



## КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР

Технический прогресс в микропроцессорной технике открыл неограниченные возможности в технологии создания функционально расширенного оборудования. Одним из таких устройств, в котором использованы новейшие технологии, является регулятор реактивной мощности. Использование микропроцессора для наблюдения и управления всеми процессами, которые происходят в сети, обработки данных, управления и визуализации делает современные регуляторы реактивной мощности настолько эффективными, что они приносят фирмам ощутимую финансовую выгоду.

#### Суть проблемы

Главным элементом конденсаторных установок является регулятор реактивной мощности. От правильности и надежности его работы будет зависеть, выполнит ли свою задачу в системе электропитания конденсаторная установка, которая является дорогим оборудованием по отношению к цене регулятора. Результативность компенсации реактивной мощности можно рассматривать в двух аспектах: техническом и экономическом. И тот, и другой важны для предприятия. Проблема состоит в том, что, на первый взгляд, они могут себя взаимно исключать.

Недостаточно квалифицированные специалисты, пользуясь тем, что электропитающее предприятие не установило в измерительно-расчетной системе предприятия счетчик реактивной энергии, применяют «калькуляторную» методику для компенсации реактивной мощности. Методика основана на включении в систему электропитания предприятия конденсаторной установки постоянно или на определенные промежутки времени, рассчитанные на калькуляторе. Экономическая сторона этого «решения» является очень хорошей. Периодически рассчитываемый «экономический» параметр  $\cos \phi$  будет выдержан, и как следствие - фирма не заплатит электроснабжающему предприятию ни одной гривни в виде штрафа за несоблюдение величины  $\cos \phi$ , обусловленной в двустороннем договоре.

Вышеуказанный метод не имеет ничего общего с рациональным и технически правильным проведением компенсации реактивной мощности. Не является он также обоснованным и с экономической точки зрения. Неквалифицированный специалист забывает о том, что постоянно включенные конденсаторы в определенные моменты при изменяющихся индуктивных нагрузках (например, отключение оборудования на обеденный перерыв) приведут к наиболее вредному для системы электропитания состоянию - перекомпенсации в сети. Это потенциально может привести к серьезным авариям. При перекомпенсации повышается напряжение в сети, что может вызвать, повреждения всех чувствительных к изменению напряжения приборов. Явным симптомом роста напряжения является массовое перегорание лампочек и постоянно выходящие из строя источники питания в системах управления оборудованием. Необходимо также помнить, что изменение характера сети питания с индуктивного на емкостной проходит через состояние, когда  $\cos \phi = 1$ . Это состояние вызывает процессы самовозбуждения некоторых двигателей, что может привести не только к большим экономическим потерям, но и стать причиной несчастных случаев.

Многолетний опыт свидетельствует, что «калькуляторный» метод компенсации реактивной мощности дает только видимую экономию и не имеет ничего общего с главной задачей применения компенсации в системах электропитания, - с оптимизацией потерь, возникающих при протекании через систему как нескомпенсированной индуктивной, а так и емкостной мощностей. Кроме того, электропитающие предприятия, которые в последнее время все строже охраняют свои интересы, в любой момент могут нам установить так называемый третий счетчик, который непрерывно рассчитывает потребленную реактивную энергию, при этом калькулятор необходимо будет спрятать в ящик. Вывод один - для того чтобы оптимизировать затраты, как в экономическом, так и техническом аспектах, необходимо использовать **автоматическую групповую компенсацию** или, в отдельных случаях, применить индивидуальную компенсацию. Автоматическая групповая компенсация - это соответственно подобранная к потребностям и условиям работы конденсаторная установка с микропроцессорным регулятором реактивной мощности.

### **Интеллектуальный регулятор**

«Мозговым центром» каждой конденсаторной установки является регулятор. Эффективность компенсации на 70% зависит от функционального и технического уровня регулятора. Оставшиеся 30% - это конструкция установки и надежность используемых элементов, например контакторов, конденсаторов и т.д. Этим элементам установки будет посвящена отдельная статья в «Электропанораме».

Главным параметром, который характеризует «мозг», является интеллектуальность, т.е. умение справляться с различными и даже нетипичными ситуациями. Ни падение

напряжения питания ниже допустимой величины, ни вызванные влиянием высших гармоник искажения в измеряемых напряжениях и токах, ни установка слишком мощного измерительного трансформатора тока, ни зависимость от величины и скорости изменения нагрузки, ни электромагнитные помехи не должны влиять на качественную работу регулятора. Одним словом - регулятор должен надежно работать в реальных условиях и иметь длительный срок службы.

