $\dot{I}_{p1}, \dot{I}_{p2}, \dot{I}_{p3}$  могут изменяться от токов нагрузки в пределах, установленных СКРМ. Имеем

$$\begin{aligned}\dot{E}_{c1} - \dot{E}_{c3} &= \dot{I}_{c1}Z_{c1} + \dot{I}_{T1}Z_{T1} + \dot{I}_{T2}Z_{T2} + \dot{I}_{c3}Z_{c3}; \\ \dot{E}_{c2} - \dot{E}_{c3} &= \dot{I}_{c2}Z_{c2} + \dot{I}_{T2}Z_{T2} + \dot{I}_{c3}Z_{c3}; \\ \dot{I}_{c1} &= \dot{I}_{p1} + \dot{I}_{T1}; \\ \dot{I}_{c2} &= \dot{I}_{p2} + \dot{I}_{T2} - \dot{I}_{T1}; \\ \dot{I}_{c3} &= \dot{I}_{T2} - \dot{I}_{p3};\end{aligned}\tag{3}$$

или

$$\begin{aligned}\dot{E}_{c1} - \dot{E}_{c3} &= (\dot{I}_{p1} + \dot{I}_{T1})Z_{c1} + \dot{I}_{T1}Z_{T1} + \dot{I}_{T2}Z_{T2} + (\dot{I}_{T2} - \dot{I}_{p3})Z_{c3}; \\ \dot{E}_{c2} - \dot{E}_{c3} &= (\dot{I}_{p1} + \dot{I}_{T2} - \dot{I}_{T1})Z_{c2} + \dot{I}_{T2}Z_{T2} + (\dot{I}_{T2} - \dot{I}_{p3})Z_{c3}.\end{aligned}\tag{4}$$

Из системы уравнений (4) получаем

$$\begin{aligned}\dot{I}_{T1} &= \frac{\dot{E}_{c1} - \dot{E}_{c3} - \dot{I}_{p1}Z_{c1} + \dot{I}_{p3}Z_{c3} - \dot{I}_{T1}(Z_{c1} + Z_{T1})}{Z_{T2} + Z_{c3}}; \\ \dot{I}_{T2} &= \frac{\dot{E}_{c3} - \dot{E}_{c1} + \dot{I}_{p2}Z_{c2} - \dot{I}_{p3}Z_{c3} + \dot{I}_{T2}(Z_{c2} + Z_{T2} + Z_{c3})}{Z_{c3}}.\end{aligned}\tag{5}$$

тогда напряжение в узле 1 будет определяться выражением

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{E}_{c1} - \dot{I}_{c1}Z_{c1} = \dot{E}_{c1} - (\dot{I}_{p1} + \dot{I}_{T1})Z_{c1} = \dot{E}_{c1} - \left[ \dot{I}_{p1} \frac{\dot{E}_{c1} - \dot{E}_{c3} - \dot{I}_{p1}Z_{c1} + \dot{I}_{p3}Z_{c3} - \dot{I}_{T1}(Z_{c1} + Z_{T1})}{Z_{T2} + Z_{c3}} \right] Z_{c1} = \\ &= \dot{E}_{c1} - \frac{(\dot{E}_{c3} + \dot{E}_{c2})(Z_{T2} + Z_{c3}) + (\dot{E}_{c1} - \dot{E}_{c3})(Z_{c2} + Z_{T2} + Z_{c3})}{(Z_{c1} + Z_{T1})(Z_{c2} + Z_{T2} + Z_{c3}) + Z_{c2}(Z_{T2} + Z_{c3})} Z_{c1} - \\ &\quad - I_{p1} \left[ 1 - \frac{Z_{c1}(Z_{c2} + Z_{T2} + Z_{c3})}{(Z_{c1} + Z_{T1})(Z_{c2} + Z_{T2} + Z_{c3}) + Z_{c2}(Z_{T2} + Z_{c3})} \right] Z_{c1} - \\ &\quad - I_{p2} \frac{Z_{c2}(Z_{T2} + Z_{c3})Z_{c1}}{(Z_{c1} + Z_{T1})(Z_{c2} + Z_{T2} + Z_{c3}) + Z_{c2}(Z_{T2} + Z_{c3})} - I_{p3} \frac{Z_{c3}Z_{c2}Z_{c1}}{(Z_{c1} + Z_{T1})(Z_{c2} + Z_{T2} + Z_{c3}) + Z_{c2}(Z_{T2} + Z_{c3})} = \\ &= \dot{U}_0 - \dot{I}_{p1}Z_{\text{экв1}} - \dot{I}_{p2}Z_{\text{экв2}} - \dot{I}_{p3}Z_{\text{экв3}} = \dot{U}_0 - \dot{A}(a_1Z_{\text{экв1}} + a_2Z_{\text{экв2}} + a_3Z_{\text{экв3}}).\end{aligned}\tag{6}$$

