

СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Галбаев Ж.Т., Усачева Л.А., Хворостьяная Е.В.
КГТУ им. И.Раззакова*

Рассмотрены алгоритмы и принципы построения энергосберегающих микропроцессорных устройств для управления асинхронным электроприводом

Algorithms and principles of construction energy saving microprocessor devices for management of the asynchronous electric drive are considered

Введение. Интенсивное развитие техники сопровождается непрерывным ростом потребления электроэнергии в промышленности, сельском хозяйстве, быту. Наиболее массовым потребителем электроэнергии является электропривод на базе асинхронных двигателей (АД), который потребляет до 60% всей вырабатываемой энергии.

Снижения потерь электроэнергии в асинхронном электроприводе можно достичь различными путями, например, оптимальным проектированием и улучшением технологии изготовления самого АД; рациональным выбором двигателя для конкретного электропривода; применением специальных регулирующих устройств. Первые два способа достаточно подробно освещены в технической литературе. Появление и развитие третьего способа обусловлено тем, что эксплуатационные режимы асинхронных приводов характеризуются отклонением реальной нагрузки АД от нагрузки, на которую рассчитан двигатель и которой соответствуют оптимальные значения его энергетических показателей. Существование таких режимов определяется переменным по времени характером нагрузки АД, который обусловлен особенностями технологического цикла станков и механизмов, использующих асинхронный привод. Анализ показывает, что большую часть рабочего времени АД недогружен. Например, средний коэффициент загрузки двигателей приводов металлорежущих станков ниже 0,6. Очевидно, что в режиме недогрузки асинхронный привод характеризуется низкими значениями энергетических показателей АД — коэффициента мощности $\cos\varphi$ и коэффициента полезного действия. Поэтому работы, направленные на повышение энергетических показателей АД в указанных режимах работы, представляют значительный практический интерес.

Постановка задачи. Характер загрузки двигателя по мощности определяется режимом работы механизма, в котором он установлен. Рассмотрим наиболее характерные для КР отрасли хозяйства – сельское хозяйство и текстильная промышленность.

В сельских электроустановках двигатели мельниц, дробилок, измельчителей имеют резкопеременный характер нагрузки с систематическими и случайными перегрузками. Кроме того, для сельскохозяйственных машин перегрузки обусловлены недопустимыми колебаниями напряжения сельских сетей и низким уровнем технического обслуживания. Возможность перегрузок приводит к тому, что установки комплектуются двигателями завышенной мощности, особенно при расчете на тяжелые условия пуска.

Широкие возможности экономии электроэнергии в текстильной промышленности связаны со спецификой работы электроприводов текстильных машин. Например, непосредственно на обработку сырья или продукта затрачивается только небольшая доля потребляемой электроэнергии. Значительная ее часть расходуется на преодоление трения в машинах и динамических усилий и моментов при торможении и пуске. Кроме того, наличие больших маховых масс в текстильных машинах заставляет завышать установленную мощность электропривода для обеспечения режима пуска и разгона машины в соответствии с технологическими требованиями производства. Почти у всех двигателей текстильных машин установленная мощность завышена на 25÷30%. Еще одна особенность работы текстильных машин связана с обрывностью нитей и их полуфабрикатов. Для ли-

квидации обрыва машину останавливают, и двигатель переходит в режим холостого хода. Поэтому работа АД на холостом ходу составляет от 10 до 25% всего рабочего времени.

Недогрузка асинхронного привода и работа на холостом ходу приводят к снижению энергетических показателей его АД. Учитывая высокий коэффициент сменности (среднее время наработки 5500 ч в год), а также наличие большого числа маломощных приводов (до 3 кВт), энергетические показатели которых сравнительно невелики, можно ожидать значительного экономического эффекта от использования энергосберегающих устройств как в сельском хозяйстве, так и в текстильной промышленности.

Оптимизация энергетических показателей электроприводов на базе короткозамкнутых АД может достигаться за счет установки между сетью и двигателем дополнительного устройства, изменяющего напряжение питания на нем в функции изменения нагрузки. Регуляторы напряжения целесообразно применять для приводов малой и средней мощностей, так как уменьшение энергопотребления в этом случае происходит за счет снижения тока намагничивания и, как следствие этого, снижения потерь в обмотках АД. Это, в свою очередь, приведет и к снижению затрат на компенсирующие устройства и уменьшению потерь электроэнергии в питающих сетях. При этом энергосберегающие функции могут являться как основной целью при проектировании, так и вспомогательной, например, при частотном регулировании.

