

# ПРОБЛЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0.38 кВ

В.П. СЧАСТНЫЙ канд.техн.наук., доцент, А.И.ЖУКОВСКИЙ инженер БАТУ

**Д**ефицит топливно-энергетических ресурсов Республики Беларусь требует проведения активной энергосберегающей политики, в которой особое место отводится снижению потерь электроэнергии в элементах электрических сетей при транспортировке от мест производства до мест потребления.

Значительная доля потерь электроэнергии в общей структуре приходится на передачу реактивной мощности по линиям различных напряжений, что определяет необходимость выработки реактивной мощности генераторами электростанций для покрытия потребляемой реактивной мощности.

Потребление реактивной мощности дополнительно к активной приводит к ряду отрицательных явлений: снижается пропускная способность линий передачи и трансформаторов; увеличиваются потери мощности и энергии в сети; снижаются уровни напряжения на зажимах электроприемников и др..

Передача реактивной мощности на большие расстояния экономически не целесообразна. Поэтому ее необходимо генерировать непосредственно у мест потребления, повышая тем самым коэффициент мощности потребителей.

На основании действующих требований, в часы максимума реактивных нагрузок, коэффициент мощности у потребителей не должен быть менее 0.95 [ 1 ].

В электрических сетях 0.38 кВ большинства сельскохозяйственных объектов его значение находится в пределах 0.65-0.80 [ 2 ].

Наиболее эффективным способом повышения коэффициента мощности в электрических сетях является компенсация реактивной мощности (КРМ) с помощью компенсирующих устройств (КУ). Главным достоинством КРМ является повышение экологичности работы электрической сети без вмешательства в условия и режимы работы электропри-

емников. КРМ тесно связана с вопросами повышения качества электроэнергии в электрических сетях, так как уровень реактивной мощности влияет на отклонение, колебания, несимметрию напряжения, степень искажения кривых токов и напряжений, допустимые параметры которых определены ГОСТ 13109-87.

Известны различные устройства КРМ: синхронные компенсаторы, параметрические стабилизаторы, реакторы с линейной и нелинейной вольт-амперной характеристикой, реакторно-тиристорные блоки, конденсаторно-тиристорные блоки и батареи статических конденсаторов. Большинство выпущенных устройств выпускаются промышленностью на большую мощность и напряжение 10 кВ и выше. Использование их в электрических сетях сельскохозяйственных потребителей затруднительно в силу выше указанных причин и особенностей сельских электрических сетей.

Для сельских электрических сетей наиболее приемлема КРМ батареями статических конденсаторов, имеющими ряд преимуществ по сравнению с другими устройствами. Статические конденсаторы имеют малые потери мощности (0.3...1.0%), износостойчивы, не содержат вращающихся частей, просты и удобны в эксплуатации и могут быть подобраны на малые мощности, что особенно важно для сельских электрических сетей.

Установка каждого квар конденсаторной мощности в сельских электрических сетях позволяет получить экономию электроэнергии около 450 кВт ч в год. Несмотря на это, оснащенность сельских электрических сетей КУ находится на низком уровне и в большинстве стран СНГ составляет 0.03 - 0.05 квар/кВт, при необходимой 0.2 квар/кВт [ 3 ]. Это является следствием того, что долгое время действие инструкций и дифференцированных тарифов расчета за потребленную реактивную мощность, стиму-

лирующих внедрение КУ, на сельскохозяйственных потребителей не распространялись. В результате сельские электрические сети выпадали из системы распределения КУ.

Установка большого количества КУ в сельских электрических сетях требует больших материальных затрат. Поэтому исключительно важно, чтобы все вновь вводимые КУ работали с максимальной эффективностью.

Исследования, проводимые в конце 80-х годов (обследованию подверглись 135 закрытых трансформаторных подстанций 10/0.4 кВ с установленными нерегулируемыми конденсаторными установками 0.38 кВ с преобладающей производственной нагрузкой) показали, что 34% конденсаторных батарей работали в режиме перекомпенсации; у 16% отмечено появление опережающих токов, увеличивающих потери электроэнергии; у 24% потребителей обнаружено перенапряжение более чем на 10% или появление опережающих токов и перенапряжение одновременно; у 11% потребителей отмечено более чем 10% отклонение напряжения от номинального [4]. Неправильно выбранные КУ вредят как электроприемникам, так и сети в целом. Низкая эффективность КРМ является результатом недостаточно высокого уровня эксплуатации и следствием установки КУ без предварительных оптимизационных расчетов, а также отсутствием устройств автоматического управления КУ, исключающих возникновение отрицательных режимов. Высокая степень КРМ в сельских электрических сетях 0.38 кВ может достигаться применением регулируемых конденсаторных батарей (РКБ). Зарубежный опыт показывает, что не менее 65% всех проектируемых конденсаторных батарей выгодно выполнять регулируемые.