Таким образом, можно определить напряжение в узле 1:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_0 - \dot{A}k\tag{7}$$

где:  $\dot{U}_0$  - напряжение на шинах системы;  $A = \dot{I}_{p1} + \dot{I}_{p2} + \dot{I}_{p3}$  - нагрузка средств компенсации.  $\dot{I}_{p1} = a_1 \cdot \dot{A}, \dot{I}_{p2} = a_2 \cdot \dot{A}, \dot{I}_{p3} = a_3 \cdot \dot{A}, \dot{A} = \dot{I}_{p1} + \dot{I}_{p2} + \dot{I}_{p3}, 0 \leq a_1 \leq 1, 0 \leq a_2 \leq 1, 0 \leq a_3 \leq 1.$

Коэффициенты  $a_1, a_2, a_3$  - являются числами, т.к. токи  $\dot{I}_{p1}, \dot{I}_{p2}, \dot{I}_{p3}$  имеют только мнимую часть, потому что являются токами средств компенсации реактивной мощности.

Тогда модуль  $\dot{U}_1$  будет определяться выражением [5]:

$$|\dot{U}_1| = |\operatorname{Re}(\dot{U}_0) + j \cdot \operatorname{Im}(\dot{U}_0) + j \cdot A \cdot r - A \cdot x| = \sqrt{(\operatorname{Re}(\dot{U}_0) - A \cdot x)^2 + (\operatorname{Im}(\dot{U}_0) + A \cdot r)^2} =$$

$$= \sqrt{A^2 \cdot (x^2 + r^2) - 2 \cdot A \cdot (\operatorname{Re}(\dot{U}_0) \cdot x - \operatorname{Im}(\dot{U}_0) \cdot r) + \operatorname{Re}(\dot{U}_0)^2 + \operatorname{Im}(\dot{U}_0)^2} \quad (8)$$

Принимая во внимание, что  $|\dot{A}| = A$ , зависимость  $|\dot{U}_1| = f(|\dot{A}|)$  или  $U_1 = f(A)$  из графика зависимостей [5] принимает вид:

$$U_1 = \sqrt{A^2 \cdot \alpha_2 - A \cdot \alpha_1 + \alpha_0} \quad (9)$$

где  $\alpha_2 = x^2 + r^2$ ,  $\alpha_1 = 2(\operatorname{Re}(\dot{U}_0) \cdot x - \operatorname{Im}(\dot{U}_0) \cdot r)$ ,  $\alpha_0 = \operatorname{Re}(\dot{U}_0)^2 + \operatorname{Im}(\dot{U}_0)^2$

В диапазоне реальных возможных значений токов, напряжений и сопротивлений элементов схемы замещения значений функция  $U_1 = f(A)$  может быть описана выражением:

$$U_1 = U_0 + A \cdot k. \quad (10)$$

Структура системы автоматического управления подстанции изображена на рис.4.

