

ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОЙ АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

А.С. Абдурагимов, В.П. Верещагин
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Проведен анализ развития аппаратуры управления электромагнитными подшипниками. Показано, что в настоящее время имеет предпочтение аппаратура с цифровым управлением. Рассмотренные особенности такой аппаратуры, разработанной в ФГУП «НПП ВНИИЭМ», касаются устройств питания и преобразования сигналов датчиков перемещений ротора, управления выходными усилителями с активными фильтрами и разработки программного обеспечения для управления электромагнитными подшипниками газоперекачивающих агрегатов.

Ключевые слова: электромагнитные подшипники, аппаратура управления, газоперекачивающие агрегаты.

Практика применения электромагнитных подшипников (ЭМП) в роторных машинах для различных областей техники показывает, что за последние 30 лет произошли существенные изменения, касающиеся электроники систем управления магнитными подшипниками. Совершенствование элементной базы, применяемой в аппаратуре, позволяет постоянно улучшать схемотехнические решения и применять более сложные и точные алгоритмы управления ЭМП. Особенно следует отметить, что появление микроконтроллеров на базе быстродействующих процессоров позволило создать цифровую аппаратуру управления, широко применяемую в ЭМП современных газоперекачивающих агрегатов (ГПА).

В комплексе научно-технических задач, частично рассмотренных в [1] и решаемых в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» при создании ЭМП для серии компрессоров ГПА, вопросы разработки, изготовления и испытаний аппаратуры управления всегда были актуальными и находились в центре внимания. По мере развития ЭМП основные подходы к выбору схемотехнических решений совершенствовались, что приводило к повышению технических показателей и надёжности аппаратуры. В связи с этим целесообразно рассмотреть поэтапное развитие аппаратуры управления ЭМП.

Первая разработка такой аппаратуры в ФГУП «НПП ВНИИЭМ», связанная с созданием ЭМП для традиционной конструкции двухпорного цилиндрического ротора, была выполнена в начале 80-х годов прошлого столетия применительно к двухступенному силовому гироскопу – гиродину для ориентации космической станции «Мир». Общий вид гиродин с аппаратурой управления (рис. 1) позволяет отметить, что объём аппаратуры управления ЭМП, даже при соответствующем тому времени уровню комплектующих элементов, получил-

ся в несколько раз меньше электромеханического блока и примерно в два раза меньше, чем у аппаратуры для приводов. Этот первый в мировой практике уникальный случай реализации ЭМП для космической техники позволил апробировать основные научно-технические решения, принятые в аппаратуре управления ЭМП. Опыт длительной эксплуатации гиродин на станции «Мир» показал, что аппаратура управления ЭМП обладает достаточно высокой надёжностью, и открываются широкие возможности применения ЭМП в различных областях техники.

Одним из перспективных направлений оказалось применение ЭМП в компрессорах ГПА, используемых на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов природного газа. В 1990 г. ФГУП «НПП ВНИИЭМ» и ОАО «Сумское МНПО им. М.В. Фрунзе» провели работы по замене в ГПА-Ц-16 традиционных масляных подшипников на ЭМП. Отдельные вопросы применения ЭМП рассмотрены в [2], обобщающей опыт разработки и эксплуатации первых ГПА с ЭМП на КС ООО «Самаратрансгаз».

