

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМ ПУСКОВЫМ УСТРОЙСТВОМ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### Особенности построения и опыт применения

Канд. техн. наук Д.А. Красов, канд. техн. наук В.А. Кузьменко, Д.С. Мологин  
АО АНСАЛЬДО-ВЭИ (Москва)

В АО Ансальдо-ВЭИ разработана универсальная цифровая система управления преобразователями различного назначения, в том числе преобразователями частоты со звеном постоянного тока для тиристорных пусковых устройств (ТПУ). Система управления функционально и конструктивно разбита на четыре части:

● **вычислительный блок**, состоящий из одной платы с сигнальным процессором, графическим дисплеем и клавиатурой для взаимодействия с оператором; в этом блоке выполняются все функциональные преобразования входной информации и формируются сигналы управления исполнительными устройствами (тиристорами, выключателями, сигнализацией);

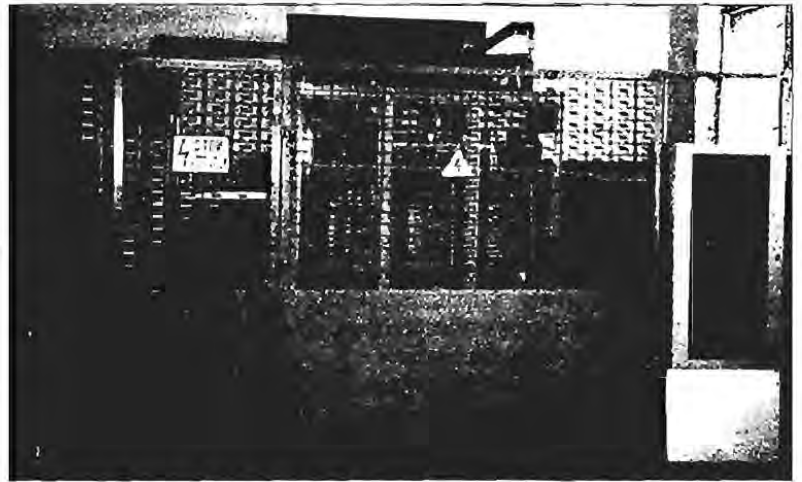
● **блок светового управления (БСУ)**; в этом блоке и ячейках управления тиристорами, расположенных в силовой схеме вентиля, реализуется алгоритм следящего управления тиристорами и контроль их исправности (обмен информацией между БСУ и ячейками управления осуществляется по световодам);

● **устройства сопряжения с объектом (УСО)** для преобразования входной и выходной информации вычислительного блока; в них осуществляется гальваническая развязка и нормировка сигналов обмена;

● **блок питания** обеспечивает гарантированным питанием все блоки и платы системы управления. Входное напряжение на блок питания поступает по двум фидерам от цепей переменного (~220 В) и постоянного (=220 В) тока объекта.

В качестве датчиков напряжения в системе управления могут быть использованы резистивные делители напряжения. При этом рядом с ними в силовой схеме следует размещать плату преобразования сигналов делителей (ППСД), которая преобразует сигналы в цифровую форму и передает их по оптоволоконным каналам в вычислительный блок.

В одном из докладов на VI симпозиуме «Электротехника 2010 год» [1] было подробно рассмотрено взаимодействие системы управления с преобразователем частоты на примере пускового устройства для синхронных двигателей, введенного в работу на компрессорной станции завода КЗТШ в г. Жодино (Беларусь). Там же были отмечены основные возможности цифровой системы по регулированию, защите, автоматике



Тиристорное пусковое устройство на компрессорной станции КЗТШ в г. Жодино (Беларусь)

управления преобразователем, а также предоставляемые системой функции контроля, диагностики, цифрового осциллографирования, изменения параметров настройки и т.п.

Структурная схема системы управления тиристорным пусковым устройством, предназначенным для плавного пуска пяти синхронных двигателей, приведена на рис. 1.

Система управления включает следующие модули:

