

## УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

А.Н. Попов

*В данной статье предложено решение одной из актуальных на сегодняшний день проблем современной электроэнергетики – рациональной компенсации реактивной мощности. Использование статических батарей конденсаторов зарекомендовало себя как наиболее простой и дешевый способ компенсации реактивной мощности. Целью исследования является устранение ключевого недостатка этого метода, а именно, невозможности регулирования величины компенсации. Для этого спроектировано и изготовлено устройство на основе микроконтроллера, осуществляющее диагностику параметров сети, расчет коэффициента мощности в реальном времени и выбор необходимой величины компенсации.*

*Ключевые слова: реактивная мощность, коэффициент мощности, батарея конденсаторов, микроконтроллер, АЦП.*

Электрическая энергия прочно вошла в нашу жизнь, она находит свое применение во всех сферах жизнедеятельности человека и непосредственно участвует в создании других видов продукции. Поэтому в современном промышленном производстве особое внимание уделяется качеству электрической энергии. Важность проблемы повышения качества электрической энергии нарастает вместе с развитием и широким внедрением на промышленном производстве вентильных преобразователей и различных высокоэффективных технологических установок, таких как дуговые сталеплавильные печи, сварочные установки, которые ухудшают качество электрической энергии в питающей электрической сети. В итоге возникает своего рода парадокс: с одной стороны всё шире применяются новые технологии, которые экономичны и технологически эффективны и которые улучшают жизнь людей, а с другой – отрицательно сказываются на качестве электрической энергии в электрических сетях.

Вследствие ухудшения качества электрической энергии, потребители несут потери, а именно:

- потери, связанные с невыполнением заданных функций из-за простоя оборудования и рабочей силы;
- потери, вызванные браком продукции, а также вынужденным изменением режима работы остальных элементов энергетической системы или их состава;
- потери, обусловленные внеплановым ремонтом отказавшего оборудования, выходом из строя и сокращением срока службы оборудования, увеличением удельных затрат

электроэнергии, сырья, материалов на выработку продукции;

– потери, связанные с недоиспользованием основных и оборотных материальных фондов энергетической системы и предприятий-потребителей энергии.

В современных электропитающих и распределительных сетях обеспечение показателей качества электрической энергии, приемлемых для потребителей, требует значительных затрат денежных средств и материалов.

В настоящее же время наблюдается недофинансирование энергетической отрасли, что в совокупности с низкой эффективностью использования выделенных инвестиций, приводит к недопустимому сокращению ввода новых и замещающих мощностей. К 2015 году выработает свой ресурс почти 70% имеющихся мощностей в сетях. При продолжении этих тенденций уже в недалеком будущем электроэнергетическая отрасль может столкнуться с кризисом, который окажет негативное влияние на экономику и население страны.

Регламентируемые нормы на качество электрической энергии устанавливают нормативно и предельно допустимые значения показателей качества электроэнергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трёхфазного и однофазного тока частотой 50 Гц.

Одной из наиболее часто возникающих на промышленных предприятиях проблем с качеством электрической энергии, является низкое значение коэффициента мощности.

Низкие значения коэффициента мощности приводят к:

## УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

– необходимости увеличения полной мощности цеховых трансформаторов, что в свою очередь требует больших капитальных вложений;

– увеличению потерь мощности и напряжения в токопроводах;

– излишним затратам на оплату электрической энергии, которая будет выражаться в повышении себестоимости продукции и снижать конкурентоспособность предприятия на рынке производителей;

– дополнительным потерям на нагрев, что приводит к увлечению падения напряжения в элементах сети.

Чем меньше коэффициент мощности сети, тем менее загружена сеть активной мощностью и тем меньше коэффициент полезного действия используемой сети. В связи с этим необходимо, чтобы как можно большую часть в полной мощности составляла именно активная мощность, а не реактивная, в этом

случае коэффициент мощности будет ближе к единице [3].