Необходимость регулирования мощности конденсаторных батарей обуславливается изменением нагрузок сельскохозяйственных потребителей в течение суток и года. С увеличением числа ступеней РКБ, появляется возможность такого регулирования мощности, при котором наиболее полно компенсируется изменяющаяся во времени реактивная нагрузка потребителей. Однако увеличение числа ступеней и, соответственно, снижение их мощности, требует большого числа конденсаторных батарей и коммутационных аппаратов. Поэтому необходимо технико-экономическое обоснование оптимального выбора мощностей и режимов регулирования конденсаторных батарей учитывающего переменный характер реактивных нагрузок и технические требования нормальной работы сети и приемников.

В настоящее время существуют следующие методы решения задачи КРМ: аналитический, градиентный, решения систем линейных уравнений, динамического программирования и др.. Широкое применение вычислительной техники способствовало

развитию градиентных методов и методов, основанных на решении систем линейных уравнений. Разработанные на их основе оптимизационные программы: КРМ-86, КРМ-88, КРМ-5Б, ПРАПОР, ПРОКОМ и др., предназначены для системного расчета КРМ - совокупности электрически связанных сетей напряжением до 330 кВ и выше. Фактор неопределенности нагрузок и специфические особенности сельскохозяйственного производства затрудняют применение данных программ в сельских электрических сетях. При этом, выбор оптимальной мощности КУ производится без учета действительных уровней напряжения у потребителей.

Анализ показывает, что на современном этапе развития методов решения задачи КРМ задачу выбора мощности и мест установки КУ в сельских электрических сетях 0.38 кВ целесообразно решать независимо от других сетей энергосистемы, с дальнейшим учетом эффекта от снижения потерь мощности и энергии при расчете КРМ в сетях более высоких напряжений. Это позволяет значительно упростить расчеты и наиболее полно учесть специфические особенности сельских электрических сетей такие, как резко-переменный характер активных и реактивных нагрузок в течение суток и года, расщепленность электрических нагрузок, отсутствие устройств регулирования под напряжением (РПН) на потребительских подстанциях 10/0.4 кВ. Предлагаемая методика определения оптимальных параметров РКБ основывается на «принципе площадей», с использованием годовых графиков реактивной нагрузки по продолжительности. Исходными данными для расчета служат суточные графики реактивной нагрузки и нормы отклонения напряжения на шинах питания потребителей, а критерием оптимизации - минимум затрат на КРМ [ 5,6 ].

На рис. 1. представлен годовой график реактивной нагрузки по продолжительности в общем виде. Сущность метода состоит в том, что при ступенчатом регулировании, когда число ступеней равно  $n$ , необходимо выбрать мощность ступеней РКБ такой, чтобы суммарные потери электроэнергии от недокомпенсации (-) и перекомпенсации (+) были минимальными. Это достигается в том случае, когда незаштрихованная площадь  $F_n$  графика будет максимальной. Аналитически эта площадь определяется выражением :

$$F_n = \int_0^{T_s} Q^2(t) dt - \sum_{i=0}^n \left( \int_{t=2i}^{t=2i+1} Q^2(t) dt - Q^2_{i+1}(t_{2i+1} - t_{2i}) \right) - \int_{T_s} Q^2(t) dt \rightarrow \max . \quad (1)$$

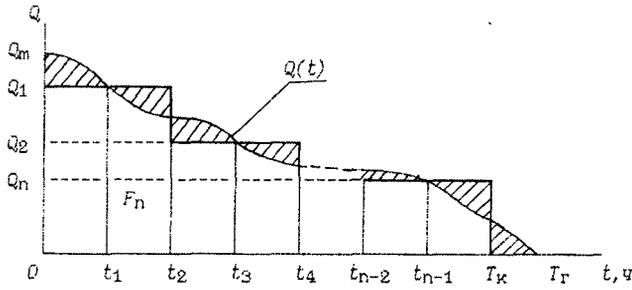


Рис. 1. Годовой график реактивной нагрузки по продолжительности при многоступенчатом регулировании.