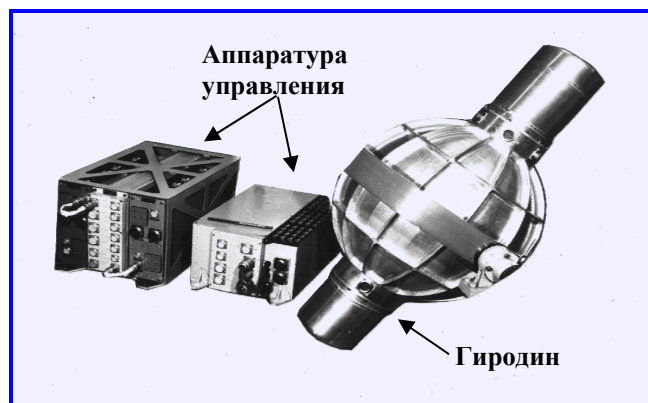


Рис.1. Общий вид гиродин

Это был первый опыт промышленного применения в России ЭМП с аппаратурой управления аналогового типа (СУМП-110), созданной в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» специально для этих целей. Основные параметры аппаратуры управления ЭМП приведены в табл. 1. Следует отметить, что масса ротора компрессора ГПА составляет около 1200 кг, и, соответственно, расчётная действующая нагрузка на каждую ось ЭМП равна 4,2 кН, что примерно в семь раз больше, чем нагрузка на ЭМП гиродина. Максимальное силовое напряжение питания электромагнитов аппаратуры СУМП-110 выбрано 110 В в соответствии с напряжением резервных стационарных аккумуляторных батарей. Предельный рабочий ток электромагнитов, в соответствии с допустимым током силовых транзисторных ключей, принят равным 20 А, что в два раза больше, чем в аппаратуре ЭМП гиродина.

В результате установленная мощность управления в аппаратуре СУМП, определяемая произведением максимального напряжения питания на предельный рабочий ток для каждого канала управления примерно в восемь раз больше, чем в аппаратуре ЭМП гиродина. Удельные управляющие мощности, составляющие часть установленной

мощности, приходящейся на единицу расчётной нагрузки ЭМП, оказываются у ЭМП ГПА с СУМП-110 и ЭМП гиродинов со своей аппаратурой и являются примерно одинаковыми и, соответственно, равными 0,45 В·А/Н. Поскольку частотный диапазон управления, соответствующий номинальным скоростям вращения ротора, у ЭМП гиродина получается шире, чем у ЭМП ГПА с СУМП-110, то можно полагать, что у последних, при одинаковой удельной управляющей мощности, появится запас по динамическим свойствам.

Питание и преобразование сигналов датчиков перемещений ротора (ДП) в СУМП-110 практически не изменились по сравнению с принятым в аппаратуре ЭМП гиродина.

Частота работы ШИМ выходных усилителей (ВУ) в аппаратуре СУМП-110 принята равной 1,5 кГц, что по сравнению с аппаратурой ЭМП гиродина почти в восемь раз меньше. Это обусловлено применением более мощных выходных силовых транзисторов в ВУ с ограниченным частотным диапазоном переключений, и желанием уменьшить помехи в соединительных цепях между электромеханическими частями и аппаратурой управления.

Таблица 1

Параметры аппаратуры управления ЭМП

| Параметры аппаратуры | Гиродин | СУМП-110 | СУМП-220 | СУМП-М | КТМ |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Количество каналов | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Напряжение питания электромагнитов, В | 27 | 110 | 220 | 220 | 220 |
| Максимальный ток электромагнитов, А | 10 | 20 | 20 | 25 | 30 |
| Частота ШИМ, кГц | 12,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 16 |
| Форма напряжения ДП | Синусоидальная | Синусоидальная | Синусоидальная | Синусоидальная | Трапецидальная |
| Частота ДП, кГц | 100 | 100 | 100 | 100 | 16 |
| Напряжение питания ДП, В | 6 | 6 | 6 | 6 | 15 |
| Габаритные размеры, м | 0,25×0,3×0,4 | 1,8×0,6×0,5 | 1,5×0,5×0,5 | 1,8×0,6×0,6 | 1,8×0,6×0,6 |

Дальнейшее совершенствование силовых транзисторов для ВУ позволило повысить уровень максимального напряжения питания электромагнитов и использовать резервный источник питания с напряжением 220 В. Так появилась новая аппаратура СУМП-220, которая до сих пор используется в некоторых ЭМП ГПА, работающих на КС магистральных газопроводов. Для сравнения в табл. 1 приведены некоторые технические данные по аппаратуре СУМП-220. Удельная управляющая мощность у ЭМП ГПА с СУМП-220 увеличилась до 1,1 В·А/Н, что в 2,4 раза больше, чем у ЭМП с СУМП-110. Это позволило улучшить динамические свойства ЭМП существующих ГПА и расширить область применения ЭМП в ГПА с большей массой ротора.