Результаты исследований. Одна из важных задач при разработке энергосберегающих устройств — это выбор закона регулирования напряжения АД при изменении нагрузки на его валу. Сравнительный анализ различных законов регулирования показывает, что они неравноценны с точки зрения экономии электроэнергии, потребляемой асинхронным приводом.

Законы регулирования асинхронного привода можно построить таким образом, чтобы они обеспечивали поддержание следующих показателей АД: максимальное значение КПД; постоянное значение коэффициента мощности; минимум тока статора; минимум потребляемой мощности. При этом следует отметить, что проблема выбора закона регулирования не ограничивается только экономической стороной. Реализация каждого закона возможна лишь в замкнутой системе автоматического регулирования, простота и надежность которой во многом зависит от параметра, принятого в качестве регулируемой переменной. Определение рационального закона регулирования тем более важно, что при регулировании напряжения полупроводниковыми приборами энергетические показатели АД из-за возникновения высших гармонических тока и напряжения снижаются по сравнению с синусоидальным напряжением и в случае нерационального регулирования можно получить отрицательный эффект от использования подобных регуляторов. Поэтому несмотря на то, что самая высокая экономичность привода будет получена при минимизации потерь в двигателе или при максимальном значении КПД, эти алгоритмы не получили широкого распространения. Измерение потерь в работающем двигателе сопряжено с большими трудностями, а для оценки КПД необходима установка датчика скольжения на вращающийся вал двигателя, что снижает надежность работы регулятора и приводит к довольно сложным схемным решениям.

Минимальное значение тока статора однозначно определяет минимум потерь в АД. Однако оптимизация режимов АД по минимуму тока может быть реализована либо системой с заранее заданной регулировочной характеристикой и обратной связью по возмущению, либо системой с поиском экстремального значения регулируемой координаты. Основной недостаток первой системы — необходимость индивидуальной настройки регулятора на конкретный механизм и сложность его реализации. Недостаток поисковой системы — невысокое быстродействие регулятора, обусловленное выбором шага сканирования. Использование алгоритма регулирования напряжения по минимуму тока в АД небольшой мощности нецелесообразно, так как ток холостого хода у таких машин соизмерим с рабочим током и область минимума тока у них существенно размыта.

Поддержание постоянного значения коэффициента мощности при изменении на-

грузки позволяет получить наиболее рациональный по минимизации потребляемой энергии режим, так как в этом случае двигатель работает с КПД, достаточно близким к максимальному значению. При этом необходимо выдерживать не определенную зависимость, а лишь заданное значение угла сдвига между током и напряжением в фазе, что приводит к существенному упрощению аппаратной части. Известны способы регулирования напряжения АД, совмещающие оба закона регулирования, — по току и по поддержанию заданного значения коэффициента мощности.

Наибольшее распространение в схемах энергосберегающих регуляторов нашли тиристорные регуляторы напряжения (ТРН) с фазовым регулированием. Такие регуляторы достаточно хорошо известны в современном электроприводе, где они применяются в основном для регулирования скорости механизмов, не требующих высоких энергетических показателей [1,2]. Однако применение их в целях энергосбережения началось сравнительно недавно. При этом, первые системы управления для энергосберегающих ТРН отличались от систем для регулирования скорости в основном датчиками первичной информации и видом обработки сигнала. Такие системы содержат в своем составе датчик D первичной информации, вычислительное устройство ВУ, реализующее тот или иной закон управления, систему импульсно-фазового управления СИФУ и усилители мощности УМ управляющих импульсов (рис. 1).

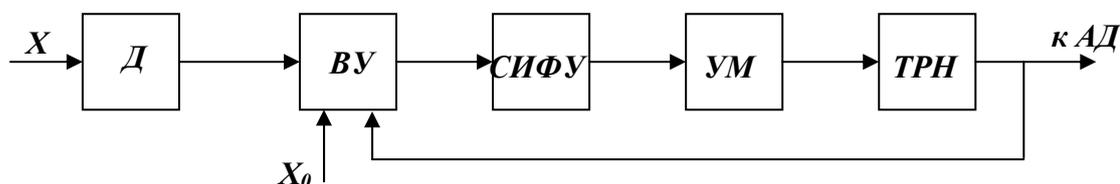


Рис.1. Блок-схема системы управления асинхронным двигателем.

На вход системы поступает измерительная информация X и сигнал уставки X_0 . Система может охватываться обратной связью, поступающей с выхода ТРН. СИФУ и УМ строятся аналогично схемам тиристорного электропривода с фазовым управлением.