Повышение коэффициента мощности обеспечивает несколько технических и экономических преимуществ, особенно снижение счетов за электроэнергию. К примеру, установка конденсаторов для повышения коэффициента мощности позволяет потребителям снижать затраты на электроэнергию за счет поддержания уровня потребления реактивной мощности ниже значения, согласованного (по договору) с поставщиком электроэнергии. В рамках применяемой тарифной структуры счет за потребленную реактивную энергию выставляется по критерию  $\text{tg}\varphi$ , определяемый по формуле 1:

$$\text{tg}\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{[\text{квар}]}{[\text{кВт}\cdot\text{ч}]} \quad (1)$$

Основные мероприятия по повышению коэффициента мощности приведены на рисунке 1.

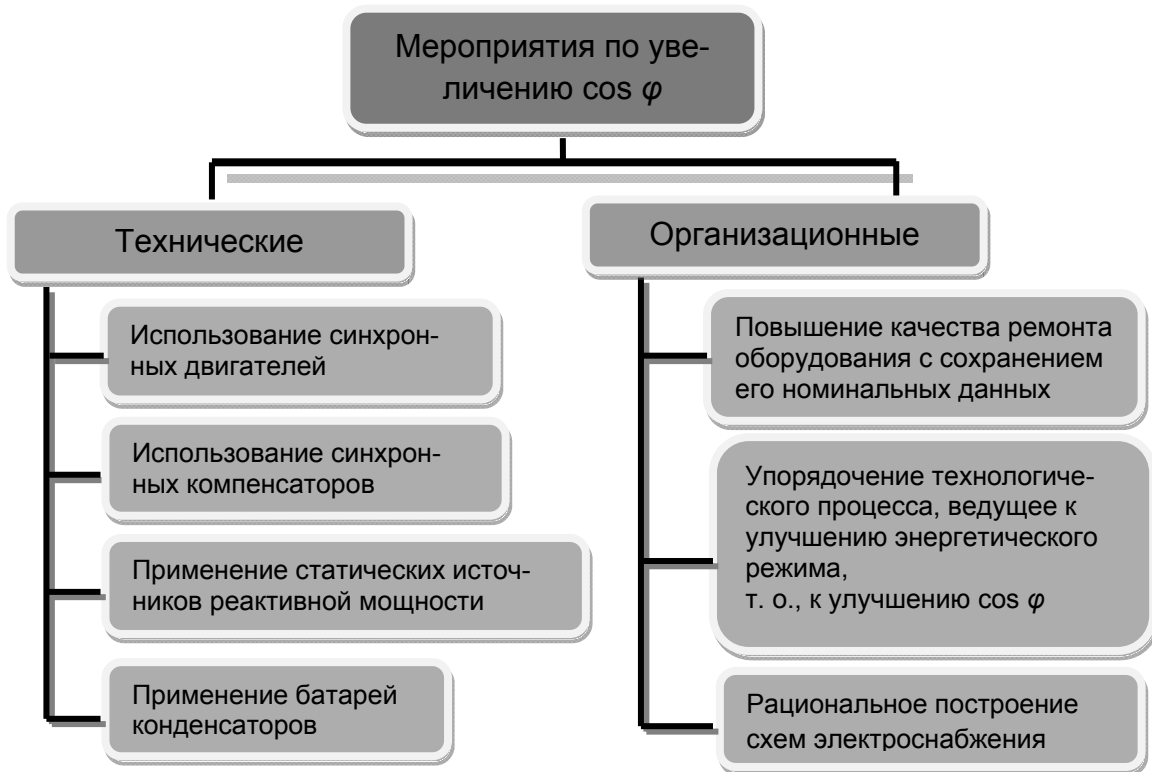


Рисунок 1 – Мероприятия по увеличению коэффициента мощности

Прежде всего, важны технические мероприятия:

– использование синхронных двигателей. Синхронные двигатели имеют по сравнению с асинхронными большое преимущество, заключающееся в том, что благодаря

возбуждению постоянным током они могут работать с  $\cos\varphi = 1$  и не потребляют при этом реактивной мощности из сети, а при работе с перевозбуждением даже отдают реактивную мощность в сеть. В результате улучшается коэффициент мощности сети и

уменьшаются падение напряжения и потери в ней, а также повышается коэффициент мощности генераторов, работающих на электростанциях.