Расчетные затраты на установку РКБ с числом ступеней  $n$  могут быть выражены, как

$$Z = (AQk_1 + B)E_k + \frac{bR_{\text{ЭК}}}{u^2} \sum_{i=1}^n \int_{t_{i-1}}^{t_i} [Q(t) - Qk_i]^2 dt + \omega_k b \sum_{i=1}^n Qk_i \Delta t_i, \quad (2)$$

где  $A$  - удельная стоимость конденсаторных батарей;  $Qk_i$  - номинальная мощность батареи;  $B$  - стоимость средств регулирования;  $E_k$  - коэффициент эффективности капиталовложений с учетом амортизации;  $b$  - удельная стоимость потерь активной электроэнергии;  $R_{\text{ЭК}}$  - эквивалентное активное сопротивление, по которому протекает реактивный ток;  $u$  - напряжение сети;  $Qk_i$  - мощность  $i$ -й ступени конденсаторной батареи;  $\Delta t_i$  - время работы  $i$ -й ступени;  $\omega_k$  - удельные потери активной мощности в конденсаторной батарее.

В выражении (2) первый член представляет собой затраты, связанные с капиталовложениями на установку батареи; второй и третий - стоимость, соответственно, потерь электроэнергии в сети и в батарее.

Условия минимума расчетных затрат имеют вид:

$$\frac{dZ}{dQk_i} = 0 \quad (i = 1, \dots, n), \quad \frac{dZ}{dt_i} = 0 \quad (i = 1, \dots, n-1). \quad (3)$$

Представим годовой график реактивной нагрузки по продолжительности в виде упорядоченной диаграммы  $Q(t)$  (рис.2). Режим регулируемой работы конденсаторной батареи будет характеризоваться ступенчатой диаграммой с некоторым числом ступеней  $n$ . Искомыми неизвестными здесь являются:  $n$  ступеней  $Qk$ , регулирования батареи и  $n-1$  неизвестных границ  $t_i$  этих ступеней, т.е. моментов их

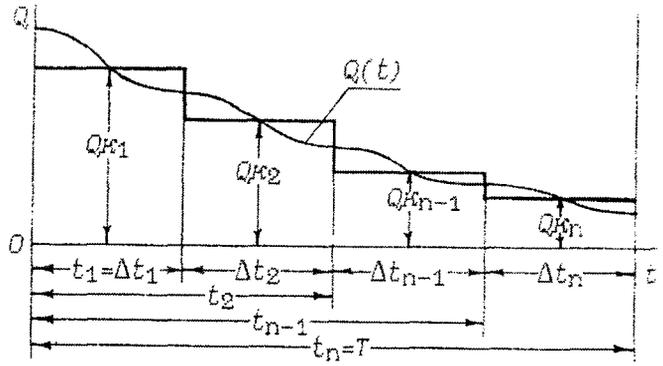


Рис. 2. Годовая режимная диаграмма работы регулируемой КВ.

Используя выражение (2) и условия (3), запишем условия минимума расчетных затрат в развернутом виде:

$$\frac{dZ}{dQk_1} = \frac{d}{dQk_1} (AQk_1 + B)E_k + \frac{bR_{\text{ЭК}}}{u^2} \sum_{i=1}^n \int_{t_{i-1}}^{t_i} [Q(t) - Qk_i]^2 dt + \omega_k b \sum_{i=1}^n Qk_i \Delta t_i = -\frac{2bR_{\text{ЭК}}}{u^2} (Qc_i - Qk_i) + \omega_k b t_i = 0; \quad (4)$$