Дополнительно такой регулятор должен быть универсальным в применении, т.е. работать при различных напряжениях питания, различных конфигурациях конденсаторных установок (количество ступеней, мощность первого уровня и т.д.) и различных температурных условиях. Он должен быть прост в подключении и обслуживании, универсален в применении и иметь хорошую техническую документацию, как минимум на русском языке, содержащую инструкцию подключения, порядок установки и включения регулятора.

### **Характеристики регулятора**

Как отмечалось выше, только микропроцессорный регулятор обладает широкой функциональностью, а самое важное - программное обеспечение регулятора можно приспособить к индивидуальным потребностям пользователя. Для качественного регулирования необходимо правильно измерить, а затем сравнить результаты измерений с определенными пользователем уставками в регуляторе. Все известные регуляторы измеряют в так называемом упрощенном режиме Арона, т.е. измеряют ток в одной фазе и напряжение в двух других.

Это является главным условием, которое необходимо выполнить, подключая регулятор к системе. Если речь идет об измерении напряжения, то необходимо проверить: будет ли регулятор работать, когда напряжение достигнет величины 340В или 380В - 15%. Большинство регуляторов, выпускаемых в Западной Европе, предназначены для работы с напряжением 400В, в результате чего необходимо уточнить – гарантирует ли производитель правильную работу регулятора при пониженном напряжении в сети. Если напряжение в сети отличается от 380В, то необходимо выяснить у производителя наличие версии регулятора, предназначенного для работы с напряжением 500В, 525В или 660В.

Измерительный класс регулятора определяется диапазоном измеряемого тока. Хорошие регуляторы имеют линейную зависимость вторичного тока трансформатора в диапазоне от 20 мА до 6 А. Минимальная величина измеряемого регулятором тока обеспечивает возможность работы установки при малых нагрузках. Когда нагрузка предприятия в первой смене составляет 1200 А, а ток измеряется трансформатором 1500/5, то регулятор работает правильно. Но что получится, когда нагрузка по

окончании смены упадет до величины 10 А (останется включенным только освещение территории и другие мелкие потребители)? Как поведет себя регулятор? Будет ли он дальше измерять и регулировать, когда ток на вторичной обмотке трансформатора упадет до уровня 30 мА. Хороший регулятор должен измерить такой малый ток, определить величину реактивной мощности до компенсации и в зависимости от величины мощности конденсатора на первом уровне подключить его.

Несмотря на то, что величина реактивной мощности будет сравнительно небольшая, но некомпенсирование ее в течение 15 часов ежедневно может дать при месячном сопоставлении негативный эффект в виде дополнительной оплаты за реактивную мощность. Регуляторы известных фирм начинают измерение и регулирование, когда ток превышает 300 мА, хотя польские регуляторы, осуществляют это уже при токе 20 мА. Как видим, налицо разница в классе, хотя по цене Вы этого можете и не заметить.

Важно также, чтобы при такой чувствительной системе измерения регулятор противостоял электромагнитным помехам. Помехи эти распространяются электромагнитным путем и часто индуцируются на длинных участках проводов. Регулятор должен иметь системы разделения и такие алгоритмы управления, чтобы не чувствовать такого рода помехи.

Максимальная величина измерения вторичного тока 6 А - это обуславливает приспособленность регулятора к возможности постоянной перегрузки измерительного трансформатора тока на 20%. Хороший трансформатор тока должен иметь линейную шкалу и для таких токов. Другим важным качеством измерительной системы регулятора должна быть однозначность измерения, когда измеряемые напряжения и токи в большой степени искажены высшими гармониками. Несмотря на значительную величину  $\text{THD}_u$  или  $\text{THD}_i$  (коэффициенты содержания высших гармоник в напряжении и токе), регулятор должен правильно измерить коэффициент мощности. Конечно, при больших величинах  $\text{THD}_i$  необходимо защищать конденсаторы, вмонтированные в конденсаторные установки, специальными дросселями (о них в последующих публикациях).

Следующей очень важной характеристикой, определяющей класс, является возможность подбора параметра регулирования к индивидуальным условиям пользователя. К ним относятся: характеристика работы, алгоритм подключения различных по величине емкости конденсаторов, время реакции на происходящие события. При выборе регулятора необходимо проверить: снабжен ли регулятор устройствами, которые позволяют приспособить параметры процесса компенсации к индивиду характеру изменению нагрузок у конкретного пользователя.