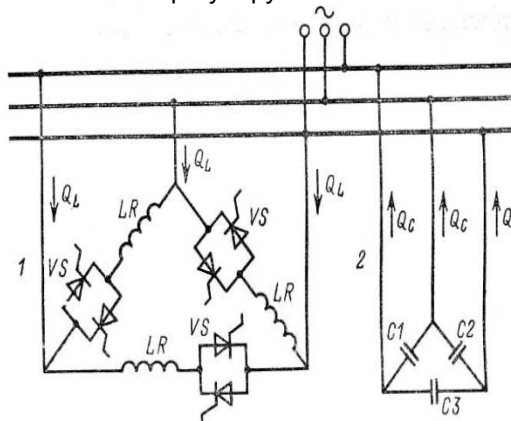
Достоинствами данного метода является: сохранение синхронным двигателем большой нагрузочной способности при понижении напряжения; возможность увеличения тока возбуждения синхронных двигателей позволяет увеличивать их надежность работы при аварийных понижениях напряжения в сети и улучшать в этих случаях условия работы энергосистемы в целом; добавочные потери в стали и в клетке ротора синхронных двигателей меньше, чем асинхронных, благодаря чему к. п. д. обычно выше (из-за большей величины воздушного зазора).

Недостатки: конструкция синхронных двигателей сложнее, чем короткозамкнутых асинхронных двигателей; синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током, вследствие этого синхронные двигатели в большинстве случаев дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором; пуск и регулирование скорости вращения синхронных двигателей также сложнее;

– использование синхронных компенсаторов. Синхронные компенсаторы являются разновидностью синхронных двигателей и представляют собой синхронный двигатель облегченной конструкции без нагрузки на валу. В настоящее время выпускаются синхронные компенсаторы мощностью выше 5000 квар. Основной их недостаток состоит в том, что они имеют ограниченное применение в сетях промышленных предприятий и лишь в ряде случаев используются для улучшения показателей качества напряжения у мощных электроприемников с резкопеременной ударной нагрузкой (дуговые печи, прокатные станы и т.п.).

– применение статических источников реактивной мощности. В сетях с резкопеременной ударной нагрузкой на напряжении 6-10 кВ рекомендуется применение специальных быстродействующих источников реактивной мощности, которые должны устанавливаться вблизи таких электроприемников. Схема источника реактивной мощности приведена на рисунке 2. В ней в качестве регулируемой индуктивности используются индуктив-

ности LR и нерегулируемые ёмкости C1-C3.



**LR – индуктивный элемент для плавного регулирования колебаний напряжения с помощью тиристорных ключей VS; 1 – фильтр высших гармоник 5-го, 7-го, 9-го и т.д. порядка; 2 – C-1, C-3 батарей конденсаторов для компенсации постоянной составляющей реактивной мощности**

*Рисунок 2 – Принципиальная схема статических источников реактивной мощности, применяемых для компенсации реактивной мощности*

Регулирование индуктивности осуществляется тиристорными группами VS, управляющие электроды которых подсоединены к схеме управления. Достоинствами статических источников реактивной мощности является отсутствие вращающихся частей; относительная плавность регулирования реактивной мощности, выдаваемой в сеть; возможность трёх- и четырёхкратной перегрузки по реактивной мощности. К недостаткам относится появление высших гармоник, которые могут возникнуть при глубоком регулировании реактивной мощности;

– применение батарей конденсаторов. Наиболее экономичным средством для компенсации реактивной мощности являются конденсаторные батареи. Это объясняется их преимуществами перед другими средствами компенсации реактивной мощности, а именно: возможность применения как на низком, так и на высоком напряжении; малые потери активной мощности (0,0025–0,005 кВт/квар); наименьшая удельная стоимость (за 1 квар) по сравнению с другими компенсирующими устройствами; простота эксплуатации (ввиду отсутствия вращающихся и трущихся частей); простота производства монтажа (малая масса, отсутствие фундамента); возможность использования для установки любого сухого помещения.

## УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Однако встает необходимость компенсации постоянно изменяющейся (к примеру за сутки, что видно из любого суточного графика нагрузки) величины реактивной мощности. Все более широкое применение получает регулирование мощности конденсаторной батареи путем подключения или отключения ее секций. Регулируемая автоматическая конденсаторная установка компенсации реактивной мощности обеспечивает соблюдение требуемого коэффициента мощности с большой точностью и в широком диапазоне компенсируемой мощности, а также дает возможность:

- автоматически отслеживает изменение реактивной мощности нагрузки в компенсируемой сети и, в соответствии с заданным значением  $\cos \varphi$ ;
- исключается генерация реактивной мощности в сеть;

- исключается появление в сети перенапряжения, т. к. нет перекомпенсации, возможной при использовании нерегулируемых конденсаторных установок;

- визуально отслеживаются все основные параметры компенсируемой сети.

Таким образом, регулируемые автоматические конденсаторные установки являются наиболее перспективным направлением в области компенсации реактивной мощности как способе повышения качества электрической энергии.

Для практической реализации данного метода было принято решение о проектировании устройства, на практике реализующего все достоинства данного способа. Упрощенно принцип работы устройства можно представить следующей структурной схемой, представленной на рисунке 3.

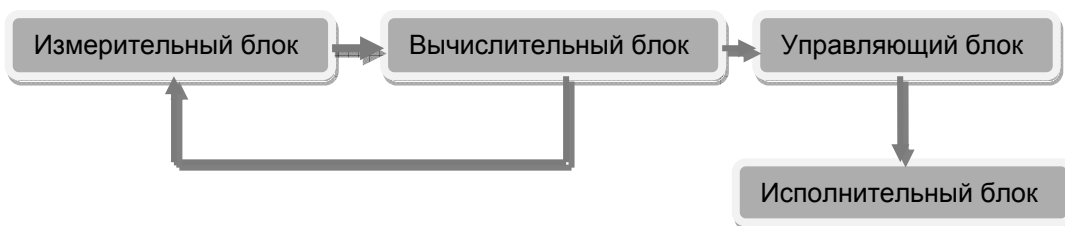


Рисунок 3 – Структурная схема устройства

Измерительный блок осуществляет непрерывное изменение тока и напряжения рабочей сети с установленной частотой в секунду. В вычислительном блоке происходит вычисление, соответствующего мгновенным показаниям, коэффициента мощности сети и сравнение его с установленным значением. Если коэффициент мощности выходит за пределы заданной величины, то подается сигнал на управляющий блок, который определяет величину необходимой для компенсации реактивной мощности. Исполнительный блок замыкает ключи на соответствующих батареях для получения требуемой величины компенсации реактивной мощности.

Для реализации подобной схемы устройства встала необходимость использования микроэлектронной вычислительной техники, то есть использования микроконтроллера для автоматизации всех процессов.

Важным этапом является непосредственный выбор микроконтроллера [4], удовлетворяющего нуждам данного устройства. Среди лидеров рынка широкодоступных и

простых в программировании микроконтроллеров можно выделить микроконтроллеры семейства PIC и продукцию компании Atmel – микроконтроллеры семейства ATmega. Был проведен сравнительный анализ для выбора наиболее подходящей модели, как по семейству микроконтроллера, так и по его типу.

Программируемые контроллеры семейства PIC построены по гарвардской архитектуре, что подразумевает разделение памяти и шин данных и команд, что позволяет за один такт микроконтроллера выполнять обращение к памяти данных и к памяти команд. В микроконтроллерах PIC реализована двухступенчатая конвейерная обработка команд, что обеспечивает одновременное исполнение текущей команды и выборку из памяти данных следующей. Все команды микроконтроллера, кроме команд безусловного и условного переходов, выполняются за один конвейерный такт. Операции безусловного и условного перехода, включая команды вызова подпрограмм и возврат из них, исполняются за два конвейерных такта.

Память команд располагается на кристалле микроконтроллера и снабжается битом защиты. Микроконтроллеры PIC выпускаются в отладочном, однократно программируемом и масочном вариантах.