По мере совершенствования силовых электронных элементов и внедрения транзисторных модулей в ВУ была выпущена новая модификация аппаратуры СУМП-М. Максимальное значение тока в электромагнитах увеличилось до 25 А, что привело к повышению по сравнению с СУМП-220 удельной управляющей мощности до 1,4 В·А/Н. Общий вид аппаратуры СУМП-М показан на рис. 2, а основные технические параметры приведены в табл. 1. Аппаратура СУМП-М имеет наиболее широкое применение в ЭМП ГПА мощностью от 6,3 до 25 МВт, которые эксплуатируются на КС магистральных газопроводов ОАО «Газпром» [3].

Рассмотренные основные виды аппаратуры СУМП характеризуют процесс постепенного технического совершенствования показателей, при котором состав и функциональные принципы аппаратуры оставались практически неизменными. Представленная на рис. 3 блок-схема аппаратуры СУМП содержит основные функциональные узлы. В шкафу СУМП конструктивно объединены пять одинаковых каналов управления ЭМП (К1...К5) по числу степеней свободы традиционного цилиндрического ротора на двух радиальных и одной осевой опорах. Каждый канал управления состоит из регулятора (Р), формирующего требуемый закон управления токами электромагнитов (ЭМ1...ЭМ5), центрирующих ротор по данному направлению, в соответствии с перемещением ротора, измеренным датчиком перемещения (ДП), относящимся к этому каналу. Модулятор (М) осуществляет преобразования входного аналогового сигнала регулятора в импульсный сигнал управления ВУ, который регулирует ток в катушках ЭМ1. Кроме перечисленных устройств, входящих в К1...К5, в составе СУМП имеются узлы, выполняющие общие функции питания и преобразования сигналов всех каналов управления. Поскольку основное энергопитание СУМП



Рис. 2. Общий вид аппаратуры управления СУМП-М

осуществляется от трехфазного источника напряжения 380 В, а при его отключении (исчезновении) – от резервной аккумуляторной батареи напряжением 220 или 110 В, то в составе СУМП предусмотрено устройство автоматического включения резервного питания (ВРП). В результате в СУМП существуют общие для всех каналов шины приборного и силового питания, напряжение на которых сохраняется даже при отключении основного питания. Для питания различных внутренних потребителей СУМП небольшой мощности различными по форме напряжениями имеется общий преобразователь приборного питания (ПП). Питание датчика перемещения синусоидальным напряжением частотой 100 кГц осуществляется от общего генератора (Г).

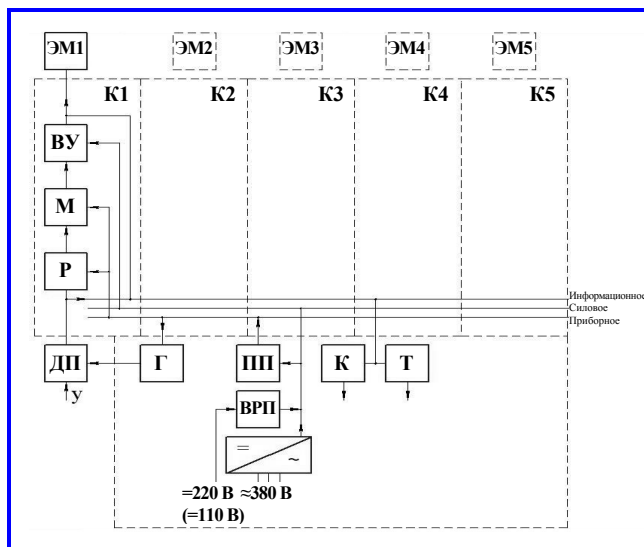


Рис. 3. Блок-схема СУМП



Рис. 4. Общий вид аппаратуры управления КТМ

Для оценки состояния СУМП, уровней токов в каналах, колебаний ротора по датчикам перемещений предусмотрен информационный обмен с общими устройствами контроля и телеметрии. В устройстве контроля в зависимости от величины отклонения ротора из центрального положения, измеряемой датчиком перемещения, вырабатываются сигналы для звукового предупреждения и аварийного отключения СУМП, свидетельствующие о неисправности.