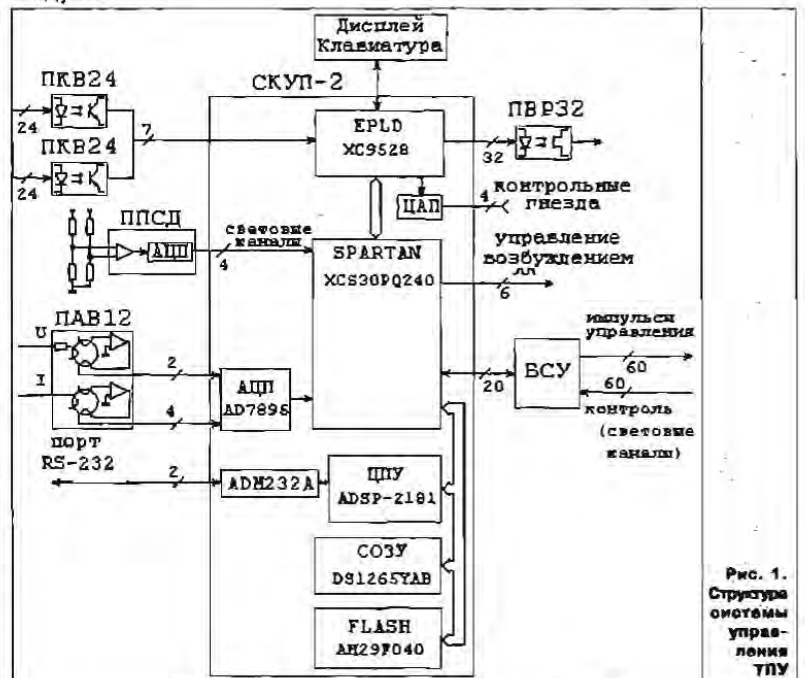


Рис. 1. Структура системы управления ТПУ



- плата приема входных аналоговых сигналов (ПАВ12) на четыре токовых сигнала и два сигнала напряжения;
- две платы приема контактных сигналов (ПКВ24) на 24 входа каждая с уплотненными выходными каналами (два канала данных и пять каналов адреса);
- плата выходных реле на 32 сигнала (ПВР32);
- специализированный контроллер управления преобразователями (СКУП-2) – центральная процессорная плата;
- плата преобразования сигналов делителей (ППСД) со световыми выходами.

Конструктивно система управления выполнена в одном шкафу (рис. 2): в верхней части шкафа установлен БСУ, ниже – вычислительный блок, еще ниже – фальшпанель. В нижней части шкафа расположен блок питания.

Устройство силовой части преобразователя подробно рассмотрено в статье [2].

**Особенности системы** рассмотрим на примере управления частотным пуском синхронного двигателя. Основные отличия данной системы от известных:

- синхронизация работы инвертора и двигателя без использования датчика положения ротора с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ);
- применение двухступенчатых резистивных делителей напряжения на инверторе;
- использование ФАПЧ для синхронизации двигателя с сетью;
- оригинальное построение системы фазоимпульсного преобразования (ФИП);
- специальное управление сетевым выключателем двигателя при его переключении на сеть;

- использование встроенного цифрового осциллографа для оптимизации процессов пуска двигателя.

Важнейшей задачей при пуске двигателя является отслеживание фазы и частоты собственного напряжения двигателя для правильного управления преобразователем, как в прерывистом, так и в непрерывном режиме его работы. В рассматриваемой системе управления для этого используются фаза и частота системы ФАПЧ, работающей по сигналам от делителей напряжения, подключенных к статору двигателя. Сигналы с делителей попадают в вычислительный блок через ППСД. Для получения приемлемого уровня сигналов двух линейных напряжений, как при малых, так и при больших частотах вращения двигателя, в состав ППСД включены четыре масштабированных усилителя, предварительные аналоговые фильтры с разной частотой среза для каналов с разными коэффициентами передачи, четыре аналого-цифровых преобразователя (АЦП) и преобразователи электрических сигналов в световые.

При отсутствии датчика положения ротора на синхронном двигателе система управления определяет начальное положение ротора по реакции статора на скачок тока возбуждения. При разгоне (вплоть до подключения двигателя к сети) положение ротора оценивается по напряжениям, формируемым системой ФАПЧ. Постоянные времени ФАПЧ выбраны так, чтобы обеспечивалась достаточная точность воспроизведения фазы и частоты напряжения на статоре двигателя в диапазоне частот разгоняемого двигателя от 0,5 до 50 Гц и выше.

В системе управления реализовано два алгоритма ФАПЧ: по напряжениям выпрямителя и инвертора (статора двигателя). Регулируя силу тока статора и возбуждения двигателя, удается добиться совпадения частот и фаз ФАПЧ инвертора и ФАПЧ выпрямителя с погрешностью, не превышающей нескольких долей процента, без использования специального синхронизатора. Переключение на сеть осуществляется на «выбеге» двигателя (со снятым током ТПУ) при отклонении частоты и фазы напряжения двигателя от аналогичных параметров напряжения сети не более 0,3%. Отметим, что подача энергии от преобразователя к двигателю прекращается не в момент подачи команды на включение сетевого выключателя двигателя, а за 3-4 периода частоты сети до замыкания силовых контактов выключателя, т.е. учитывается время работы выключателя (примерно 13 периодов для масляного выключателя). Это позволяет уменьшить «набег» разности фаз двигателя и сети от момента отключения преобразователя до момента замыкания контактов сетевого выключателя.

Важная особенность системы состоит в том, что в ней применен программно-аппаратный способ формирования функции фазоимпульсного преобразования. Программа заранее вычисляет фазу и требуемый угол управления, а само фор-



Рис. 2. Шкаф системы управления

мирование импульса в нужный момент времени осуществляется аппаратным способом в логической матрице. Это позволяет выдавать импульсы управления с большой точностью без использования ресурсов процессора.

Сила тока возбуждения двигателя во время его разгона регулируется с помощью системы управления преобразователем через дополнительную плату, устанавливаемую непосредственно в возбудитель каждого двигателя. Передача уставки тока возбуждения от вычислительного блока в эту плату осуществляется по частотному каналу. После переключения на сеть система возбуждения переходит в штатный режим работы, и дополнительная плата отключается.