Микроконтроллеры PIC, выполненные в отладочном варианте, выпускаются как с электрически стираемой FLASH памятью, так и с ультрафиолетовым стиранием. Наиболее удобными считаются микроконтроллеры с FLASH памятью, позволяющие многократно и быстро перепрограммировать микроконтроллер. Однако отладочные варианты микроконтроллеров имеют более высокую стоимость по сравнению с не перепрограммируемыми микроконтроллерами.

Однократно программируемые микроконтроллеры дешевле своих отладочных эквивалентов, и позволяют единожды запрограммировать микроконтроллеры на выполнение определенной программы. Кроме того, некоторые однократно программируемые микроконтроллеры имеют EEPROM память, что позволяет после записи программы в микроконтроллер изменять значение констант, записанных в EEPROM.

Масочно программируемые микроконтроллеры имеют самую низкую стоимость, однако данные микроконтроллеры программируются непосредственно при производстве на заводе изготовителя, что делает возможным их применение только при изготовлении крупных партий устройств.

Некоторые программируемые контроллеры имеют в своем составе различные периферийные устройства, что дает возможность подобрать микроконтроллер, который бы максимально подходил к конкретным условиям эксплуатации.

AVR-микроконтроллеры фирмы Atmel – это 8-разрядные RISC микроконтроллеры для встраиваемых приложений. Они привлекают внимание разработчиков наилучшим соотношением показателей быстродействия/энергопотребление, удобными режимами программирования, доступностью программно-аппаратных средств поддержки и широкой номенклатурой выпускаемых кристаллов.

Новая линия микроконтроллеров к настоящему времени насчитывает более 20 различных типов, которые объединены в группы:

- Mega AVR (префикс ATmegaXXX);
- Classic AVR (префикс AT90SXXX);
- Tiny AVR (префикс ATtinyXXX);

– AVR для Smart Cards (префикс AT90SCC).

MegaAVR имеют наибольшие объемы памяти, наибольшее количество выводов и наиболее полный набор периферийных узлов.

Группа ClassicAVR содержит микроконтроллеры с различным сочетанием периферийных узлов, различными объемами встроенной памяти и различным количеством выводов. Таким образом, разработчик имеет возможность сделать оптимальный выбор и не переплачивать за неиспользуемые узлы.

Микроконтроллеры группы TinyAVR появились последними. Это дешевые кристаллы, стоимостью порядка 1 доллара США, в маленьких 8-выводных корпусах, способные работать от источника пониженного напряжения и при этом обладающие такими функционально важными периферийными узлами, как, например, АЦП.

Можно назвать следующие отличительные особенности Mega AVR по сравнению с остальными:

– рекордные размеры встроенной памяти программ и данных;

– 6 цифровых программируемых портов ввода/вывода. Практически полный набор периферийных узлов, перечисленных при обсуждении Classic AVR (нет только схемы сброса при понижении питания);

– простейший 8-разрядный таймер у Mega AVR имеет более развитые режимы работы, чем у Classic AVR;

– имеется возможность управления системной тактовой частотой при помощи программируемого делителя, что позволяет по ходу выполнения программы снижать тактовую частоту и уменьшать тем самым энергопотребление кристалла;

– при помощи внешнего сигнала, подаваемого на вход PEN, можно разрешать/запрещать программирование кристалла по последовательному интерфейсу.

Так же, помимо прочих характеристик, особое внимание уделялось оперативной памяти микроконтроллера в связи с необходимостью выполнения большого числа операций, таких как замеры показаний сети и их анализ. Поэтому, исходя из сходных прочих параметров, был выбран микроконтроллер семейства ATmega, как наиболее дешевый вариант.

На период обучения работе с микроконтроллером был выбран ATmega16, как наиболее распространенный и включающий в себя все необходимые функции для проведения исследования. В дальнейшем работа бы-

## УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

ла продолжена с более мощным микроконтроллером ATmega1284, который обладает 16 Кб собственной оперативной памятью,

требуемой для проведения операций измерения тока и напряжения сети и вычисления коэффициента мощности.