Кроме того, для формирования и передачи на дисплей дежурному диспетчеру данных о величине колебаний ротора и о значениях токов в электромагнитах каналов управления, существующая информация преобразуется в устройстве телеметрии к стандартному виду, удовлетворяющему взаимно согласованным требованиям.

Представленное краткое описание состава аппаратуры СУМП в общем соответствует всем разновидностям этой аппаратуры, приведённым в табл. 1. Их объединяет единый подход к выбору схемотехнических решений и аппаратных средств для реализации в регуляторе требуемых алгоритмов управления. Для этих целей здесь применяется аналоговый способ обработки сигналов с использованием операционных усилителей. Вместе с тем, каждая разновидность аппаратуры СУМП может иметь некоторые схемотехнические отличия, которые не отражаются на общем составе и не вносят

принципиальных функциональных различий по сравнению с рассмотренными.

В последнее десятилетие, в связи с развитием и повышением быстродействия микроконтроллеров (МК) для управления ЭМП, стали широко применять цифровую аппаратуру. В ФГУП «НПП ВНИИЭМ» для управления ЭМП современных крупных ГПА разработана, изготавливается и поставляется цифровая аппаратура контроллера токов магнитов (КТМ), общий вид которой представлен на рис. 4. Технические параметры КТМ для сравнения с аналоговой аппаратурой СУМП приведены в общей табл. 1.

Представленная на рис. 5 блок-схема КТМ отличается от рассмотренной выше аналогичной схемы для аналоговой аппаратуры СУМП наличием общего для всех каналов управления регулятора МК-Р, выполняющего функции узлов регулятора и модулятора в аппаратуре СУМП. Вместо узлов контроля и телеметрии в КТМ используется отдельный микроконтроллер телеметрии (МК-Т), предназначенный для преобразования, отображения и передачи информационных данных по работе ЭМП в общую систему контроля ГПА.

Кроме того, с целью улучшения технических характеристик ЭМП (жесткости, демпфирующих свойств и т. д.) и повышения установленной управляющей мощности аппаратуры, в КТМ реализован ряд новых, по сравнению с аппаратурой СУМП, технических решений. К их числу следует отнести схемотехнические решения, учитывающие последние достижения в элементной базе и некоторые новые способы питания и преобразования сигналов ДП. Заслуживают внимания принятые меры по снижению помех, возникающих при импульсном управлении токами ЭМ.

В частности, максимальный ток электромагнитов за счёт применения в КТМ более мощных силовых транзисторных модулей вырос до 30 А, что привело к увеличению удельной управляющей мощности в ЭМП ГПА до 1,7 В·А/Н.

Остановимся на некоторых особенностях схемотехнических решений в КТМ, о которых упоминалось выше.

Для питания и преобразования сигналов ДП в КТМ, вместо традиционного источника питания с синусоидальным напряжением и фазочувствительным выпрямителем на выходе дифференциальной схемы включения ДП, используется источник питания (ИП) со специальной формой напряжения, имеющей в одном полупериоде плоскую вершину (кривая типа трапеции), а в другом – часть синусоиды. Такая форма напряжения позволяет прово-

дальше измерение сигнала на плоской части кривой, где величина напряжения во времени сохраняется неизменной, а уровень высокочастотных помех, возникающих на фронтах из-за переходных процессов, снижается в связи с плавным характером изменения питающего тока. Для преобразования выходного сигнала ДП в обычный аналоговый сигнал может быть применена в аппаратуре стандартная микросхема выборки-хранения (СВХ) сигнала, считываемого с плоской части кривой выходного сигнала напряжения ДП. На выходе этой схемы

обычно включают фильтр низкой частоты (ФНЧ) и согласующий усилитель (СУ). Таким образом, общую блок-схему устройства для питания и преобразования сигналов ДП, показанную на рис. 6 и применяемую в КТМ, можно представить в виде последовательного соединения перечисленных выше звеньев. Синхронизация частот напряжения питания ДП и импульсного управления токами ЭМ, применяемая в КТМ, создаёт благоприятные условия для снижения влияния высокочастотных помех в каналах управления ЭМП.