Необходимо помнить, что чем меньше емкость конденсатора на первом уровне, тем меньшее изменение реактивной мощности можем компенсировать, что в результате

дает более высокую результативность работы установки. Чем выше значение  $\cos \phi$  оговорено в договоре (например  $\cos \phi - 0,98$ ), тем чувствительнее должен быть наш регулятор.

Кроме чувствительности, необходима еще дополнительная адаптация к имеющимся нагрузкам.

### **Режимы работы**

Выделяют три режима работы регулятора: косинусный, мощный и смешанный. При косинусном режиме параметром, в соответствии с которым производится процесс компенсации, является  $\cos \phi$ . При мощностном - параметром является величина реактивной мощности, подлежащей компенсированию. В смешанном режиме используются преимущества обоих указанных методов, и компенсация осуществляется в соответствии с двумя параметрами одновременно.

Косинусный режим используется, когда в течение основного времени регулирования имеем малые значения измеряемого тока и малые значения изменяемой мощности для компенсации, т.е. малые мощности конденсатора на первом уровне. Регулятор будет подключать этот конденсатор даже тогда, когда величина реактивной мощности в системе по отношению к активной мощности будет мала.

Второй режим работы используем, когда ток, текущий в системе, и приросты реактивной мощности в течение длительного периода регулирования имеют большие величины. В этом режиме можно быстро получить компенсацию при больших величинах реактивной мощности.

При наличии в системе питания разных величин прироста мощности, если есть установка, где регулированный ряд конденсаторов возрастает последовательно в 2:4:8: раза и т.д., а также имея в договоре высокий коэффициент мощности  $\cos \phi$ , применяем смешанный режим.

Принцип работы регулятора реактивной мощности MRM-12, выполненного в соответствии с технической документацией в зависимости от выбранного режима работы, показан на **рис. 1**. Недопущение длительной перекомпенсации сети даст нам возможность установки в регуляторе времени реакции и алгоритмов работы для двух разных состояний сети.

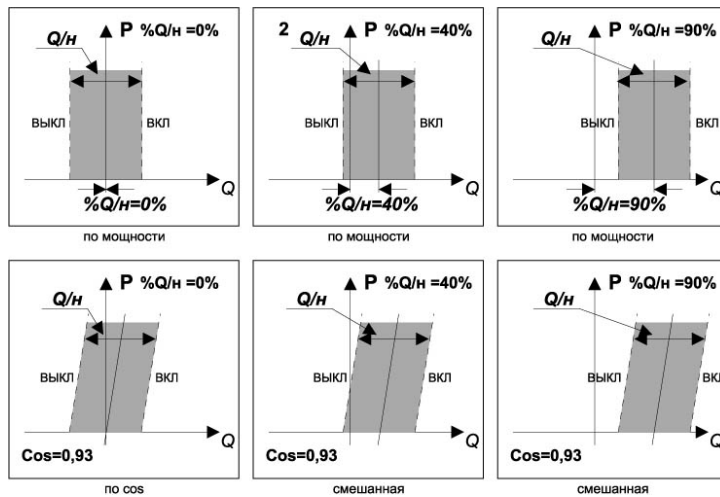


Рис. 1. Характеристики работы регулятора

Первая - когда питающая сеть носит индуктивный характер. В этом случае время реакции и алгоритм работы подбираются в зависимости от динамики изменений и от величины измеренной реактивной мощности подлежащей компенсации. Необходимо найти оптимальную величину времени так, чтобы успевать за изменениями реактивной мощности, в системе и одновременно не иметь заблокированного выхода к подключению конденсаторов, так как все они находятся в рабочем состоянии во время разрядки.

Следует помнить, что для того, чтобы заново подключить отключенный конденсатор, необходимо его перед этим разрядить. Как правило, при нормально работающих сопротивлениях разрядки временная задержка на разрядку до уровня 50 В составит 45 с. Выбор алгоритма подключения конденсаторов, т.е. какие емкости должны подключаться первыми, большие или малые, будет зависеть от характера изменений наших нагрузок и, конечно же, от того, будет ли наш регулятор иметь возможность реализации всего того, что описано ранее.

Иная ситуация может наступить, если во время проведения процесса автоматической компенсации питающая сеть имеет емкостной характер. Как уже отмечалось, перекомпенсация является опасным состоянием. Регулятор должен такое состояние обнаружить и начать процесс регулирования, отключая конденсаторы согласно установленному времени и в соответствии со специальным алгоритмом работы, начиная с наибольшей емкости. С переходом сети в индуктивный характер все процессы можно начать проводить, как в нормальной ситуации.