$$\frac{dZ}{dQk_i} = \frac{d}{dQk_i} (AQk_i + B)E_k + \frac{bR_{\text{ЭК}}}{u^2} \sum_{i=1}^n \int_{t_{i-1}}^{t_i} [Q(t) - Qk_i]^2 dt + \omega_k b \sum_{i=1}^n Qk_i \Delta t_i = -\frac{2bR_{\text{ЭК}}}{u^2} (Qc_i - Qk_i) + \omega_k = 0 \quad (i = 2, \dots, n); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dZ}{dt_i} &= \frac{d}{dt_i} (AQk_i + B)E_k + \frac{bR_{\text{ЭК}}}{u^2} \sum_{i=1}^n \int_{t_{i-1}}^{t_i} [Q(t) - Qk_i]^2 dt + \\ &+ \omega_k b \sum_{i=1}^n Qk_i \Delta t_i = \\ &= \frac{d}{dt_i} \left( \frac{R_{\text{ЭК}}}{u^2} \left\{ \int_{t_{i-1}}^{t_i} (Q(t) - Qk_i) dt + \int_{t_i}^{t_{i+1}} (Q(t) - Qk_{(i+1)})^2 dt \right\} \right) + \\ &+ \frac{d}{dt_i} ((t_i - t_{(i-1)})\omega_k Qk_i + (t_{(i+1)} - t_i)\omega_k Qk_{(i+1)}) = \\ &= 0 \quad (i = 1, \dots, n-1); \quad (6) \end{aligned}$$

Здесь  $Q_{c_i}$  - средняя реактивная нагрузка, согласно графику  $Q(t)$  за время  $\Delta t_i$  работы  $i$ -й ступени батареи (рис.2). Произведя ряд последовательных математических преобразований уравнений (4)-(6), получим уравнения:

$$Q_{K_i} t_i = Q_{c_i} t_i - ((C_1 + C_2) t_i) / R_{ЭК}; \quad (7)$$

$$Q_{K_i} = Q_{c_i} - C_2 / R_{ЭК} \quad (i=2, \dots, n); \quad (8)$$

$$Q_{K_i} = 2Q_{(i-1)} - Q_{K_{(i-1)}} - 2C_2 / R_{ЭК} \quad (i=2, \dots, n). \quad (9)$$

где  $C_1 = (A E_k u^2) / 2b$ ;  $C_2 = (\omega_k u^2) / 2$ .

Рис.3. иллюстрирует зависимости (7)-(9). Эти выражения имеют несколько существенных особенностей. Во-первых, в качестве параметра нагрузки используется не максимальная, а среднегодовая реактивная нагрузка, в связи с чем, в формулы не входит время максимальных потерь от передачи реактивной мощности. Во-вторых, расчетное напряжение принимается заданным, при этом не учитывается его зависимость от величины мощности конденсаторной батареи, которая, в свою очередь, зависит от напряжения.

Кроме требований обеспечения наибольшей экономичности при выборе параметров РКБ должны быть соблюдены также все технические требования нормальной работы сети и приемников, определяемые ГОСТ 13109-87, основным из которых является допустимость отклонений напряжения у потребителей во всех режимах работы:

$$U_{min} \leq U(t) \leq U_{max}. \quad (10)$$

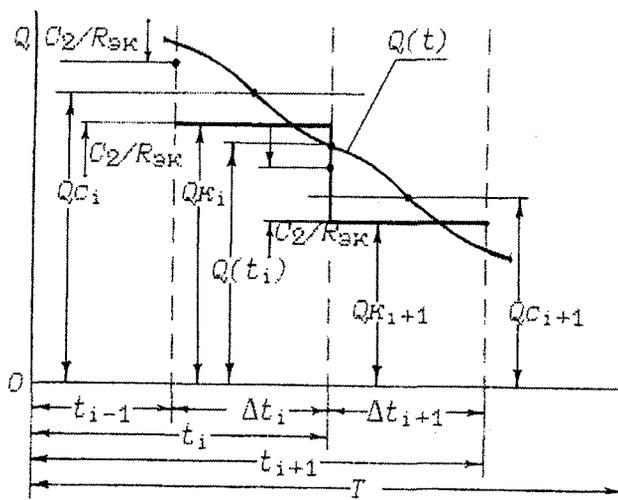


Рис.3. Выбор параметров ступеней регулирования КУ.

Возможны два способа учета условия (10): учет непосредственно в процессе решения оптимизационной задачи или проверка выполнения его в конце расчета. Второй способ является наиболее рациональным, так как предусматривает первоначальное решение оптимизационной задачи без учета каких либо технических ограничений. Если же нарушение условия (10) является характерным явлением в расчетах, то необходимо учитывать его непосредственно в процессе решения оптимизационной задачи. В ряде случаев достижение минимальных потерь в сети возможно манипуляцией надбавок трансформатора с переключением без возбуждения (ПВВ) и параметров РКБ [ 7 ].