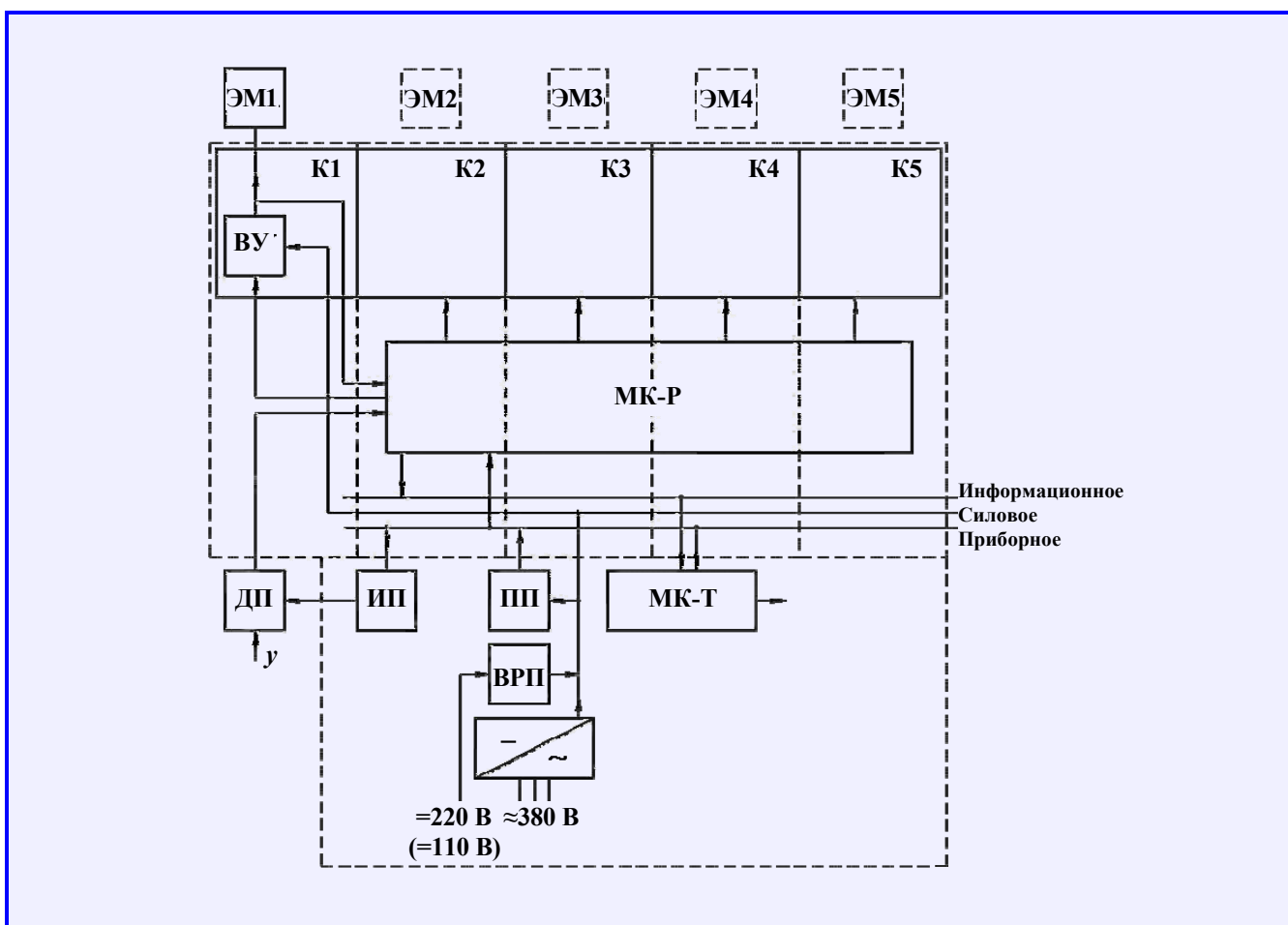


Рис. 5. Блок-схема КТМ

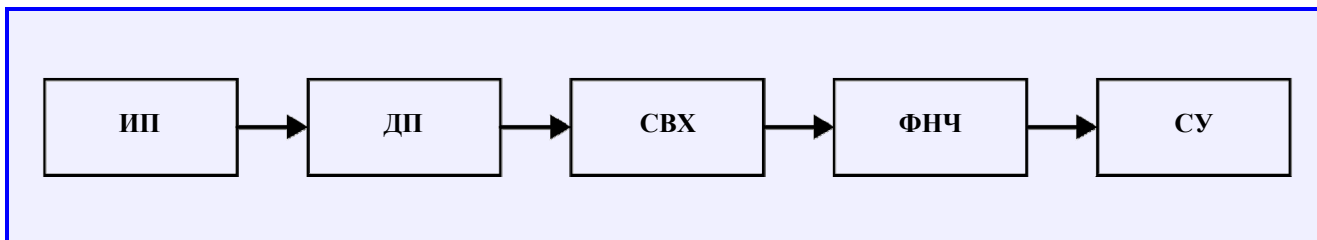


Рис. 6. Блок-схема устройства для питания и преобразования сигналов ДП

Вместе с тем, наиболее эффективным способом снижения общего уровня высокочастотных помех, создаваемых колебаниями напряжения питания обмоток ЭМ, возникающими на частоте импульсного управления токами, является применение в силовых выходных усилителях КТМ специальных активных LC-фильтров [4]. В отличие от общей схемы импульсного управления токами ЭМ, применяемой в СУМП, в упрощённой схеме силового моста ВУ КТМ, показанной на рис. 7, подключение обмотки ЭМ ($L_{эм}$) осуществляется параллельно к сглаживающему конденсатору C , а не в диагональ моста между ключами Q_1 и Q_2 , где подключен дроссель L_d . Управление ключами осуществляется так, что в открытом состоянии энергия накапливается в L_d , а в закрытом – отдается в конденсатор C и подключенный $L_{эм}$. Изменяя соотношение между продолжительностью включенного и выключенного состояния, можно регулировать величину напряжения на C и, соответственно, ток в $L_{эм}$. При таком управлении током в обмотке электромагнита высокочастотные колебания выходного напряжения моста, возникающие с частотой, соответствующей частоте переключения ключей Q_1 и Q_2 , локализуются внутри моста между элементами L_d и C и не попадают в длинный кабель, соединяющий обмотку электромагнита с аппаратурой управления.