В заключение первой части статьи хочу сказать, что лично я не встречал ни одного дешевого регулятора из Италии, Испании или Германии, который бы имел три режима работы, а также защиту перед входом в состояние перекомпенсации путем индивидуальной установки времени реакции и соответствующих алгоритмов

соединения конденсаторов.

Надеюсь, что приведенная информация хоть немного продемонстрировала преимущества интеллектуальных регуляторов реактивной мощности и показала их роль в системе электроснабжения. В следующем номере я опишу проблемы подбора уставок регулятора для конкретных условий работы и приведу пример использования регулятора MRM-12 в не-типичных ситуациях. В первой публикации, посвященной интеллектуальным регуляторам реактивной мощности, рассмотрены вопросы эффективности регулирования  $\cos \phi$ , целесообразности использования для этих целей интеллектуального регулятора, его основные характеристики и режимы работы. Предлагаем Вашему вниманию продолжение статьи.

### **Алгоритмы подключения конденсаторов**

Для быстрого выхода сети из состояния перекомпенсации регулятор должен выбрать алгоритм работы в соответствии с имеющимся рядом конденсаторов. Какие могут быть ряды и в каких ситуациях они применяются? Наиболее универсальным рядом конденсаторов является ряд, возрастающий последовательно :1;2;4;8;16 и так далее. Этот ряд обладает двумя положительными качествами. Во-первых, с ним можно проводить эффективную компенсацию реактивной мощности, так как на первой ступени можно использовать конденсатор мощностью 1 кВар, что обеспечивает изменение активной мощности приемника на уровне 1,5 кВт. Во-вторых, этот ряд позволит нам сконструировать конденсаторную установку, в которой для определения исходной емкости используется наименьшее из возможного количества конденсаторов. Для этого можно использовать различные алгоритмы. Например, для малых значений приростов мощности можно подключить конденсаторы с начала ряда, а для больших - из середины. При перекомпенсации сети отключают конденсаторы с конца, т.е. от наибольших величин.

Существуют также алгоритмы для проведения компенсации динамических нагрузок традиционными методами, т.е. когда конденсатор будет подключен обычным контактором. В этом случае необходимо принять во внимание время разряда конденсатора. С целью получения быстрого доступа к нужному конденсатору применяются круговые алгоритмы, которые дополнительно оптимизируют количество соединений в конденсаторной установке. Методика основана на том, что все используемые конденсаторы имеют одинаковую мощность (т.е. ряд 1;1;1;1; и т.д.). Мощность единичного конденсатора подбирается исходя из изменения мощности в системе, а общая мощность установки - из фактических потребностей.

Как видим, метод требует мно-гоступенчатой конструкции конденсаторной установки, поэтому перед тем как остановить свой выбор на традиционной методике,

необходимо проверить, сколько ступеней будет иметь наша установка и не будет ли стоимость этой конденсаторной установки выше стоимости установки с электронными переключателями, которые не требуют от конденсатора (при его повторном включении) разрядки до напряжения 50 В.

Максимальное количество уровней, которые можно подключить, 21, но такой тип регулятора является очень дорогим. Существуют два типа регуляторов, которые имеют относительно низкую цену и могут максимально подключить 15 уровней. Остальные регуляторы могут подключить до 12, 6 или только 4 уровня.

Круговой метод основан на подключении конденсатора, который был отключен максимальное время, и на отключении конденсатора, который имел максимальное время подключения. Это оптимизирует время работы конденсатора, количество контакторов при соответствующе подобранном времени реакции и количестве уровней конденсаторной установки. Учитывая время на разрядку конденсатора, при таком методе можно получить почти следящую компенсацию с динамикой в несколько секунд.

Другие применения имеет алгоритм работы для ряда величин конденсаторов 1:2:2:2; и т.д. Это порядок медленного, но точного следования (точность на каждом шаге процесса равняется мощности первого конденсатора) до состояния с компенсирования, с минимальным шансом перехода сети в состояние перекомпенсации. Очевидно, что быстрый выход из состояния перекомпенсации возможен только при другом способе выключения конденсаторов, например, начиная с последнего.