Для ускорения наладки системы и оптимизации процессов пуска двигателей с разными характеристиками на одном объекте в системе используется программный осциллограф на 16 внутренних сигналов по выбору более чем из 150, рассчитанный на 8 с работы при интервале дискретизации 277 мкс. Предусмотрено уменьшение частоты дискретизации процесса с соответствующим увеличением длительности записи осциллограмм вплоть до времени всего пускового режима. Цифровое осциллографирование, предусмотренное в программном обеспечении системы, существенно облегчает поиск ошибок монтажа и отказов оборудования при наладке. Аварийные процессы в преобразователе и объекте управления автоматически фиксируются системой управления в виде цифровых осциллограмм, которые могут быть выведены на экран персонального компьютера.

Следует отметить расширенные сервисные функции рассматриваемой системы управления. Через меню встроенного дисплея можно менять параметры пускового режима, уставки защит, выводить на дисплей значения силы тока, напряже-

ния и частоты вращения двигателя и т.п. На дисплее можно просмотреть ведущийся в системе протокол, отражающий последовательность различных операций (успешные и неуспешные пуски, срабатывание защит, неисправности датчиков и другого оборудования и т.п.). Время каждого события отображается с точностью до долей миллисекунды. Для контроля процессов с помощью обычного электронного осциллографа на лицевой панели системы управления предусмотрены четыре контрольных гнезда. На них выведены выходы цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), на которые через меню можно выдать одновременно любые четыре сигнала системы управления, включая внутренние.

Тиристорное пусковое устройство с описанной цифровой системой управления введено в эксплуатацию в конце 2001 г. на компрессорной станции завода КЗТШ. Пусковое устройство используется для разгона синхронных двигателей трех компрессоров различной мощности. Наладка пускового устройства и отработка режимов пуска двигателя первого компрессора была проведена за неделю, наладка и настройка пусковых режимов второго и третьего компрессоров – за 2 дня.

Работу ТПУ во время разгона двигателя можно условно разделить на несколько этапов: определение положения ротора, режим прерывистых токов, режим непрерывных токов, синхронизация двигателя с сетью, переключение на сеть. Во время наладки ТПУ на КЗТШ были сняты характерные осциллограммы работы устройства.

На рис. 3 показаны осциллограммы измеренных нормализованных ( $I_a$ ,  $I_c$ ) и вычисленных ( $I_b$ ) токов фаз инвертора в режиме прерывистых токов (режим искусственной коммутации), т.е. на начальном этапе разгона двигателя. Сила тока  $I_b$  в фазе В вычисляется в системе как сумма сил то-