Кроме того, в рассматриваемой схеме существует возможность увеличения управляющего напряжения на обмотке электромагнита и, соответственно, повышения его быстродействия за счёт эффективного использования свойств индуктивного накопления энергии в дросселе L_d . В сочетании с

импульсным высокочастотным управлением ключами Q_1 и Q_2 , при небольших значениях тока в обмотке $L_{эм}$, можно получить управляющее напряжение выше, чем напряжение источника питания $U_{пит}$. Это создаёт возможность улучшения динамических свойств ЭМП и делает предпочтительным применение цифровой аппаратуры КТМ в перспективных разработках ЭМП для ГПА.

Рассмотренные выше особенности аппаратуры КТМ тесно связаны с решением вопросов, возникающих при реализации требуемых законов управления ЭМП в выбранных типах МК.

В первую очередь, заслуживают внимания вопросы разработки программного обеспечения (ПО) для решения задач, связанных с управлением динамикой системы ЭМП в целом и отдельными элементами. В цифровом регуляторе (ЦР) КТМ, благодаря возможности адаптации ПО, могут быть реализованы более сложные, чем в аналоговых СУМП, законы управления, обеспечивающие специальные режимы автоматической балансировки, дополнительного демпфирования, фильтрации упругих колебаний ротора и т. п.

Вместе с тем, следует учитывать специфические особенности, которые возникают из-за дискретности цифрового управления в отличие от аналогового управления, используемого в традиционной аппаратуре СУМП. Причём оценка влияния этих факторов на динамику системы ЭМП может быть проведена путём соответствующей корректировки структуры управления расчётной математической модели системы ЭМП.

