

УДК 62-83

Электропривод запорной арматуры как мехатронная система*

А.Г. ГАРГАНЕЕВ, А.С. КАРАКУЛОВ, С.В. ЛАНГРАФ

Рассмотрены вопросы применения регулируемых электроприводов для управления трубопроводной арматурой (ТА). Показано, что современный электропривод трубопроводной арматуры (ЭП ТА) является мехатронным модулем. Исходя из эксплуатационных требований к ТА и особенностей режимов ее работы, проанализированы возможности применения различных электрических машин и полупроводниковых преобразователей в ЭП ТА. Приведены функциональные схемы ЭП ТА. Показаны особенности управления ЭП ТА с микропроцессорным управлением.

Ключевые слова: электропривод, полупроводниковый преобразователь, инвертор, редуктор, трубопроводная арматура, электродвигатель, микроконтроллер.

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс технологии электронных компонентов, составляющих основу микропроцессорной техники и силовой электроники, а также совершенствование способов управления полупроводниковыми и электромеханическими преобразователями, привели к возможности их естественного слияния в единый интеллектуальный электромеханический модуль. При наличии дополнительных механических узлов, образующих редуктор, такой электромеханический модуль является фактически электроприводом, или, в современной терминологии «мехатронной системой», в основу построения которой заложена идея глубокой взаимосвязи механических, электронных и вычислительных элементов.

Широко распространяемой и активно развиваемой мехатронной системой является электропривод (ЭП) трубопроводной арматуры (ТА), предназначенной для управления потоками жидкостей или газов в трубопроводах в составе АСУ ТП различных отраслей промышленности.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современный ЭП ТА должен выполнять свои функции, находясь на удалении от диспетчерских пунктов (ДП) и с учетом специфических условий окружающей среды. При этом решающее значение приобретает надежность конструктивных и схемотехнических решений ЭП, а также его «интеллектуальные» возможности в части:

- а) априорно заложенных законов управления;
- б) «самообучения» и «самонастройки»;
- в) диагностики электродвигателя и полупроводникового преобразователя (ПП) – преобразователя частоты (ПЧ) или тиристорного регулятора напряжения (ТРН);
- г) организации обмена данными с ДП различного уровня, исходя из требований конкретного ТП;

* Получена 18 октября 2011 г.

Работа выполнена по государственному контракту № 13.G36.31.0010 от 22.10.2010 г. на тему: «Исследование, разработка и организация промышленного производства мехатронных систем для энергосберегающих технологий двойного назначения».

д) выполнения требований стандартов по взрывозащите, искробезопасности и электромагнитной совместимости (ЭМС);

е) выполнения требований стандартов по стойкости к различного вида механическим воздействиям [1].

Принципы построения конструктивных и схемотехнических решений ЭП ТА диктуются условиями его применения, а также особенностями ТП.

Конструкция ЭП предусматривает непосредственное механическое объединение двигателя, редуктора и ПП – блока электронного управления. Управление арматурой осуществляется при помощи деталей, образующих подвижное соединение (шток или шпindel) в крышке корпуса или корпусе. Для перемещения затвора ТА используется, как правило, винтовая пара.

Весьма распространенным типом ТА являются задвижки. Требования к режимам эксплуатации клиновых задвижек перекрывают требования к задвижкам всех остальных типов [2, 3].

2. АНАЛИЗ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 1 представлена кинематическая схема задвижки. Моментные усилия, прикладываемые со стороны ЭП ТА, воздействуют на грузовую гайку 2, благодаря чему вращательное движение входного вала 1 преобразуется в поступательное перемещение штока 3, управляющего клиновым затвором 8 (9 – седло клина в корпусе задвижки). Для снижения потерь на трение между входным валом 1 и опорами 5, 6 установлен упорный подшипник качения 4. Герметизация внутренней полости над клином осуществляется уплотнительным соединением 7, расположенным между корпусом задвижки и штоком.