Отличительной чертой хорошего регулятора является возможность проведения компенсации ручным методом, т.е. включение и отключение конденсаторов клавиатурой регулятора в зависимости от мгновенных потребностей с одновременным, так, как и в автоматическом режиме работы, наблюдением при помощи регулятора времени разрядки конденсатора. Ручной режим используем в основном в аварийных ситуациях, когда произошло повреждение одной из конденсаторных установок в системе и в течение короткого периода времени мы должны результативно скомпенсировать систему. Этот режим используется также при последней проверке правильности работы новой установки после ее подключения к системе питания.

Регулятор должен иметь, кроме ручного режима, отдельный режим тестирования. Эта сервисная функция значительно облегчает процесс тестирования работы конденсаторной установки.

### **Системы визуализации**

Регуляторы должны также иметь хорошую систему коммуникации с обслуживающим



персоналом. Передаваемая информация должна быть легко читаемой и однозначной. Точно должен быть описан способ индикации величины косинуса, так как он всегда положительный, независимо от того, находится угол в I или IV четверти. Можно показать постоянной индикацией - I четверть и мигающим способом - IV четверти. Так же должна передаваться информация о состоянии регулятора: подключены конденсаторы или отключены; скомпенсирована ли сеть к соответствию с уставками на регуляторе. Возможность наблюдения за тем, как регулятор успевает реагировать, за изменениями мощности в системе, позволяет контролировать время реакции. Непрерывно показываемая величина косинуса дает возможность обслуживающему персоналу проверять исполнение уставок, правильность выбора режима работы и применяемых алгоритмов подключения конденсаторов, в соответствии с изменениями мощности в системе. Лучшие регуляторы имеют дополнительную сигнализацию о повреждениях. Они сигнализируют, например, о случайных изменениях уставок обслуживающим персоналом. Все это позволяет быстро реагировать на возникающие аварии или ошибки в работе регулятора.

### **Другие схемные решения**

Существуют и другие полезные функциональные решения, не столь популярные, как описанные выше, но присущие поодиночке каждому из хорошо известных регуляторов.

Первое решение - это регулятор, питаемый напряжением 100 В. Он предназначен для специфической методики компенсации реактивной мощности, где измерительные сигналы берутся из среднего напряжения (СН), а сама конденсаторная установка установлена на низком напряжении в распределительном щите, который выполняет вспомогательную роль в системе питания. То есть сигналы управления формируются на уровне СН, где известна суммарная потребность на реактивную энергию в системе, а компенсация реактивной мощности проводится конденсаторной установкой, установленной на низком напряжении. Этот метод экономически выгоден, когда вместо нескольких конденсаторных установок на низком напряжении используют одну большую. Напряжение и ток как сигналы, управляющие регулятором, подаются от измерительных трансформаторов напряжения и тока сети СП (напряжение вторичной обмотки измерительного трансформатора составляет 100 В).

Другое схемное решение применимо, когда ток во вторичной обмотке трансформатора тока мал (меньше чем 20 мА), то есть регулятор уже не измеряет, а "завис". Большое влияние на величину реактивной мощности, когда почти все приемники отключены и не потребляют мощность, оказывает холостой ход трансформатора без нагрузки. В описанном ранее примере отмечалось, что даже малая, не скомпенсированная в

течение длительного периода времени, величина реактивной мощности отрицательно влияет на среднее значение  $\cos \phi$ . В этом случае разумно применить регулятор, который отключится от управления трансформатором тока, и подключить один конденсатор, компенсируя потребляемую индуктивную мощность. В Польше такой тип регулятора использовался в районах, где электроснабжающие предприятия запрещали проведение компенсации реактивной мощности в ночное время. В это время в сети наступал режим перекомпенсации, и регулятор автоматически отключался от трансформатора и приостанавливал работу конденсаторной установки.

Достаточно интересной, в отношении высокого экономического эффекта, является конструкция регулятора с двойным токовым входом. Такая система дает возможность подачи к одному регулятору двух разных токовых сигналов. Это решение применяется при проведении компенсации в системах питания с двумя силовыми трансформаторами.

Рассмотрим две ситуации. Первая, когда из двух трансформаторов один работает, а другой находится в резерве. В этом случае один токовый вход регулятора подключен к измерительному трансформатору, расположенному в системе работающего трансформатора, а другой токовый вход к измерительному трансформатору, размещенному в системе резервного трансформатора (способ подключения регулятора представлен на **рис. 2**). Если по какой-либо причине система АВР переключит питание на резервный трансформатор, регулятор также автоматически переключается на управление с другого измерительного трансформатора. При возвращении схемы в первоначальное состояние регулятор автоматически возвратится к управлению с первого измерительного трансформатора. В этой ситуации имеем чистый экономический эффект, так как вместо двух конденсаторных установок можно использовать одну, но с двухтоковым регулятором.