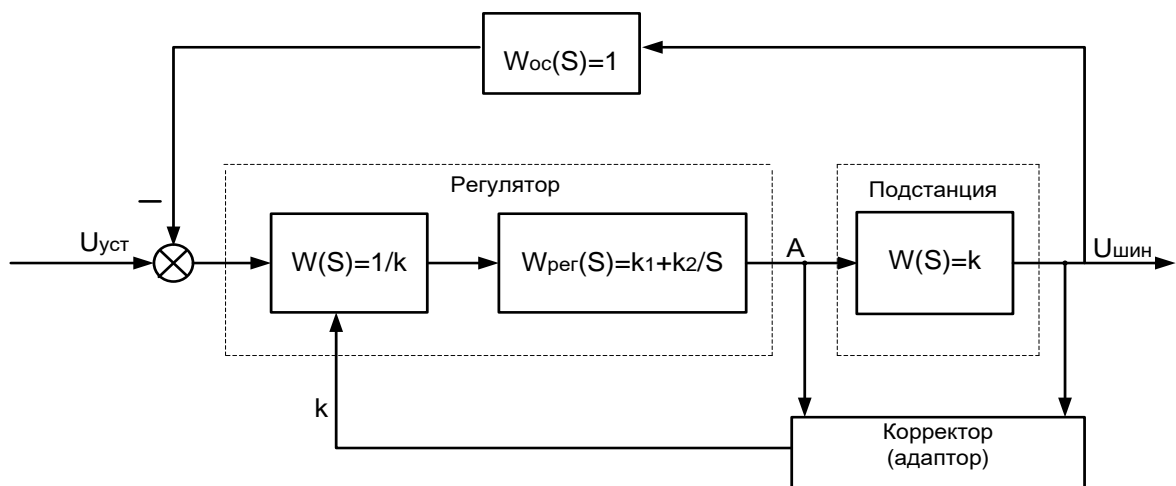


Рис.4 Структура системы автоматического управления подстанции.

На основании изложенных этих функций САУ подстанции, предложен способ адаптивного управления средствами реактивной мощности (СКРМ) подстанции на основе автоматизированной системы управления технологическим процессом подстанции (АСУ ТП ПС) (рис.5).