Особенности систем управления энергосберегающими ТРН заключаются, прежде всего, в построении датчика измерительной информации и алгоритме работы вычислительного устройства. Подавляющее большинство разработанных энергосберегающих ТРН в качестве первичного параметра используют одну из трех величин: ток двигателя; активную мощность, потребляемую двигателем из сети; величину сдвига фаз между током и напряжением.

Системы управления, использующие в качестве первичного параметра ток двигателя, нашли ограниченное применение. Все большее внедрение в схемотехнику цифровых методов обработки информации приводит к необходимости реализации датчика первичной информации в виде преобразователя аналоговой величины (тока) в цифровой эквивалент (код, частоту, скважность и т.п.). По тем же причинам не нашли широкого распространения и системы, использующие в качестве первичной информации активную мощность, потребляемую двигателем. Кроме того, измерение активной мощности в цепях несинусоидального тока проводится по достаточно сложным алгоритмам, которые требуют либо значительного усложнения схемы при аппаратной реализации, либо значительной вычислительной мощности при применении микропроцессоров (МП).

Более простые датчики мощности, выполненные, как правило, в виде множительного устройства, реализованного на основе операционных усилителей, используются в регуляторах напряжения дискретного действия. Такие регуляторы имеют исполнительные элементы, переключающие обмотки двигателя со звезды на треугольник при больших нагрузках и обратно - при малых. В качестве такого регулятора можно предложить устройство, блок-схема которого приведена на рис. 2. Устройство содержит полупроводниковые коммутаторы 1 и 2 включения статорной обмотки 3 асинхронного электродвигателя.

теля "звездой" и "треугольником". Датчик частоты вращения 4 выдает сигналы (рис. 3,а), по переднему фронту которых формирователь импульсов 5 формирует короткие импульсы (рис. 3,б). Эти импульсы перебрасывают Т-триггер 7 из одного устойчивого состояния в другое. Пусть в момент t_0 прихода импульса с формирователя импульсов 5 на инвертном выходе Т-триггера 7 устанавливается сигнал логической единицы (рис. 3,в). Тогда в этот же момент появляется аналогичный импульс на выходе первого элемента "И" 6 (рис. 3,е), который запускает одновибратор 12. Этот одновибратор формирует на своем выходе эталонный импульс логического нуля Δt_u (рис. 3,д), равный периоду времени вращения вала за один оборот холостого хода. Интервал времени между ними Δt_s пропорционален скольжению.