Для анализа переходных процессов при управляющих воздействиях со стороны ЭП задвижку удобно представить в виде двухмассовой системы с эквивалентной упругой связью (рис. 2). Для проведения анализа были определены:

- моменты инерции грузовой гайки J_1 , штока и клина J_2 , приведенные ко входному валу;
- эквивалентная суммарная податливость элементов кинематической схемы $\delta_{\varphi 12}$ (коэфф. жесткости $c_{\varphi 12}$) и зазор в узле винт-гайка $\Delta\delta_{312}$, согласно справочным данным;
- резонансная частота механических колебаний для элементов конструкции задвижки с учетом внутреннего вязкого трения (коэффициента b_{B12}) при вращательном движении;
- моменты сопротивления в компонентах передачи M_{12} и в уплотнительном соединении $M_y = M_{c2}$, приведенные к входному валу.

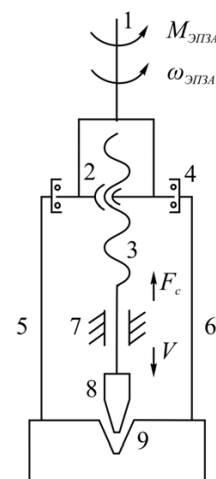


Рис. 1. Кинематическая схема задвижки

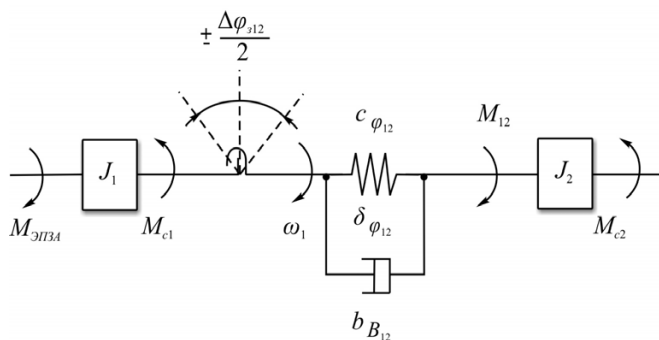


Рис. 2. Расчетная схема задвижки

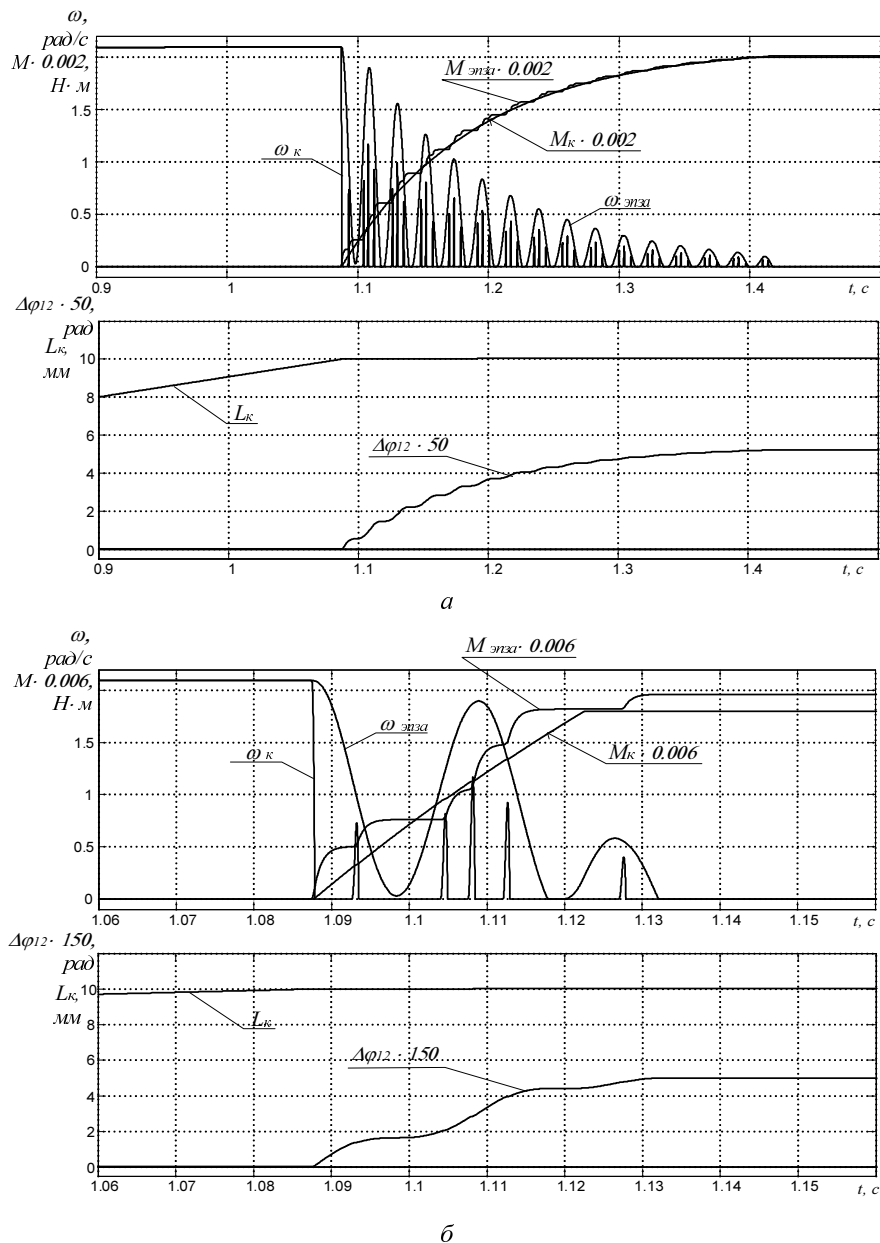


Рис. 4. Переходные процессы в имитационной модели задвижки при закрытии затвора с моментом:

a – 1000 Н·м; $б$ – 300 Н·м ($M_{\text{эпзл}}$ – момент развиваемый на валу ЭП; M_{κ} – момента клина, приведённый к входному валу; $\omega_{\text{эпзл}}$ – угловая скорость входного вала; ω_{κ} – приведённая угловая скорость поступательного движения клина; L_{κ} – линейное перемещение клина; $\Delta\varphi_{12}$ – угол закручивания элементов арматуры при закрывании клина)

Типичный диапазон моментов уплотнения (вытяжки), развиваемых ЭП в задвижках нефтяной и газовой ТА – от 100 до 10000 Нм при временах перекрытия сечения не более 6-20 минут, и альтернативы применению редуктора в составе ЭП нет. Требуемые времена перекрытия сечения трубопровода и моменты приводят к необходимости выбора двигателей с числом оборотов в минуту «сотни–тысячи» и моментами «единицы–десятки» Нм. Соотношение «момент–скорость» приводит к понятию «мощности», которая должна быть в этом случае «сотни