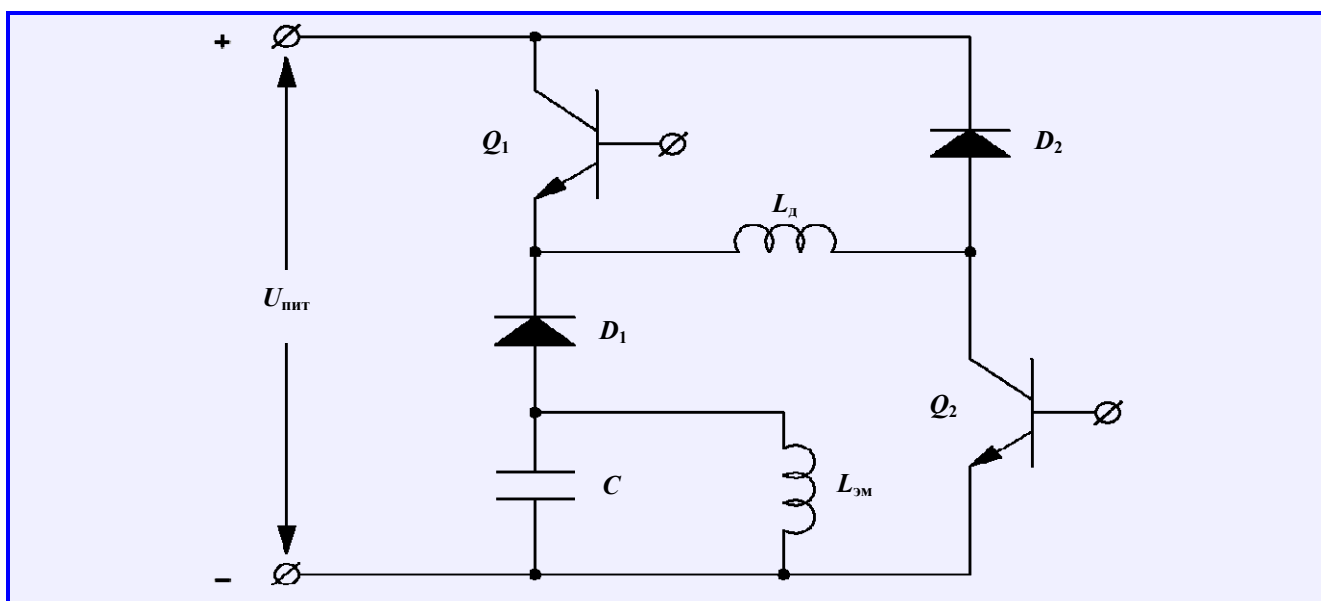


Рис. 7. Схема силового моста ВУ КТМ

Кроме основного применения в ЦР КТМ управления динамикой ЭМП, дискретная обработка сигналов широко используется для преобразования и анализа информации, которая существует для контроля и оценки работы ЭМП в составе ГПА. Широкие возможности оперативной обработки полученных результатов, сохранённых в записи, и объективный анализ позволяют обеспечить высокую эксплуатационную надёжность ГПА с ЭМП и прогнозировать работу без отказов. Вопросы разработки ПО для решения задач этого круга и выбор вычислительных средств для этих целей существенно отличается от задач ЦР и их следует рассматривать отдельно.

По результатам общей характеристики особенностей цифровой аппаратуры КТМ, предназначенной для управления ЭМП ГПА, можно определить круг научно-технических задач, решение которых может иметь существенное значение при разработке перспективных образцов КТМ и систем ЭМП ГПА в целом. Задачи целесообразно разделить на:

- анализ и синтез устройств питания и преобразования сигналов ДП;
- исследования и разработку мощного ВУ КТМ с низким уровнем помех и улучшенными динамическими свойствами;

– разработку ПО для управления ЭМП и для обработки информации КТМ.

Результат решения перечисленных задач планируется рассмотреть отдельно в последующих работах.

Для сопоставления существующих разработок цифровой аппаратуры управления ЭМП ГПА различных производителей рассмотрим некоторые данные, представленные в табл. 2. Здесь обобщены сведения, встречающиеся в различных публикациях по двум основным зарубежным фирмам WMB и S2M и по ФГУП «НПП ВНИИЭМ». Анализ этих данных показывает, что основные технические показатели отечественной цифровой аппаратуры НПП ВНИИЭМ близки к зарубежным образцам. В отечественной аппаратуре используются более совершенные способы обработки сигналов ДП, и приняты активные меры по снижению уровней помех в соединительных цепях ЭМП. В перспективе планируется дальнейшее усовершенствование систем управления ЭМП за счёт внедрения в аппаратуру управления более мощных импульсных ВУ и нового ПО, позволяющего реализовать высокоточные и адаптивные алгоритмы управления.