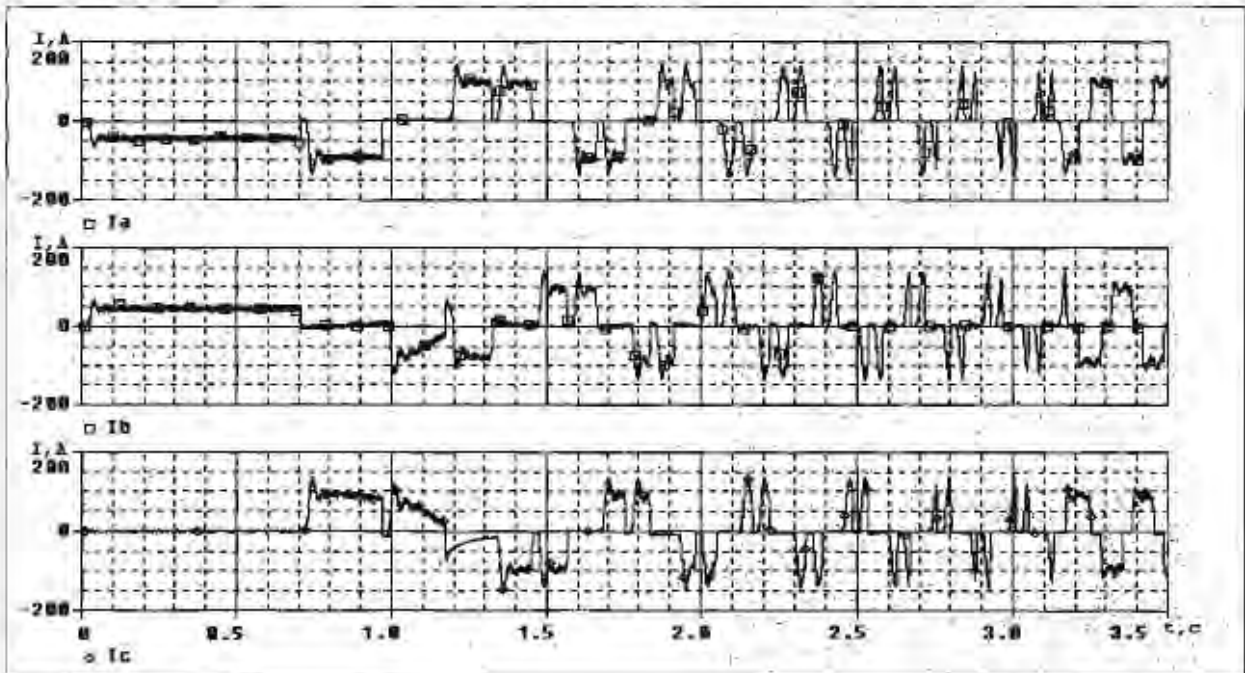


Рис. 3.  
Фазные токи инвертора в режиме прерывистых токов ТПУ

АО Ансальдо-ВЭИ

Россия, 111250, Москва, Косыгина/Григорьевская, 12

Тел./факс: (095) 361 9163, 361 9056, 273 4391

E-mail: avei@online.ru

http://www.avei.do.ru

# ANSALDO-VEI

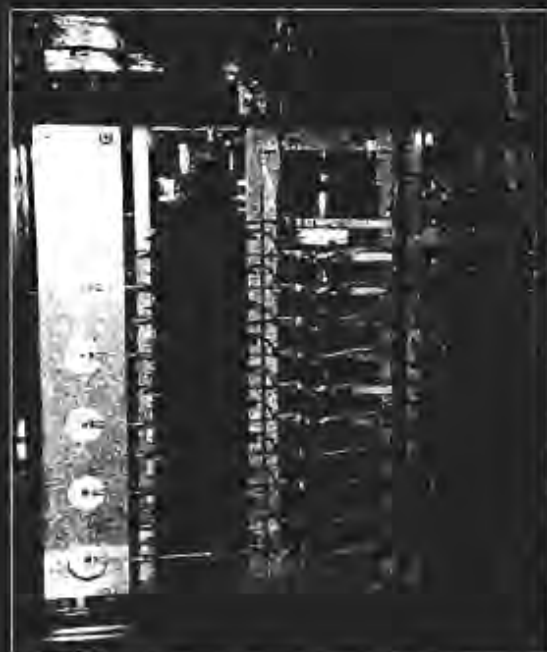
Частотный регулируемый привод  
для асинхронных и синхронных  
электродвигателей

Пусковые и пускоостановочные  
устройства электродвигателей

Статические тиристорные компенсаторы

Высоковольтные тиристорные вентили  
для передач и вставок постоянного тока

Специальные источники питания



ков в фазах А и С с обратным знаком (учитывается, что сумма токов равна 0). В этом режиме реальные токи в фазах прямоугольные, но на осциллограмме они искажены, так как это вторичные токи трансформаторов тока инвертора, насыщающиеся при низкой частоте переключения фаз. Скачки силы тока на фронтах вызваны работой регулятора тока выпрямителя и токами заряда демпфирующих цепей выходящего из работы вентиля преобразователя.

На осциллограмме видно увеличение частоты переключения фаз инвертора, связанное с увеличением частоты вращения двигателя, и переход в так называемый режим непрерывных токов, при котором коммутация тиристоров происходит под воздействием ЭДС статора двигателя. Для обеспечения минимальных ударных нагрузок на редуктор компрессора система управления имеет три различных уставки по току преобразователя: для первого блока тока (на осциллограмме, он – наименьший), для режима прерывистых токов и для режима непрерывных токов.

На рис. 4 показаны осциллограммы измеренных нормализованных ( $I_a$ ,  $I_c$ ) и вычисленных ( $I_b$ ) токов фаз выпрямителя в прерывистом режиме. При выдаче очередного блока тока имеет место кратковременное (до 20 мс) превышение силы тока над уставкой, вызванное заданным режимом работы контура регулирования выпрямленного тока преобразователя. В начале блока тока угол отпирания тиристоров выпрямителя устанавливается равным  $60^\circ$ , и только после первых импульсов управления начинает работать контур регулирования. Такой алгоритм работы регулятора тока в прерывистом режиме вызван требованием быстрого нарастания тока по проводящей цепочке: сеть – вентили выпрямителя – реактор в цепи постоянного тока преобразователя – вентили инвертора – обмотки статора двигателя и связан с управлением тиристорами узкими импульсами. В конце каждого блока тока в прерывистом режиме выпрямитель переводится в инверторный режим, и выпрямленный ток прекращается (см. рис. 4).

Работа системы ФАПЧ заслуживает особого внимания. На рис. 5 показаны осциллограммы напряжения фазы АВ инвертора, вырабатываемого системой ФАПЧ ( $V_{ab2}$ ), и реального напряжения на статоре ( $V_{ab1}$ ) на начальном этапе разгона двигателя. Правильное определение текущей фазы напряжения обмоток статора крайне важно для работы преобразователя. Во-первых, для правильной работы фазоимпульсного преобразования, во-вторых, для правильной синхронизации двигателя с сетью перед их коммутацией. Звездочка на осциллограмме соответствует моменту переключения каналов ППСД с разными коэффициентами передачи. Канал напряжений для малых частот вращения двигателя имеет коэффициент передачи в 3 раза больше, чем канал напряжений для высоких частот вращения. При этом сигнал с канала напряжений для высоких оборотов по масштабу соответствует реальному напряжению статора. Символ \* соответствует моменту перехода ТПУ в режим непрерывных токов. На осциллограмме видно хорошее совпадение напряжений, вырабатываемых ФАПЧ, с реальным напряжением статора двигателя, начиная с момента начала движения ротора.

Осциллограммы на рис. 6 отражают процесс переключения двигателя на сеть.