Вт–единицы кВт», а при применении промышленных двигателей с частотой питания 50 Гц скорость их поля составляет 1500 или 3000 об/мин. В таких ограничивающих рамках и находятся коэффициенты передачи редукторов («сотни») и грузовых винтов («десятки»). Таким образом, очерчивается «правовое поле» скоростей, моментов и мощностей электродвигателей для ТА «нефтегазового» типа. Теоретически, задача проектирования ЭП ТА является оптимизационной в координатах «тип редуктора», «тип двигателя», «стоимость», «массогабаритные показатели», «эксплуатационные затраты», «надежность» и т. п. (назовем это «оптимизационная задача № 1», решаемая рядом авторов для других типов ЭП [4]). Однако ЭП с выходными моментами в «сотни–тысячи» Нм практически не оставляет возможности оптимизации в части применения двигателя: червячный редуктор по массе, габаритам и стоимости перекрывает электродвигатель; волновой редуктор с промежуточными телами качения хоть и существенно перекрывает массогабаритные показатели червячного в сторону уменьшения, но стоимость его велика. Таким образом, стоимость электродвигателя для указанных диапазонов моментов мало определяет стоимость всего ЭП, тем более с ПП, и тем более, во взрывозащищенном исполнении. Смысл оптимизационной задачи № 1 появляется для ТА с небольшими моментами, например, регулирующей, где возможен либо «безредукторный» вариант с тихоходными высокомоментными двигателями, либо вариант «редукторный», но с пониженным коэффициентом передачи редуктора.

Поскольку «оптимизационная задача № 1» большого смысла не имеет, логично искать смысл в «оптимизационной задаче № 2», касающейся наилучшего использования электродвигателя для качественного функционирования ТА. Задача № 2 приводит к анализу электромеханических характеристик двигателей.