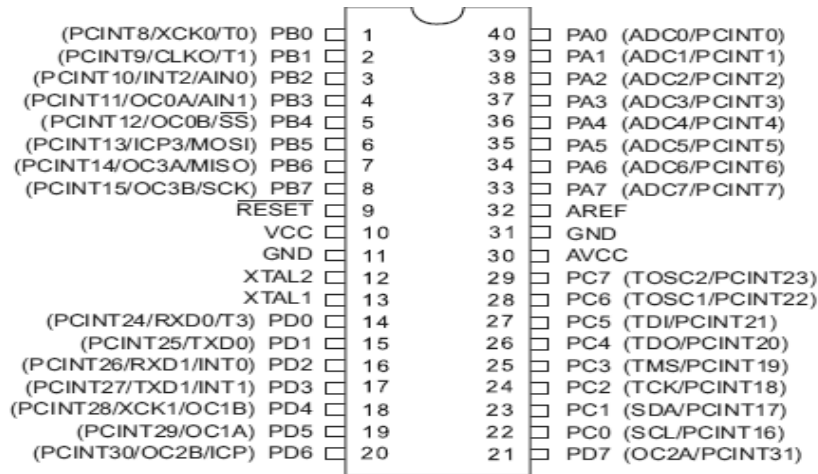


Рисунок 4 – Конфигурация микроконтроллера ATmega1284P

Одной из таких функций является встроенный 8-ми каналный 10-ти разрядный аналого-цифровой преобразователь, который непосредственно занимается сбором показаний сети.

Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует напряжение (аналоговый сигнал) в код, над которым микропроцессор и программное обеспечение выполняют определенные действия.

Существует несколько основных типов архитектуры АЦП, хотя в пределах каждого типа существует также множество вариаций. Различные типы измерительного оборудования используют различные типы АЦП. Например, в цифровом осциллографе используется высокая частота дискретизации, но не требуется высокое разрешение. В цифровых мультиметрах нужно большее разрешение, но можно пожертвовать скоростью измерения. Системы сбора данных общего назначения по скорости дискретизации и разрешающей способности обычно занимают место между осциллографами и цифровыми мультиметрами. В оборудовании такого типа используются АЦП последовательного приближения либо сигма-дельта АЦП. Существуют также параллельные АЦП для приложений, требующих скоростной обработки аналоговых сигналов, и интегрирующие АЦП с высокими разрешением и помехоподавлением. Именно АЦП такой архитектуры выполнен в микро-

контроллере. Скорость выборок в секунду может достигать до 15 кГц.

Так для проведения эффективной и чувствительной процедуры компенсации реактивной мощности количество выборок для одной электрической величины, допустим для напряжения, в период должно составлять не менее 500 в период синусоиды и не менее 2,5 кГц в секунду. Соответственно для мониторинга тока и напряжения потребуется выборка их мгновенных значений со скоростью 5 кГц в секунду. Такое количество выборок было определено степенью точности вычисления  $\cos(\varphi)$ , а именно с точностью до сотых. Более точное вычисление не представляется целесообразным, так как не несет значимых изменений в составе полной мощности.

Процесс вычисления  $\cos(\varphi)$  сводится к вычислению разности между пиковыми значениями синусоиды напряжения и тока сети. Графически это можно изобразить следующим образом.

На данном рисунке синяя кривая изображает изменение напряжения в сети, а красная кривая – ток. Зная моменты времени, когда амплитудное значение кривой напряжения и тока достигают максимума и, рассчитав их разность, можно узнать фазу сети. Таким образом, косинус угла сдвига кривой тока относительно напряжения и дает искомым коэффициент мощности.