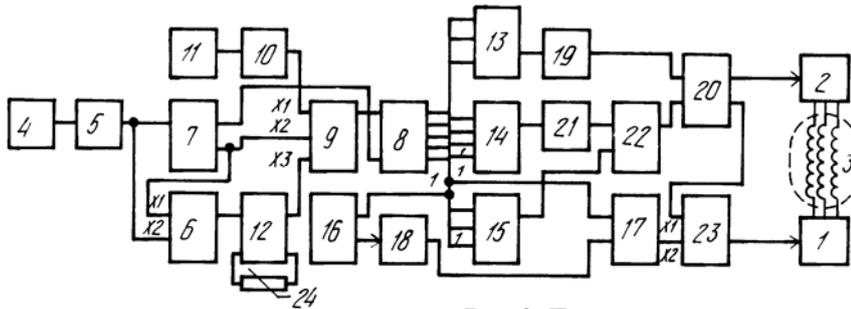


Рис.2. Блок-схема регулирующего устройства для асинхронного электродвигателя

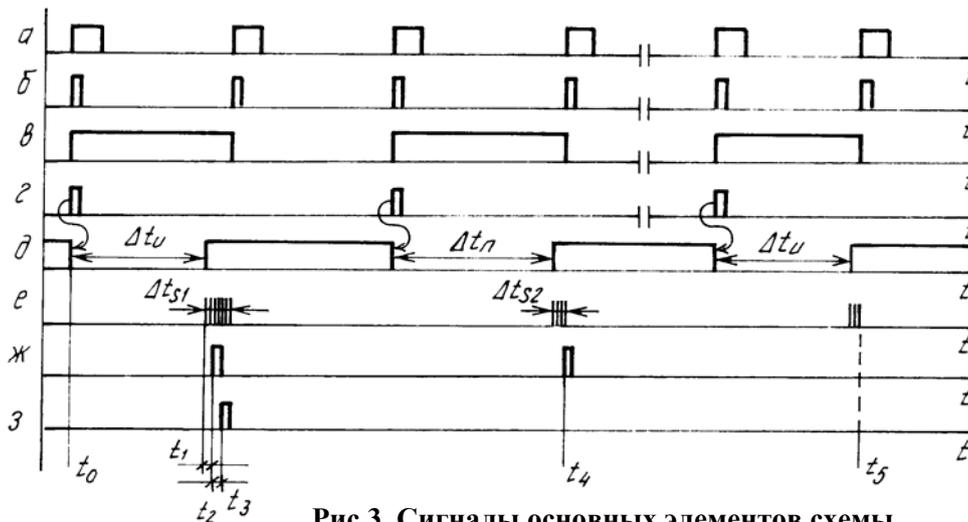


Рис.3. Сигналы основных элементов схемы.

Пусть статорная обмотка двигателя включена по схеме "звезда", однако нагрузка такая, что энергетически выгоднее переключить обмотку 3 АД на "треугольник". В этом случае в момент t_1 окончания импульса, формируемого одновибратором 12, на выходе элемента "И" 9 появляется накат импульсов длительностью $\Delta t_s = \Delta t_{s1}$ (рис. 2,е), которые считываются счетчиком 8. При числе импульсов, соответствующем точке (скольжению) переключения с "треугольника" на "звезду", на выходе третьего элемента "И" 13 в момент t_2 появляется импульс (рис. 3,ж). А при числе импульсов, соответствующего точке (скольжению) переключения со "звезды" на "треугольник", в момент t_3 появляется импульс на выходе четвертого элемента "И" 14 (рис. 3,з). Последний импульс поступает на второй блок задержки 21, назначение которого дать команду на переключение триггера 20 при заданном числе импульсов на входе блока 21. Импульс с выхода второго блока задержки 21 подается на выход второго элемента "ИЛИ" 22 и перебрасывает триггер 20 в устойчивое состояние с сигналами логической единицы и логического нуля соответственно на прямом и инверсном выходах. В результате отключается коммутатор 1 "звезда" и включается коммутатор 2 "треугольник". Двигатель переходит на работу по схеме треугольник с меньшими потерями.

При снижении нагрузки АД до величины, где энергетически выгоднее переключить статорную обмотку 3 на "звезду", на выходе элемента 9 появляется пакет импульсов длительностью $\Delta t_{s3} < \Delta t_{s2}$ (рис. 3,е). Счетчик 6 считывает импульсы пакета, однако он не досчитывает до числа импульсов, соответствующих точке (скольжению) переключения с "треугольника" на "звезду". На выходе элемента 13, а следовательно и входе блока задержки 19, в момент t_5 импульс не появляется (рис. 3,ж). При отсутствии заданного числа импульсов на входе блока 19 на его выходе появляется сигнал, который перебрасывает триггер 20 в устойчивое состояние с сигналом логического нуля на прямом и логической единицы на инверсном выходах. В результате отключается коммутатор 2 "треугольник" и включается коммутатор 1 "звезда". Двигатель переходит на работу по схеме "звезда" с меньшим электропотреблением, его скольжение несколько увеличивается.

В случаях, когда АД работает по схеме "звезда" и происходит наброс нагрузки, который может опрокинуть двигатель, на выходе элемента 9 появляется пакет импульсов $\Delta t_{s4} > \Delta t_{s5}$. Импульсы этого пакета считаются счетчиком 8. При числе импульсов, превышающем заданное для устойчивой работы АД число, на выходе элемента 15 появляется импульс, который немедленно перебрасывает триггер 20 в состояние, при котором отключается коммутатор 1 "звезда" и включается коммутатор 2 "треугольник". Двигатель немедленно переходит на более устойчивую характеристику с соединением статорной обмотки по схеме "треугольник".

С изменением температуры нагрева АД изменяется сопротивление его обмоток, что приводит к изменению величин скольжения, соответствующих оптимальным точкам переключения "звезда-треугольник". Введением терморезистора 24 во времязадающую цепь одновибратора 12 обеспечивается соответствующая температурная коррекция: с увеличением температуры обмоток АД увеличивается сопротивление терморезистора, что приводит к увеличению длительности эталонного импульса.

В некоторых системах в качестве первичного параметра используется ЭДС самоиндукции, которая наводится в обмотках статора при его подключении к сети, значение которой зависит от величины нагрузки. За счет указанной ЭДС, при использовании ТРН ток в фазе прекращается с запаздыванием на угол δ по отношению к моменту изменения знака приложенного напряжения. Интервал проводимости тиристоров увеличивается в этом случае на угол δ и становится равным:

$$\lambda_m = \pi - \alpha + \delta,$$

где λ_m - угол проводимости тиристоров; α - угол открытия тиристоров; δ - угол между моментами перехода через нулевое значение кривых тока и напряжения.