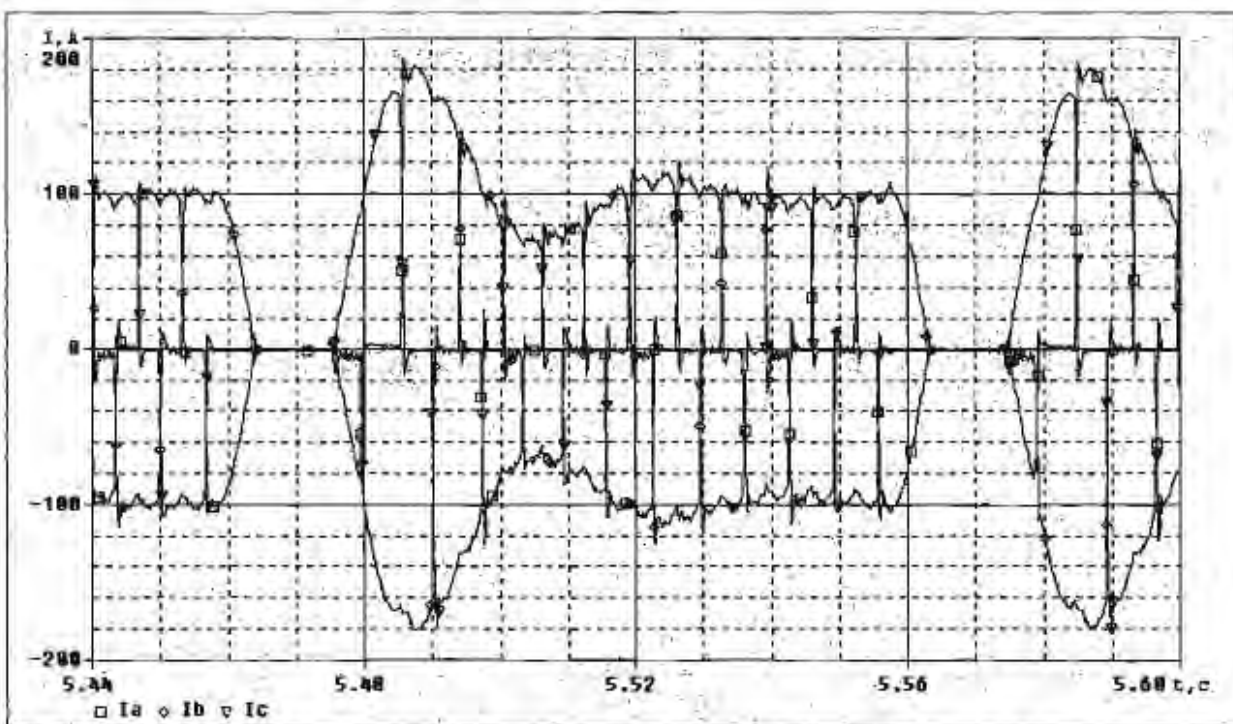


Рис. 4. Фазные токи выпрямителя в режиме прерывистых токов ТПУ

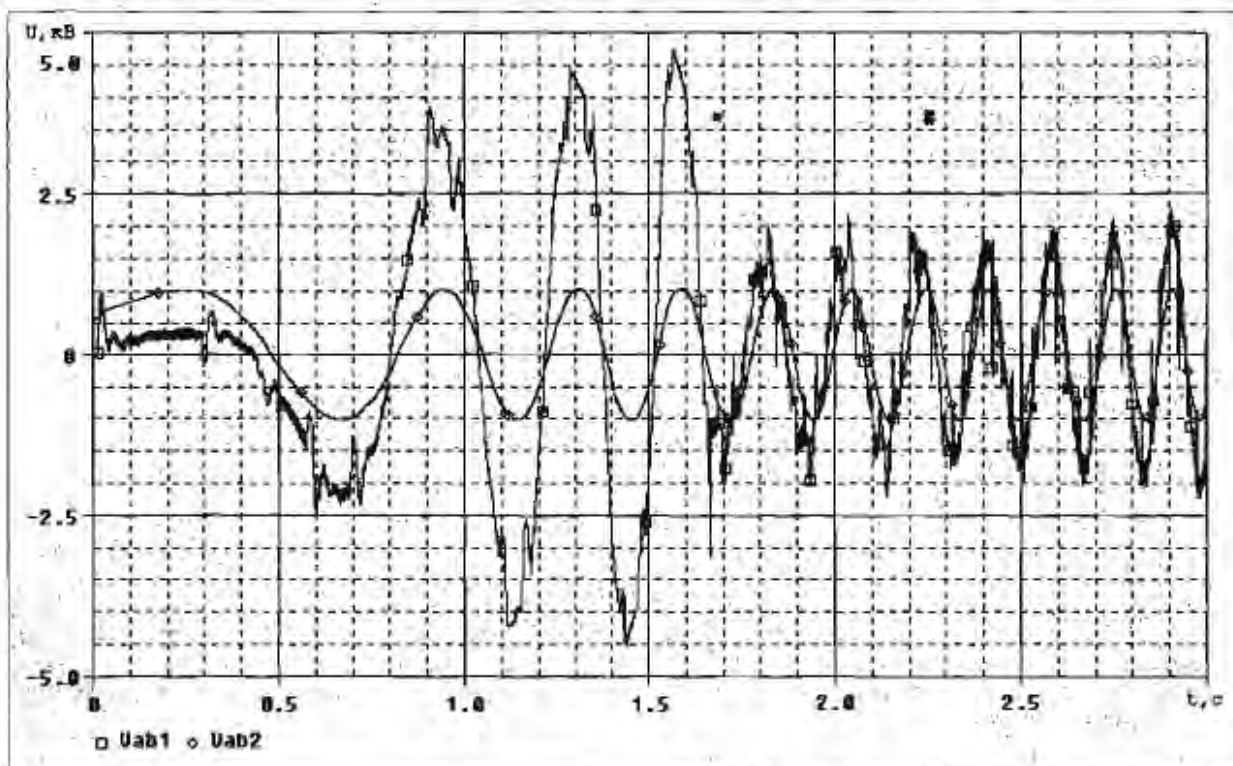


Рис. 5. Подстройка системы фазовой автоподстройки частоты к напряжению статорных обмоток двигателя на начальном этапе пуска

Сверху вниз выведены цифровые сигналы:

- флаг синхронизации – «Сеть и двигатель синхронизированы»;