На основании выше приведенной методики разработана программа расчета оптимальных параметров РКБ в сельских электрических сетях 0.38 кВ

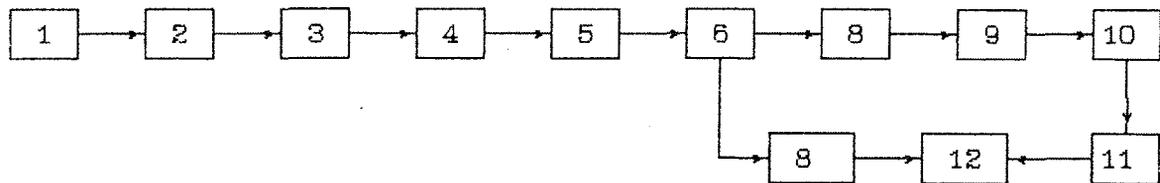


Рис. 4. Структурная схема программы расчета оптимальных параметров регулируемых конденсаторных батарей на ЭВМ:

1 - ввод исходных данных (суточных графиков реактивной нагрузки, параметров электрической схемы сети, технико-экономических показателей); 2 - формирование массива годового графика реактивной нагрузки по продолжительности  $Q(t)$ ; 3 - расчет эквивалентного сопротивления электрической сети, по которому протекает реактивный ток; 4 - расчет стоимости потерь электроэнергии в электрической сети на передачу реактивной мощности; 5 - расчет оптимальных параметров нерегулируемой конденсаторной батареи и затрат на ее установку; 6 - сравнение расчетных затрат по п.п. 4 и 5; 7 - вывод о целесообразности КРМ в электрической сети; 8 - поиск участков стационарности годового графика реактивной нагрузки по продолжительности  $Q(t)$  и выбор оптимального числа ступеней РКБ; 9 - определение оптимальных параметров РКБ и расчет затрат на ее установку; 10 - сравнение расчетных затрат по п.п. 4,5,9, выбор оптимального варианта КРМ и расчет суммарного экономического эффекта; 12 - завершение работы и вывод результатов расчета на печать.

на ЭВМ. Сущность работы программы раскрывает структурная схема (рис.4.)

Программа дает экономическое обоснование необходимости КРМ в электрической сети, сравнительной эффективности регулируемой и нерегулируемой КРМ и определяет оптимальные параметры РКБ, используемые для выбора мощности ступеней регулирования и настройки параметров регулятора. Ее преимуществами является простота, удобство пользования и малый объем вводимой информации. Программа принята для использования в проектной

ды протекания технологического процесса смен.

На рис.6. представлен годовой график реактивной нагрузки по продолжительности при многоступенчатом регулировании РКБ. Расчет показывает целесообразность использования четырех ступеней регулирования. При использовании трехфазных конденсаторов типов КМ2 или КС2, мощности ступеней будут равны:  $Q_{к1} = 487.5$  квар;  $Q_{к2} = 397.5$  квар;  $Q_{к3} = 217.5$  квар;  $Q_{к4} = 95$  квар. Использование четырех ступеней регулирования позволяет снизить потери электроэнергии в сети на передачу реактивной мощности на 93.5 %. При этом, коэффициент мощности на шинах трансформаторной подстанции в течение суток изменяется в пределах 0.96 (индуктивного) - 0.98 (емкостного), что удовлетворяет действующим требованиям.

Для управления работой РКБ в электрической сети необходимо специальное устройство, задачей которого является контроль параметров электрической сети и выработка соответствующих управляющих сигналов. На рис.7. представлена структурная схема разработанного устройства для управления РКБ. Техническая задача, которую решает предлагаемое устройство, заключается в