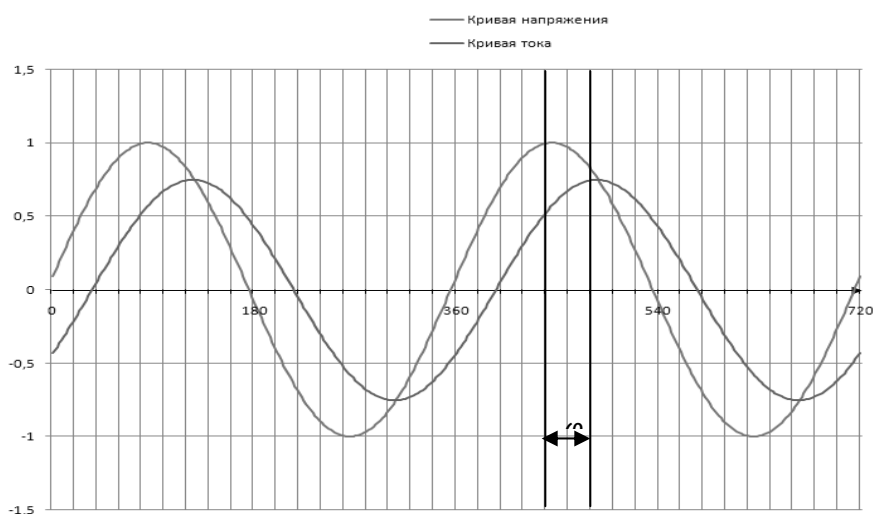


Рисунок 5 – График синусоиды напряжения и тока питающей сети

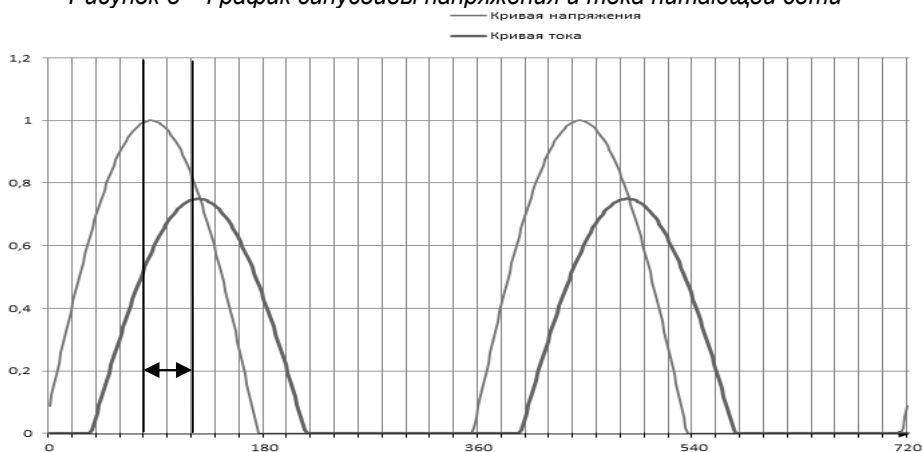


Рисунок 6 – График синусоиды напряжения и тока подводимого к АЦП

За один период синусоиды микроконтроллер выполняет 500 измерений мгновенных значений тока и напряжения. Мы получаем два массива данных, из которых путем попарного сравнения определяются пиковые значения для тока и напряжения. Этим значениям соответствует определенное время, которое можно перевести в угол.

В нашем случае к АЦП в микроконтроллере подводится не полностью синусоида, а только ее положительная полуволна, что значительно облегчает расчет фазы сети (рисунок 6).

На текущем этапе работы успешно осуществляется мониторинг коэффициента мощности сети. Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 7. В натуральном виде устройство изображено на рисунке 8.

Схема питания микроконтроллера выполнена следующим образом. Понижающий трансформатор напряжения Т1 преобразует напряжение сети и на выводах вторичной обмотки выдает 13,5 В. Величина вторичного напряжения была выбрана исходя из параметров стабилизатора, минимальным напряжением работы которого является 10 В. Далее через диодный мост VD1 и стабилизаторную группу, состоящую из двух конденсаторов С1, С2 и стабилизатора, переменное напряжение выпрямляется и на вход питания в микроконтроллер поступает 5 В постоянного напряжения, требуемого для его питания [1, 3].