- команда на включение рабочего выключателя – «Включить рабочий выключатель»;
- команда ПИР – «Перевод выпрямителя в инверторный режим»;
- сигнал, отражающий положение блок-контакт рабочего выключателя – «Выключатель включен».

Кроме того, на рис. 6 дана осциллограмма выпрям-

ленного тока ( $I_d$ ), рассчитанного по токам фаз выпрямителя.

После разгона двигателя до частоты вращения  $50 \text{ с}^{-1}$  включается программа режима синхронизации, которая увеличивает частоту вращения двигателя до  $50,1 \text{ с}^{-1}$ . При совпадении фаз двигателя и сети с погрешностью, не превышающей  $0,3 \%$ , вырабатывается сигнал «Сеть и двигатель синхронизированы», выдается команда на



Рис. 6. Осциллограмма процессов подключения двигателя к сети

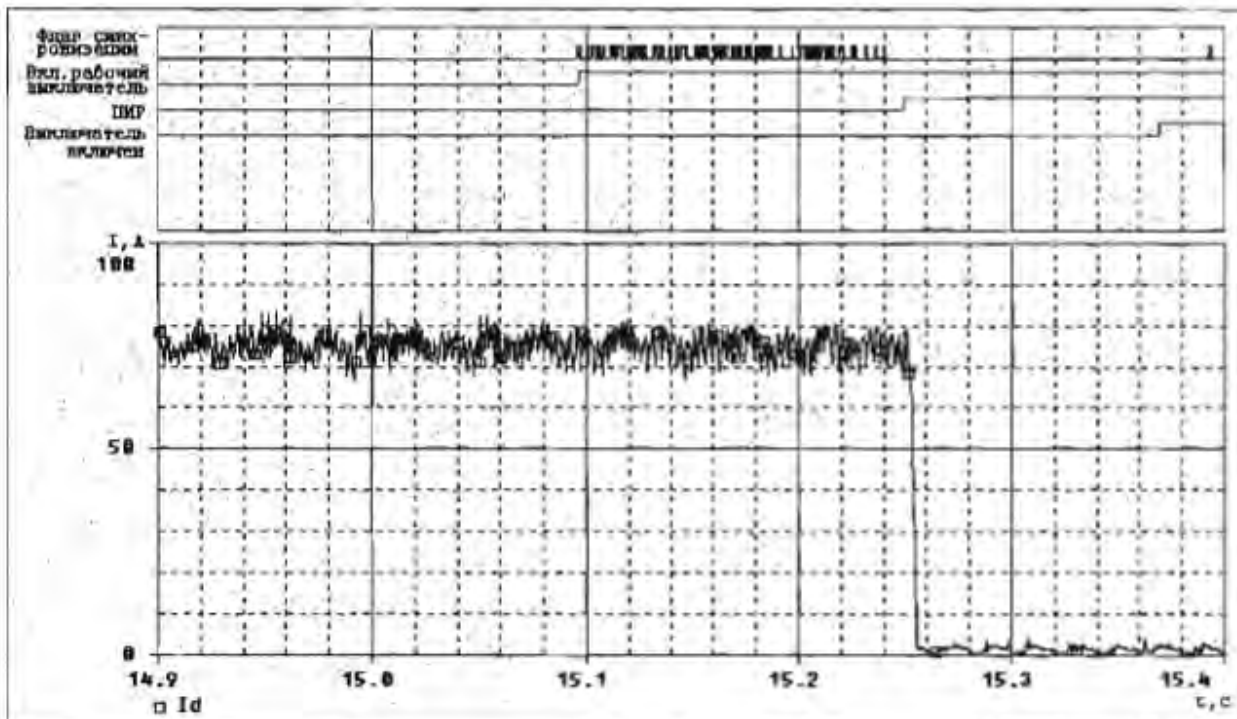
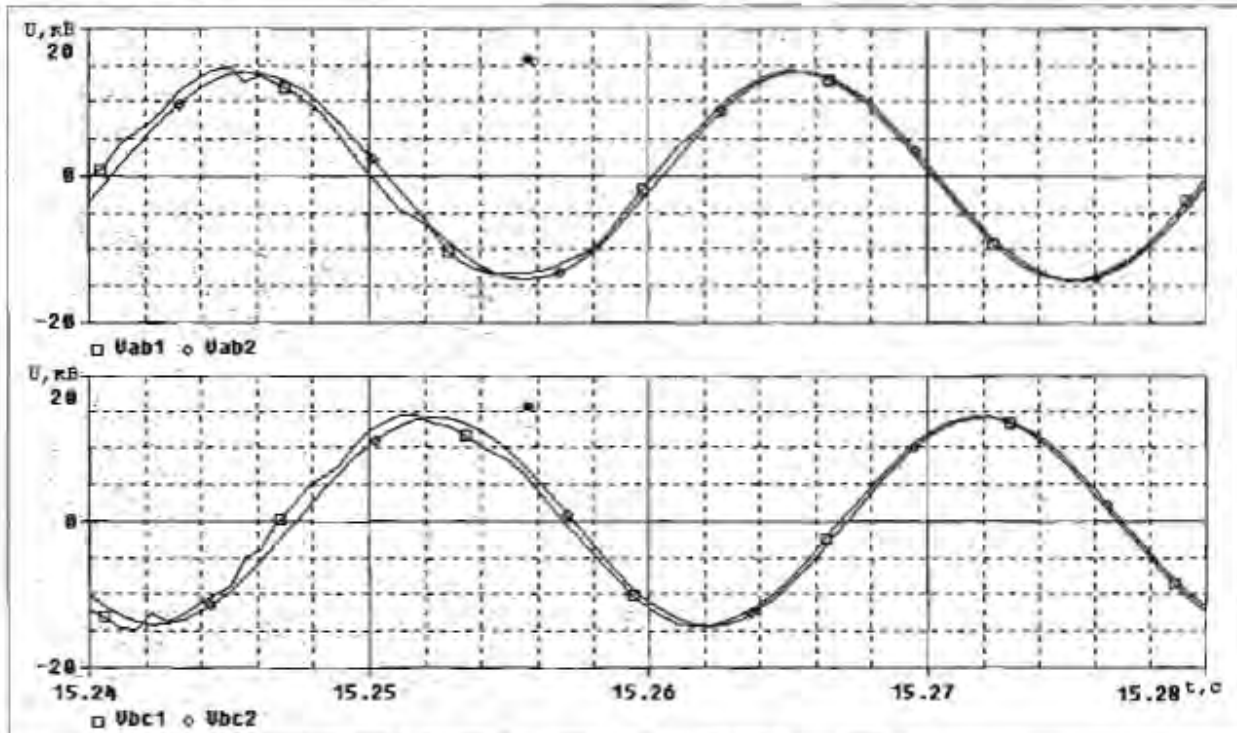