Самый простой, распространенный и дешевый – асинхронный двигатель (АД). Кроме простоты и дешевизны к достоинствам стоит отнести наличие пускового момента и возможность работы без промежуточных преобразователей энергии от промышленной трехфазной сети переменного тока. К недостаткам АД следует отнести:

- 1) S-образный вид механической характеристики, ввиду чего пусковой и максимальный момент могут различаться до трех раз;
- 2) квадратичная зависимость моментов от напряжения питания;
- 3) потери в роторе ввиду принципа действия двигателя;
- 4) сложный алгоритм контроля момента двигателя;
- 5) зависимость электромеханических характеристик от температуры обмоток статора и ротора;
- 6) неконтролируемый переходный процесс по токам и моменту при прямом пуске двигателя, приводящий к большим значениям ударных моментов и токов;
- 7) низкие энергетические показатели, их зависимость от режима работы (без принятия специальных мер регулирования);

Синхронный двигатель (СД) может быть альтернативой АД. Для рассматриваемого типа ЭП следует говорить о двигателях с постоянными магнитами («вентильных двигателях» – ВД), которые по принципу действия могут работать в одном из двух режимов – синхронном или как бесконтактный двигатель постоянного тока. ВД с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов в настоящее время остаются наиболее перспективными из всех типов электродвигателей, применяемых в современных регулируемых ЭП малой и средней мощности. Это объясняется целым рядом конструктивных и технико-эксплуатационных преимуществ ВД, к числу которых можно отнести:

- 1) бесконтактность;
- 2) большая перегрузочная способность по моменту;
- 3) высокое быстродействие;
- 4) высокие энергетические показатели (КПД и $\cos \phi$), мало меняющиеся при изменении нагрузки и колебаниях напряжения питающей сети;
- 5) минимальное значение токов холостого хода и рабочих токов, что позволяет достаточно точно измерять момент и оптимизировать режим работы;
- 6) практически неограниченный диапазон регулирования частоты вращения;

7) отсутствие потерь в роторе и намагничивающего тока в статоре увеличивает срок службы ЭП, поскольку увеличивается ресурс изоляционных материалов, работающих при более низких температурах. Этот же фактор позволяет работать ВД в нестандартных режимах с возможными перегрузками;

8) минимальные массогабаритные показатели при прочих равных условиях; показатель «момент/масса» у ВД порядка 1,0-1,2 (у АД, например, типа АИР он равен 0,28);

9) значительный срок службы (наработка на отказ составляет 10000 час. и более), надежность. Ресурс ВД и всего агрегата увеличивается также за счет возможности оптимизации режимов работы по скорости и нагрузке.

Вряд ли рационально в настоящее время использование в ТА синхронно-реактивных или вентильно-индукторных двигателей. Интерес может представлять высокоскоростной синхронно-гистерезисный двигатель, имеющий такие достоинства, как:

- постоянство пускового момента и плавный вход в синхронизм при любом моменте инерции ротора;

- независимость частоты вращения ротора от изменения напряжения в сети и нагрузки при наличии некоторого запаса по моменту;

- простота конструкции и высокая надёжность;

- высокие энергетические характеристики при использовании режима «перевозбуждения».

В сочетании с автономным инвертором напряжения при обычном 180° -ном управлении, можно создать относительно недорогой и надёжный ЭП ТА.

Также нежелательно использование и «классических» двигателей постоянного тока ввиду наличия щеточно-коллекторного узла, хотя, ради справедливости следует отметить факт применения таких двигателей фирмой AUMA, а по механическим характеристикам двигатель постоянного тока последовательного (смешанного) возбуждения является идеальным вариантом для ТА (мягкая характеристика с большим пусковым моментом). Таким образом:

1. В нерегулируемом ЭП ТА имеет смысл применять АД с механической характеристикой, у которой наблюдается приблизительное равенство пускового и максимального момента. Такие двигатели в отличие от классических имеют ротор со специальной формой паза («глубокопазные двигатели с вытеснением тока»). При этом пусковой момент должен быть выбран из условия максимального момента вытяжки клина из седла при минимальном напряжении питания сети, предусмотренным техническим заданием. Применение АД с «классической» механической характеристикой в неуправляемом режиме требует перехода к большему габариту машины для обеспечения моментов вытяжки при прямом пуске. Однако в этом случае и увеличиваются неконтролируемые пусковые токи и моменты.