Наибольшее распространение в энергосберегающих ТРН асинхронных двигателей нашли системы управления, где в качестве измеряемого параметра принят угол δ . Устройства, в которых проводится измерение угла δ , условно можно разделить на две группы. В первой стабилизируется на заданном уровне либо поддерживается оптимальным само значение угла δ , во второй - по измеренным значениям угла δ на основании аналитических зависимостей производится расчет действительного значения коэффициента мощности и требуемого угла регулирования. Полученные значения в табличном виде закладываются в вычислительный блок системы управления.

Упрощенная схема датчика угла δ приведена на рис. 4. Схема содержит трансформаторы напряжения и тока, сигналы со вторичных обмоток которых поступают в соответствующих фазах на входы компараторов DA1, DA2. Выходы компараторов подсоединены к входам логической схемы "И", на выходе которой формируется сигнал U_g . Измерение угла δ в регуляторах напряжения, построенных на основе микропроцессора, производится, как правило, измерением длительности интервала между мо-

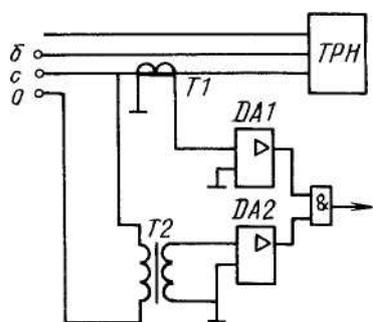


Рис.4. Принципиальная схема датчика угла δ .

ментами перехода через нуль кривых напряжения и тока. Для этого схема датчика формирует короткие импульсы, поступающие на вход микропроцессора.

Наиболее просто задача измерения угла решается при представлении информации в виде импульсных сигналов. Дальнейшая обработка и вид представления зависят от элементной базы системы управления. В системах управления, построенных на основе МП, в последние вводятся моменты времени, соответствующие переходам через нуль кривых тока и напряжения, а расчет величины угла производится средствами МП.

Вычислительный блок регулятора напряжения предназначен для обработки сигнала датчика и вычисления угла управления α в соответствии с принятым алгоритмом управления. Вычислительные устройства целесообразно строить как стабилизаторы величины угла δ , причем обработку сигнала рассогласования проводить по ПИД алгоритмам. При применении ПИД алгоритмов возникает проблема устойчивости, связанная с тем, что система ТРН—АД существенно нелинейна и подвержена колебаниям даже в разомкнутых системах. Поэтому для нормальной эксплуатации систем управления рекомендуют производить тщательную настройку коэффициентов регулятора для каждого случая применения.

Поиски оптимальных законов управления и попытки реализовать расширенный набор функций (плавный пуск, некоторые виды защит, индикацию состояний) привели к применению микропроцессоров в системах управления регуляторов напряжения. При этом используются как специализированные, так и универсальные микропроцессоры. При построении системы управления на основе МП большая часть выполняемых функций реализуется программным обеспечением.

При построении регулятора напряжения асинхронного двигателя на основе МП на него целесообразно возложить функции измерения угла δ , вычисления требуемых углов управления тиристорами и реализации системы импульсно-фазового управления.

С точки зрения архитектуры МП регулятора программно-аппаратный комплекс, реализующий функции управления, строится как совокупность фоновой задачи и нескольких модулей, инициируемых сигналами прерываний, поступающими от внешних устройств (устройств сопряжения). Распределение функций по модулям весьма произвольно и зависит от характеристик конкретной системы (вида решаемых задач, типа МП и т.п.).

Типичный программно-аппаратный комплекс, реализующий функции регулятора напряжения асинхронного двигателя, показан на рис. 5. Он включает в себя тиристорный (или симисторный) исполнительный элемент ТРН, устройство сопряжения УСО, собственно микропроцессор либо микроЭВМ, а также программный блок. В состав УСО входит, как правило, формирователь синхроимпульсов ФСИ, датчики напряжения и тока ДЗ, усилители мощности управляющих импульсов УМ, пульт оператора П.