Таблица 2

Сравнение цифровой аппаратуры управления ЭМП ГПА

| Характеристика | WMB, Англия | S2M, Франция | ФГУП «НПП ВНИИЭМ», Россия |
|--|-----------------------------|---------------------|------------------------------|
| Тип | 600/50 | E300/30 | КТМ |
| Резервный источник питания, VDC | 220 Внешн. АКБ | Внутр. ист. питания | 220 Внешн. АКБ |
| Основной источник питания, VAC, 50 Гц | 230 1 фаза | 380 3 фазы | 380 3 фазы |
| Силовое питание усилителей, VDC | 600 | 300 | 220 |
| Максимальный ток усилителей, А | 50 | 30 | 30-50 |
| Тип фильтрации напряжения электромагнитов | Пассивный | Пассивный | Активный |
| Тип датчиков перемещений ротора (ДП) | Индуктивный Токовихревой | Индуктивный | Индуктивный Токовихревой |
| Частота питания ДП, кГц | 18 Синус | 20 Синус | 16 Плоская |
| Преобразование сигнала ДП | Аналоговое | Аналоговое | Дискретное |
| Номинальное потребление, кВт | 1,0 | 2,5 | 1,0 |
| Размеры аппаратуры, м | 2,0×1,5×0,5 | 1,8×1,4×0,6 | 1,8×0,6×0,6 |
| Масса аппаратуры, кг | 500 | 500 | 250 |

Относительно большая сложность и продолжительность пусконаладочных работ требует непосредственного участия специалистов поставщика ЭМП для проведения регулировки и взаимной подстройки электронной аппаратуры и электромеханических частей ЭМП при сборке их в составе ГПА. Выполнение этих работ особенно затруднительно в организационном плане при взаимодействии с зарубежными поставщиками ЭМП.

Это является основным фактором, сдерживающим широкое промышленное внедрение ЭМП в ГПА и другие машины.

Разработанная в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» технология обеспечения взаимозаменяемости аппаратуры управления без дополнительной подстройки, которая успешно применялась в аппаратуре гиродина, позволяет существенно уменьшить продолжительность пусконаладочных работ ЭМП в составе ГПА. Однако это оказывается возможным только в сочетании с повышением точности механической обработки деталей мест установки ЭМП в ГПА. Совместное решение этой комплексной задачи разработчиками ЭМП и разработчиками конструкции агрегата в целом может оказаться важным шагом в преодолении отмеченного ограничения, существующе-

го в настоящее время, на пути широкого применения ЭМП в различных областях техники.

Таким образом, решение затронутых в статье проблем может существенно повлиять на предпочтительное применение отечественных разработок ЭМП в ГПА для компрессорных станций, дожимных компрессорных станций газопроводов и газовых хранилищ ОАО «Газпром».

Литература

1. Магнитный подвес роторов электрических машин и механизмов. Труды ВНИИЭМ. – М.: ВНИИЭМ, 1989. – Т. 89. – 136 с.
2. Опыт наладки и эксплуатации агрегатов с магнитными подшипниками / Д.А. Кочетов, Е.В. Кравцова, Г.А. Жемчугов [и др.] // Конверсия в машиностроении – М., 1994. – № 4. – С. 23 – 29.
3. Особенности и опыт создания электромагнитных подшипников серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов / А.П. Сарычев // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 112. – №5. – С. 3 – 10.
4. Патент RU 2242646 С2 кл. 7 F 16 C 32/04. Магнитный подшипник / Д.М. Вейнберг, В.П. Верещагин, Е.М. Кузнецов [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП ВНИИЭМ». – Заявл. 27.12.2002; опубл. 20.12.2004, Бюл. № 3.

Поступила в редакцию 27.04.2010

Азим Седрединович Абдурагимов, аспирант, зам. начальника отдела, т. 366-31-88.

Владимир Петрович Верещагин, д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, т. 365-50-73.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.