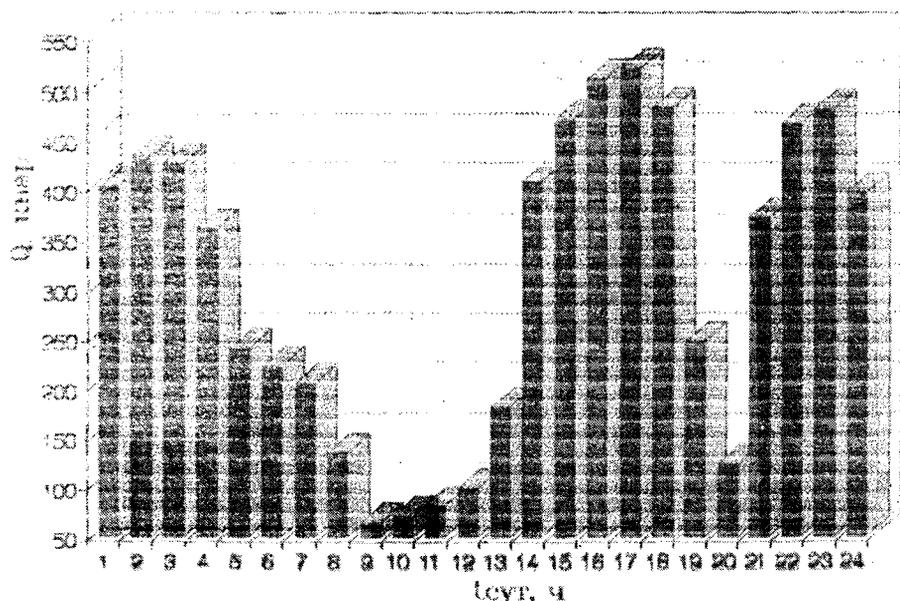


Рис.5. Суточный график реактивной нагрузки Глубокского комбикормового завода.

практике проектно-технологического института «Сельхозтехпроект» г. Минска.

В качестве примера применения программы рассчитаем оптимальные параметры РКБ для установки на шинах низкого напряжения одной из подстанций Глубокского комбикормового завода Витебской области. Суточный график реактивной нагрузки подстанции при двухсменной работе предприятия представлен на рис.5. Из графика видно, что максимумы потребления реактивной мощности достигаются в период

повышении коэффициента мощности потребителей путем контроля величин реактивного тока и напря-

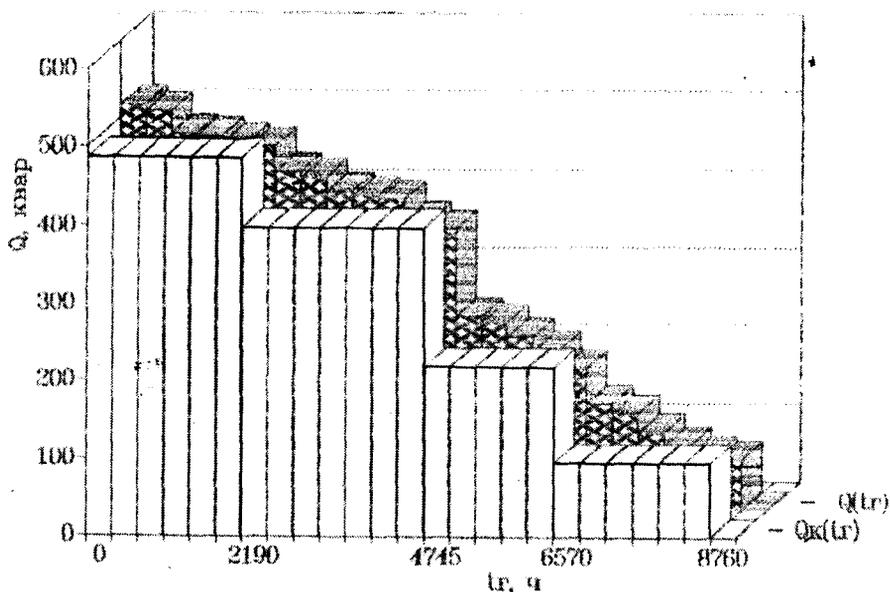


Рис.6. Годовой график реактивной нагрузки по продолжительности при многоступенчатом регулировании РКБ.