Схема измерения представляет собой две параллельных цепи. Первая цепь, состоящая из подстроечного резистора R1 и диода VD2, включенных параллельно вторичной обмотки трансформатора, служит

## УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

для измерения фазы напряжения сети. Резистор R1 используется как делитель напряжения, а диод срезает отрицательную часть полуволны синусоиды. Сопротивление R1 выставляется таким образом, что на вход АЦП в микроконтроллере подается напряжение с действующим значением 2,5 В. Вторая цепь, состоящая из последовательно соединенных активного и реактивного сопротивлений и диода VD2, так же параллельно подключенных вторичной обмотке трансформатора T1, служит для измерения фазы тока сети. Индуктивность L1 и сопротивление R2 служат одновременно как для обеспечения необходимого падения напряжения, подводимого к диоду VD2, так и как активно-индуктивная нагрузка. Путем сочетания величин индуктивности и активного сопротивления можно получить требуемый коэффициент мощности. Сопротивление  $R_{ш}$  позволяет получить эквивалентное напряжение току сети. Диод VD3, как и в первом случае, срезает отрицательную полуволну.

В настоящий момент ведутся работы по проектированию исполнительного блока установки, обеспечивающей включение батарей компенсации в цепь. Параллельно проводится разработка программного кода микроконтроллера для управления секциями батарей. Также, для наглядной демонстрации прибора планируется собрать устройство, которое намеренно будет понижать коэффициент мощности.

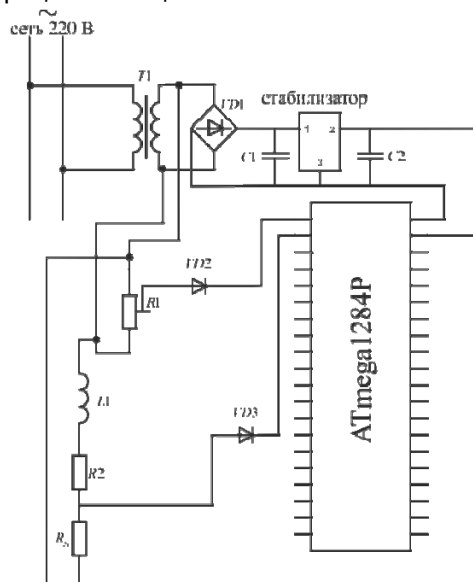


Рисунок 7 – Электрическая схема устройства

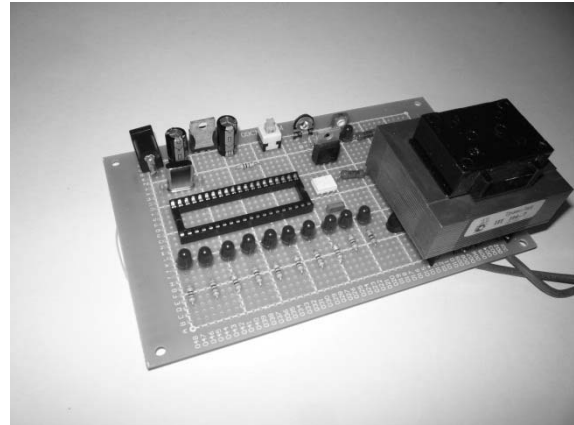


Рисунок 8 – Опытный образец проектируемого устройства

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Граф, Р. Электронные схемы: 1300 примеров [Текст]: пер. с англ. / Р. Граф. – М.: Мир, 1989. – 688 с.: ил. – ISBN 5-03-000735-0
- 2 Вениаминов, В.Н. Микросхемы и их применение [Текст]: справочное пособие / В. Н. Вениаминов, О. Н. Лебедев, А. И. Мирошниченко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.: ил. – ISBN 5-256-00352-6
- 3 Карташев, И.И. Управление качеством электроэнергии [Текст] / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 320 с.: ил.
- 4 Геворкян, М. В. Современные компоненты компенсации реактивной мощности [Текст]: справочное издание / М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2003. – 64 с.

**Попов А.Н.**, к.т.н., доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел.: 8(3852) 29-07-76, E-mail: [soh@mail.ru](mailto:soh@mail.ru)