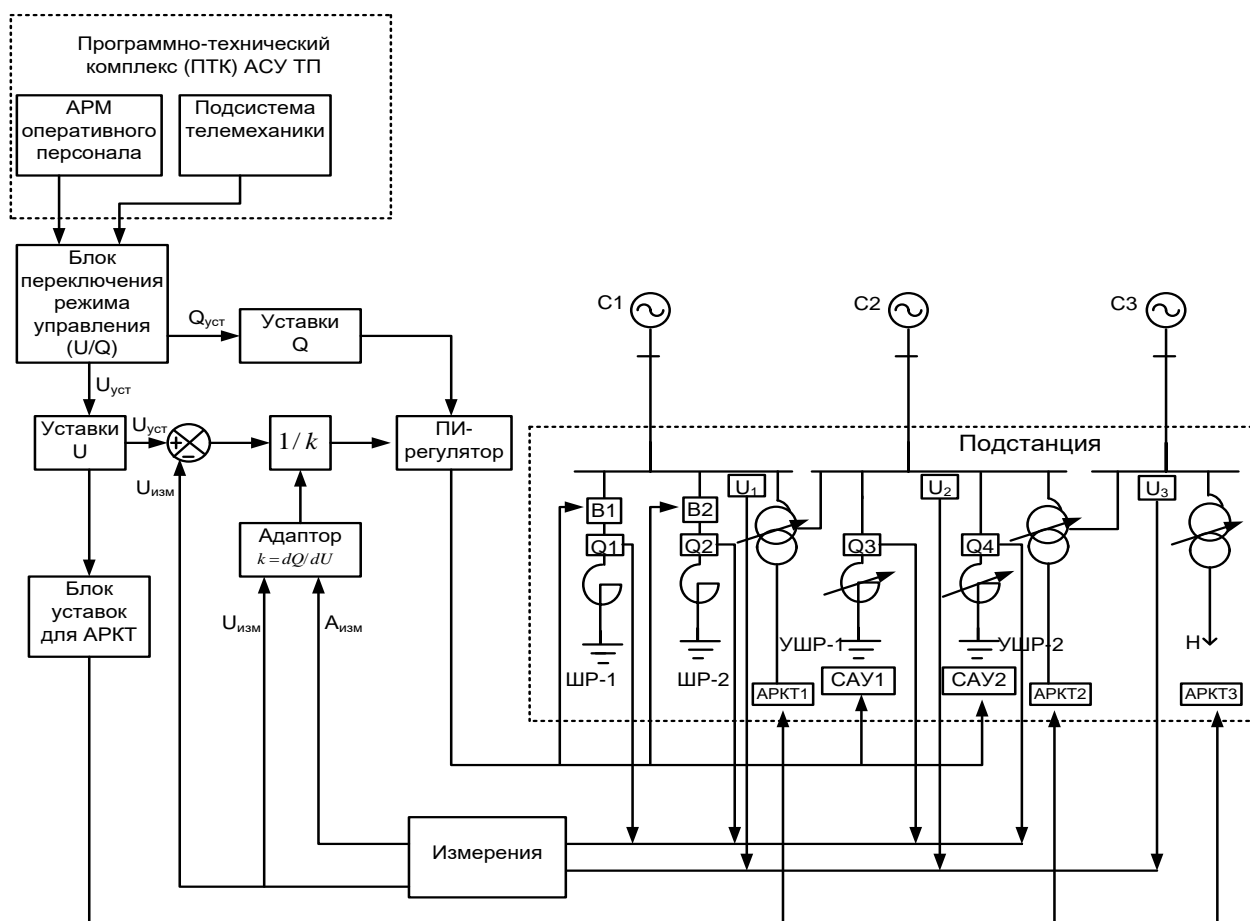


Рис.5. Структурная схема управления подстанционными средствами компенсации реактивной мощности (СКРМ).

Предложенный способ управления подстанционными средствами компенсации реактивной мощности (СКРМ) выполняют:

1. На основе заданных напряжения на шинах подстанции проверяется возможности реализации условие заданного режима, достаточности регулировочных диапазонов РПН трансформаторов и автотрансформаторов.

2. В результате работы интегрального регулятора (ПИ-регулятора) по данным измерениям параметров суммарной реактивной мощности подстанции определяется значение обобщенного сигнала управления  $A$  которая должна компенсироваться для поддержания заданного режима.

3. По закону распределения реактивной мощности по сетям рассчитывается коэффициенты загрузки СКРМ для уменьшения активных потерь и повышения качества электрической энергии.

Таким образом, управление распределенной реактивной мощности в энергосистеме позволяет эффективно решать вопросы качества электроэнергии у конечных потребителей, а также надежности электроснабжения потребителей. А именно:

- уменьшить снижение напряжения в сети;
- снизить влияние сетевых помех;
- выровнять нагрузку симметрично по фазам;
- не допустить возникновения лавины напряжения.

Оптимальное распределение реактивной мощности – один из наиболее важных факторов, позволяющих решить задачу энергосбережения. Разгрузка линий, трансформаторов, генераторов от реактивного тока, и как следствие этого, снижение потерь

активной мощности в системе существенно снижают затраты на производство электрической энергии.

#### **Выводы:**

1. По закону распределения реактивной мощности по сетям рассчитывается коэффициенты загрузки средства компенсации реактивной мощности (СКРМ) для уменьшения активных потерь и повышения качества электрической энергии.

2. Подстанция с различными схемами соединения, являются многосвязными объектами управления, которые могут быть представлены эквивалентированным объектом управления с одним входом (сигнал пропорциональной величине реактивной нагрузки установленных СКРМ на подстанциях) и одним выходом напряжения на регулируемых шинах подстанции)

3. Средства компенсации реактивной мощности (СКРМ) на подстанциях обеспечивает эффективное адаптивное управления подстанции при различных эксплуатационных режимах с изменяющимися корректирующими значениями.

#### **Литература:**

1. Управляемые подмагничивание электрические реакторы //Сб. статей. Под ред. д.т.н. проф. А.М. Брянцева. М.: Знак. 2004. -264с.
  2. Маренников И.А., Михайлов С.А., Разин Н.С. Распределение реактивных мощностей в энергосистемах Россия. ПГУ. 2009г.
  3. Волошин А.А. Адаптивная система автоматического управления средствами компенсации реактивной мощности подстанций. М.: ОАО Институт «Энергосетьпроект». 2009г.
  4. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами.- М.: Наука, 1981.-448с.
  5. Волошин А.А. Способ управления подстанционными средствами компенсации реактивной мощности по обобщенному сигналу управления // Энергетик, 2010, №10.
-