Регулируемый ЭП с ПЧ позволяет применять двигатель при работе на искусственных механических характеристиках для увеличения пусковых моментов. Кроме того, при использовании ПЧ можно организовать движение выходного звена ТА со скоростью, выше номинальной при снижении момента (фактически, за счет формирования характеристики, подобной двигателю постоянного тока последовательного возбуждения в режиме постоянства мощности). Также появляется возможность работы ЭП при выходе из строя одной из фаз сетевого питающего напряжения.

Таким образом, асинхронный ЭП с частотным преобразователем (равно как и ЭП с ВД) может являться «интеллектуальным ЭП с повышенной надёжностью» в условиях некачественных электросетей. Если этого не требуется, тиристорный ЭП с АД, имеющим характеристику, подобную глубокопазным машинам, «перекрывает» все требования при условии ограничения момента (тока) уплотнения. Кроме того, способность выдерживать большие ударные токи позволяет тиристорному ЭП в некоторых критических случаях «использовать» большие ударные, хотя и неконтролируемые моменты.

2. Применение ВД также рационально, т.к. совмещает достоинства частотного и тиристорного ЭП при упрощении контроля момента. Кроме того, при подаче в обмотку постоянного тока двигатель превращается в тормоз, а при вращении ручного дублера появляется возможность через обратные диоды коммутатора получить в звене постоянного тока ЭДС для питания энергонезависимого энкодера, если это не противоречит требованиям взрывозащиты.

В ЭП арматуры с малым моментом уплотнения или регулируемых, ВД может быть использован без редуктора или с «небольшим» редуктором.

3. Представляет интерес использование в ЭП ТА высокоскоростного синхронно-гистерезисного двигателя.

ЭП с ТРН предполагает, что в качестве приводного двигателя используется АД без регулирования частоты вращения. При этом существует необходимость управления пусковыми режимами не только для исключения неконтролируемых ударных токов и моментов, но и для формирования момента уплотнения согласно паспортным данным на конкретную ТА. Кроме того, возможно регулирование скорости в небольшом диапазоне, задание траектории разгона, контроль изоляции обмоток. В настоящее время применяются две системы управления разгоном АД – замкнутая и разомкнутая. Разомкнутая система последовательно во времени уменьшает угол открытия тиристорov, увеличивая напряжение на статоре независимо от состояния двигателя. Подобный метод характеризуется простой и дешевой реализацией, так как отсутствует необходимость в датчиках обратных связей и сложной системе управления. Как показано в [5], на переходные процессы в АД оказывает большее влияние не закон изменения угла напряжения, а длительность, в течение которой происходит уменьшения угла открытия тиристорov.

Одним из вариантов разомкнутой системы является система с запуском АД при начальных условиях: сначала включаются две фазы в момент максимума их линейного напряжения, а затем аналогично подключается третья фаза [6].

Более эффективной системой для ТА является замкнутая, в которой управляющие импульсы на тиристорах формируются в соответствии с током АД и с учетом величины момента. Авторами реализован алгоритм управления с помощью программно реализованной СИФУ и блока логики для обеспечения пуска с контролем модуля вектора тока, момента, реверса, динамического торможения.

Применение ПЧ в составе ЭП ТА с АД практически не усложняет систему, однако, в отличие от ТРН, позволяет наиболее полно использовать возможности управления с применением скалярных и векторных алгоритмов, эффективно адаптируясь к конкретному ТП. Кроме того, наличие инвертора (коммутатора) и DSP-процессора позволяет легче осуществить набор режимов и логических функций с целью осуществления диагностики состояния двигателя и ТА. Что касается сравнения ТРН и ПЧ по ЭМС, то и здесь они находятся примерно в равных положениях. Ввиду конструктивной интеграции ПП и двигателя кондуктивные и индуктивные помехи в выходных цепях фактически отсутствуют. Входные трехфазные цепи ПП могут быть снабжены ВЧ-фильтрами, а в цепи постоянного тока ПЧ лучше использовать дроссель величиной 2–4 мГн. Ввиду кратковременности работы ТА вряд ли уместно в составе ПЧ использовать активный выпрямитель.

4. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Применение редуктора на выходном валу двигателя приводит к появлению механических потерь, которые определяются конструкцией редуктора и режимом его работы. Для компенсации потерь, возникающих в редукторе, необходимо предусмотреть дополнительную цепь коррекции.

С учётом диапазона рабочих температур ($+70 \div -60$ °С), для качественной работы ЭП ТА необходимо в системе управления предусмотреть адаптивную корректировку параметров двигателя. Механические компоненты ЭП ТА при работе подвергаются большим нагрузкам и испытывают упругие деформации. Наличие упругих связей снижает точность работы ЭП при формировании и ограничении моментного усилия и уменьшает ресурс механических компонентов ТА. Для снижения отрицательного влияния упругих связей в системе управления ЭП ТА предусматривается следующее:

– при оптимизации контура управления моментом полоса пропускания выбирается ниже, чем собственная частота колебаний механической системы ТА;

– в канале формирования задания на скорость применяется задатчик интенсивности, который, регулируя плавность перемещений, позволяет уменьшить возникновение крутильных колебаний и согласует быстрдействие контура управления моментом со скоростью изменения момента при уплотнении клина.

Исходя из требований по ограничению моментного усилия, в системах управления ЭП ТА широкое распространение получил метод векторного управления АД. Раздельное управление магнитным состоянием и моментом АД позволяет обеспечить произвольное формирование момента на всей траектории движения ТА с одновременной оптимизацией режимов энергопотребления АД.

Микропроцессорная часть придает ЭП широкие возможности адаптации к особенностям ТП регулирования потока в продуктопроводе, в том числе с применением интерфейсов. Вычислительные ресурсы такой мехатронной системы являются, как правило, достаточными не только для управления самим ЭП, но и для синхронизации работы группового ЭП, фактически интегрируя возможности программируемого логического контроллера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Гарганеев А.Г.** Интеллектуальный электропривод трубопроводной арматуры как элемент распределенной автоматизированной системы управления. Особенности применения и принципы построения / А.Г. Гарганеев // Журнал интеллектуальных технологий, Itech. – 2006. – № 4.
- [2] **Гошко А.И.** Трубопроводная арматура. Классификация. Исполнения. Термины и определения. Технический справочник из серии «Эксплуатация и ремонт арматуры, трубопроводов, оборудования / А.И. Гошко. – М.: Инструмент, 2003. – 126 с.
- [3] Арматура запорная на номинальное давление до PN 150. Специальные технические требования. ОАО «АК «Транснефть». – Москва, 2005.
- [4] **Метельков В.П.** Оптимизация весогабаритных показателей комплекса «двигатель-редуктор» / В.П. Метельков, В.Г. Сазонов // Электротехника. – 1983. – № 3. – С. 62–66.
- [5] Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров, О.А. Андрющенко, В.И. Капинос [и др.] – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
- [6] **Шубенко В.А.** Тиристорный электропривод с фазовым управлением / В.А. Шубенко, И.Я. Браславский. – М.: Энергия, 1972. – 200 с.

Гарганеев Александр Георгиевич, зав. кафедрой Томского университета систем управления и радиоэлектроники, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований: электропривод, силовая электроника, автоматизация технологических процессов и производств. Имеет более 180 научных публикаций. E-mail: garganeev@rambler.ru.

Каракулов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований: электропривод, микропроцессорные системы управления. Имеет более 25 научных публикаций. E-mail: karakulovs@yandex.ru.

Ланграф Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований: электропривод, микропроцессорные системы управления. Имеет более 25 научных публикаций. E-mail: sergey.langraf@elesy.ru.

Garganeev A., Karakulov A., Langraf S.

Stop Valve Electric Drive As Mechatronic System

The paper presents the issue of variable speed electric drives to control pipeline valves. It is shown that the modern electric drives of pipeline valves are mechatronic modules. The applicability of various electrical machines and semiconductor converters to pipeline valve electric drives were analyzed based on the pipeline valve performance requirements and the operation mode peculiarities. Functional diagrams of pipeline valve electric drives were provided. The control features of microprocessor pipeline valve electric drives were presented.

Key words: electric drive, semiconductor converter, inverter, reduction gearbox, pipeline valves, electric motor, microcontroller.