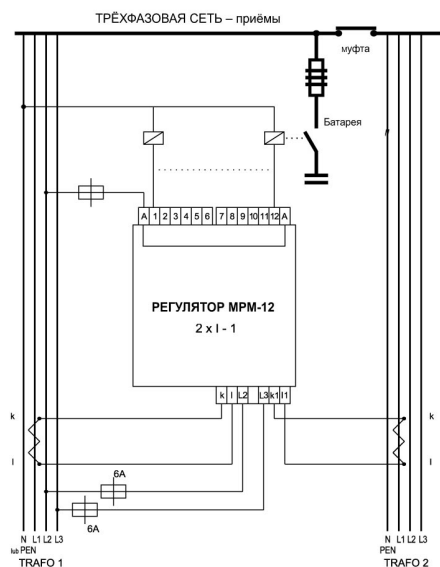


Рис. 2.

Вторая ситуация - два трансформатора работают одновременно. Каждый регулятор подключен к своему измерительному трансформатору через первый вход. Вторым входом каждого регулятора подключен к другому измерительному трансформатору (рис. 3). В случае, когда на одном трансформаторе исчезнет напряжение, АВР автоматически подключает к работающему трансформатору вторую секцию шита, на котором напряжение исчезло. Регулятор, у которого на первом входе отсутствует токовый сигнал при имеющемся напряжении питания, автоматически переключится на управление с другого измерительного трансформатора. В данном случае работают обе установки, управляемые с одного измерительного трансформатора тока.

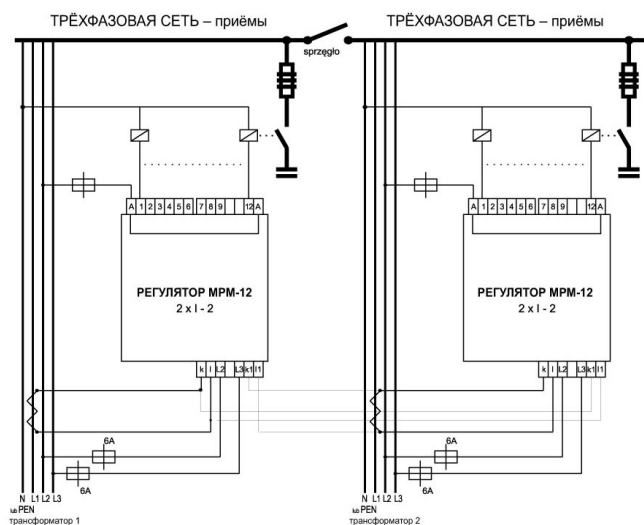


Рис. 3.

Экономический эффект обусловлен тем, что, проектируя обе конденсаторные установки, мы подбираем их мощность в зависимости от нагрузки одного трансформатора, не создавая так называемого скрытого резерва, без необходимости удваивающей полную мощность установки. При восстановлении напряжения система автоматически возвращается в исходное состояние, и каждая установка компенсирует потребление, связанное с одним силовым трансформатором.

Хотя автор старался представить свой 15-летний опыт работы в области систем компенсации реактивной мощности в сжатой форме, изложение материала заняло довольно много места. Надеемся, что две части статьи (первая была опубликована в "Электропанораме" № 4) объяснили Вам принцип работы прибора под названием микропроцессорный регулятор реактивной мощности, показали его роль в системе питания. Руководствуясь приведенной информацией, Вы сможете оценить и выбрать регулятор. В предыдущем номере "Электропанорамы" Вы сможете легко найти рекламу, а в ней адреса украинских представителей польской фирмы **Twelve Electric**, где лично проверите, насколько предлагаемые регуляторы реактивной мощности MRM-12 отвечают заявленным требованиям и характеристикам. Если вас интересуют проблемы, связанные с подбором регулятора для конкретных условий

работы или заинтересовала проблематика подбора установок с целью получения эффективной компенсации, рекомендуем ознакомиться с компьютерной программой demo-Twelve. Способ получения программы Вы найдете на Интернет-странице под адресом e-mail:twelvee@twelvee.com.pl.

С уважением

Krzysztof Dąbrowski

Twelve Electric Sp. z o.o.