Одной из основных функций МП является реализация системы импульсно-фазового управления, т.е. преобразование вычисленного значения угла α во временной интервал и генерация управляющих тиристорами импульсов. Отсчет угла α производится по отношению к точке естественного отпирания вентилей, поэтому одним из основных блоков МП системы управления является блок ФСИ, в задачу которого входит синхронизация работы всего программно-аппаратного комплекса.

ФСИ формирует импульсы синхронизации в мо-

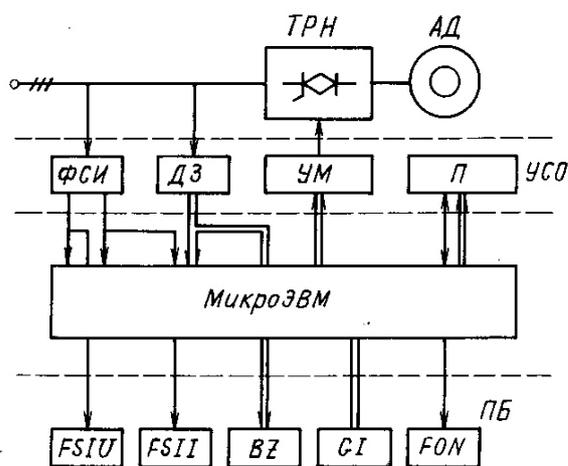


Рис.5. Структурная схема микропроцессорной системы управления

ФСИ формирует импульсы синхронизации в мо-

менты перехода через нуль кривой напряжения одной из фаз силового питающего напряжения, принятой за опорную. Импульсы синхронизации поступают на вход МП, как правило, через вход прерывания и инициируют выполнение специального программного модуля синхронизации FSIU. Одна из задач модуля — запуск преобразования вычисленного значения угла управления α во временной интервал. В системах, где преобразование угла α во временной интервал производится на основе программируемого таймера, выход таймера воздействует на вход прерывания МП и инициирует выполнение модуля генерации управляющих импульсов GI. При этом возможны различные способы организации взаимодействия аппаратной и программной частей. Например, в системах, содержащих три таймера (по числу фаз силовой питающей сети), в задачу модуля FSIU входит загрузка кодов, соответствующих углам управления α тиристорами, в три таймера. Выходы таймеров можно включить на вход прерываний МП по схеме "ИЛИ", при этом в архитектуре программно-аппаратного комплекса предусматриваются специальные средства для расчета номера включаемого тиристора. В таких системах в функции ФСИ входит генерация трехразрядного слова состояния входных силовых фаз сети, которое поступает на вход модуля генерации и распределения импульсов по вентилям GI. В МП регуляторов напряжения для АД широко используется то обстоятельство, что импульсы управления тиристорами разных фаз сдвинуты по фазе один относительно другого на 60 и 120 электрических градусов соответственно. Таким образом, преобразователь угла α реализуется на одном таймере.

В настоящее время наблюдается тенденция возложения на МП систему управления дополнительных функций, таких как плавный пуск, защита, реверс, индикация состояния. Распределение выполняемых дополнительных функций по программным модулям представляет собой сложную задачу, которая решается в каждой системе по-разному, в зависимости от конкретных характеристик ТРН, типа применяемого МП и ряда других факторов. Например, задача защиты может быть решена как в фоновом модуле, так и в модуле — обработчике синхроимпульсов. В обоих случаях сигналы защиты преобразуются в бинарную форму и поступают на входы МП системы, где происходит опрос линий защиты. Возможно построение системы, в которой наиболее приоритетные сигналы защиты поступают через входы прерываний МП, что приводит к уменьшению времени реакции системы на аварийное состояние.

Выводы. 1. На основании анализа различных алгоритмов регулирования напряжения на двигателе в зависимости от нагрузки на его валу показано, что наиболее целесообразно с точки зрения получения максимальной экономии электроэнергии и упрощения схемной реализации осуществлять регулирование напряжением в зависимости от угла запаздывания δ .

2. Предложен регулятор, переключающий обмотки двигателя со звезды на треугольник и обратно в зависимости от величины нагрузки, что обеспечивает уменьшение электропотребления.

3. Показано, что совмещение в регуляторе нескольких функций (пуска, реверса, защиты и энергосбережения) позволяет получить значительную экономию электроэнергии, повысить срок службы и надежность двигателя, отказаться от ряда элементов пусковой и защитной аппаратуры

Литература

1. Петров Л.П. и др. Тиристорные преобразователи напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Кадыров И.Ш. Принципы, методы и алгоритмы построения микропроцессорных систем управления электромеханическими машинными агрегатами. – Б.: ИЦ «Техник», 2007.