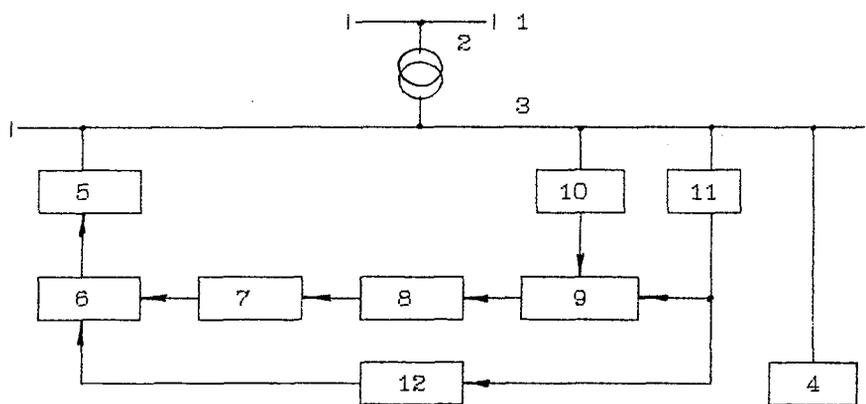


Рис. 7. Структурная схема устройства для управления РКБ.

жения в сети и управления РКБ.

Работает устройство для управления РКБ следующим образом. Сигналы с датчиков 10 реактивного тока и 11 напряжения, пропорциональные мгновенным значениям реактивного тока и напряжения на шинах 3 питания потребителей 4, поступают на входы преобразователя 9, на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный величине потребляемой реактивной мощности. Этот сигнал, через инерционное звено 8, обеспечивающее помехоустойчивость, поступает на вход регулятора 7 с задаваемой зоной нечувствительности и уровнем срабатывания. Для обеспечения точности регулирования, зона нечувствительности и уровень срабатывания регулятора устанавливаются в зависимости от параметров РКБ 5 и характера изменения нагрузки потребителей. Выходной сигнал регулятора поступает на первый вход блока 6 коммутации, который непосредственно управляет РКБ. В соответствии с характером управляющего сигнала, поступающего с блока коммутации, включается ступень мощности РКБ и генерирует в сеть реактивную мощность соответствующую величине потребляемой реактивной мощности, улучшая тем самым коэффициент мощности узла нагрузки в целом и увеличивая напряжение на шинах. Во избежание повышения величины напряжения на шинах питания потребителей выше допустимого значения, что возможно в сетях сельскохозяйственных потребителей, питающихся от ТП с трансформаторами без РПН, предусмотрен контур контроля напряжения и блокировки выходного сигнала блока коммутации при превышении уровня напряжения выше допустимой величины. Для этого сигнал с выхода датчика напряжения поступает на второй вход блока коммутации. Величина срабатывания порогового элемента 12 устанавливается в зависимости от требований к техническим условиям работы потребителей.

Преимуществами устройства является наличие регулировок порога срабатывания блока управления

РКБ, защиты от ложных срабатываний вследствие кратковременных бросков тока в сети и блокировки срабатывания при превышении величины напряжения в сети выше допустимого значения.

Вывод: Использование методики расчета и разработанных технических средств позволяет наиболее рационально проводить технические мероприятия по компенсации реактивной мощности в сельских электрических сетях 0.38 кВ.

### Литература

1. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. М.: Энергоатомиздат, 1986. с. 276 - 287.
2. Счастный В.П. Статические показатели электроснабжения производственного сектора исследуемых сельскохозяйственных объектов. - В сб. трудов отчетной научно-техн. конф. БАТУ, Минск, 1996, с.9-15.
3. Пекелис В.Г. Обзорная информация. Перспективы применения поперечной емкостной компенсации в электрических сетях энергосистем и промышленных предприятий. - Мн.: БелНИИТИ, 1984. - 48с.
4. Идельчик Б.В. Выбор параметров для компенсации реактивной мощности в сельских электрических сетях. - Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1989. - 16с.
5. Счастный В.П., Жуковский А.И. Эффективность регулирования конденсаторных установок в сельских электрических сетях 0.38 кВ // Материалы международной научно-технической конференции «Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в АПК» 3-4 июня 1997 г. - Мн., 1997. - с. 114 - 118.
6. Счастный В.П., Жуковский А.И. Оптимизация параметров регулируемых конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности в сельских электрических сетях 0.4 кВ // Эксплуатация, ремонт и восстановление сельскохозяйственной техники. Доклады международной научно-практической конференции. - Горки, 1997. - с. 226 - 229.
7. Счастный В.П., Жуковский А.И. К вопросу о взаимовлиянии компенсирующих устройств и надбавок трансформаторов при оптимизации параметров сельских электрических сетей 0.38 кВ // Проблемы развития энергетики и электрификации АПК: Сб. научн. тр. / БелНИИагроэнергo. - Мн., 1998. - с. 101 - 106.