Рис. 7. Напряжения статорных обмоток двигателя и сети при включении сетевого выключателя



включение рабочего выключателя. Через несколько периодов (возможна установка времени ожидания для каждого выключателя отдельно) на систему управления преобразователем выпрямителя выдается сигнал ПИР, и сила выпрямленного тока снижается до нуля. Затем через 2-3 периода происходит замыкание силовых контактов рабочего выключателя (сеть-двигатель). Примерно в это же время приходит сигнал от блока контактов рабочего выключателя, который показан на рисунке.

На рис. 7 в увеличенном масштабе показаны осциллограммы напряжений фаз АВ и ВС статора двигателя ( $U_{ab1}$ ,  $U_{bc1}$ ) и сети ( $U_{ab2}$ ,  $U_{bc2}$ ) в момент включения силовых контактов выключателя. На осциллограмме напряжения инвертора до момента замыкания силовых контактов выключателя видны искажения, вызываемые коммутациями вентилей в преобразователе. Небольшое несовпадение фаз выпрямителя и инвертора после замыкания контактов выключателя вызвано наличием аппаратных и программных флигров в

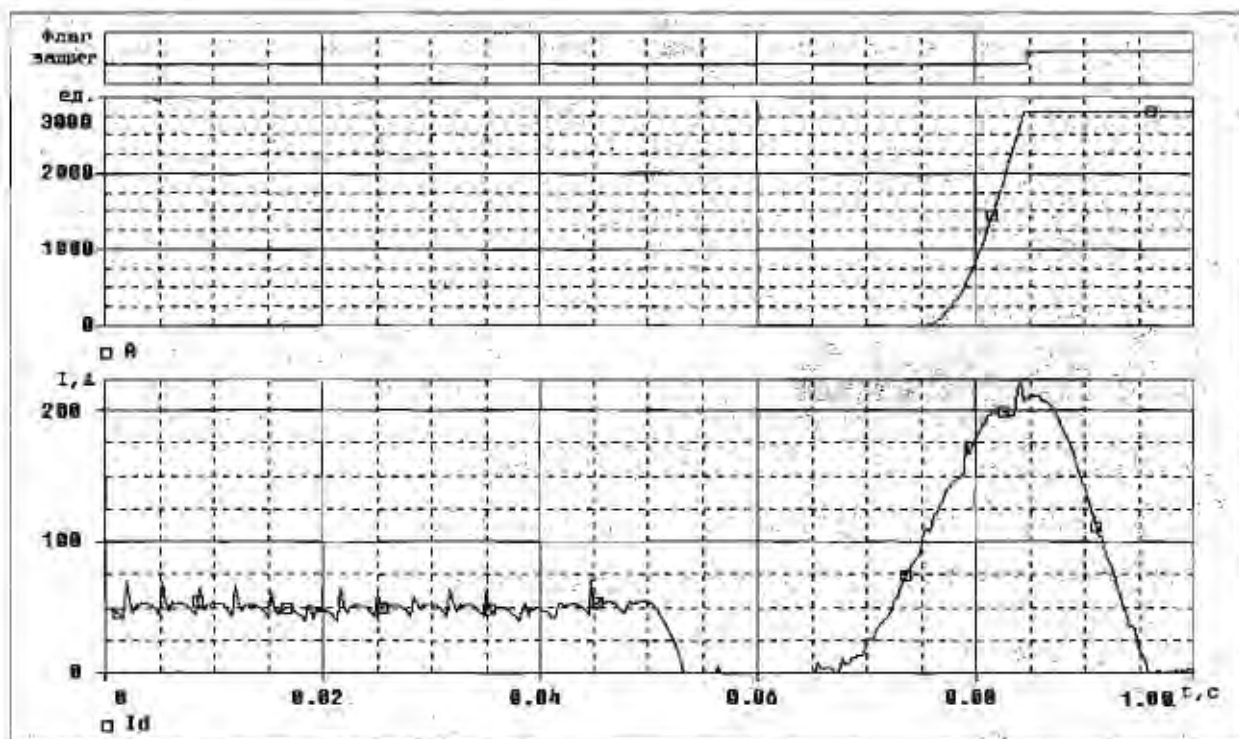


Рис. 8. Работа максимальной токовой защиты

трактах обработки этих сигналов, что учтено в программе синхронизации.

В верхней части осциллограммы показаны напряжения инвертора и выпрямителя фазы АВ, в нижней части фазы ВС. Звездочкой помечен момент замыкания.

Согласно осциллограммам при включении на сеть не происходит какого-либо значительного колебания фазы или скачка напряжения, что является хорошим показателем работы системы управления.

**Аварийный режим работы ТПУ.** Важным показателем работы системы управления является вывод преобразователя из работы по сигналам срабатывания защит. Для исключения ложных срабатываний от помех все защиты выполнены по принципу накопления отклонений реальных значений параметров от уставок. Перед отключением выключателей преобразователь выпрямительного моста ТПУ переводится в инверторный режим, чтобы сбросить до нуля силу тока в индуктивных элементах силовой схемы и избежать перенапряжений. На рис. 8 приведен пример осциллограмм отражающих работу максимальной токовой защиты в режиме прерывистых токов, когда уставка выпрямленного тока ( $I_d$ ) для очередного блока была увеличена до 200 А, в то время как уставка максимально допустимой силы тока была установлена в 100 А. С момента превышения выпрямленным током уставки защиты, накопитель защиты (А) начинает интегрировать превышение до тех пор, пока не достигнет уставки срабатывания. Тогда выставляется флаг срабатывания защиты (флаг защит).

**Выводы.**

⇒ Частотный пуск синхронного двигателя и его синхронизация с сетью выполнены без ис-

пользования датчика положения ротора.

⇒ Опыт наладки и эксплуатации показал успешность использования резистивных делителей и платы ППСД для получения сигналов напряжений инвертора. В следующих разработках предполагается установить делитель напряжения и плату ППСД на выпрямитель, дополнив обе платы ППСД каналами токов фаз с передачей этих сигналов в вычислительный блок также по световым каналам. Это обеспечит полную гальваническую развязку системы управления от датчиков тока и напряжения преобразователя.

⇒ Подтверждена пригодность синхронизации процессов управления преобразователем на основе системы фазовой автоподстройки частоты для режимов пуска синхронных двигателей с изменяющейся частотой напряжения статора и режима переключения двигателя на сеть.

⇒ Широкий набор сервисных функций цифровой системы управления позволяет легко адаптировать систему к реальному объекту и существенно сократить время, требуемое для пуско-наладочных работ. Возможно дальнейшее развитие программного обеспечения с целью определения некоторых параметров объекта и подстройки внутренних переменных системы.

⇒ Так как все задачи по обработке входной информации, реализации алгоритмов управления, регулирования и защиты преобразователя, задачи контроля и диагностики оборудования, вывода любой информации на встроенный дисплей решаются на программном уровне в центральной процессорной плате, построенной на современных электронных компонентах, то такая система пригодна для управления широким классом преобразователей. В частности аналогичная система успешно эксплуатируется на Мол-



давском металлургическом заводе (г. Рыбница, ПМР) в качестве системы управления статическим тиристорным компенсатором на 35 кВ.

**Список литературы**

1. Добкин И.Д., Таратута И.П., Чуприков В.С. Тиристорное пусковое устройство для синхронных двигателей 3150

кВт 10 кВ // Сборник докладов VI симпозиума «Электротехника 2010 год». Т III. Москва, ВЭИ, ТРАВЭК. 2001. октябрь. С. 44-48.

2. Таратута И.П., Чуприков В.С. Схемотехнические и конструктивные решения преобразователей частоты для регулируемого электропривода // Электротехника. 2001. № 9. С. 62-65.



ОАО «Владимирский электромоторный завод»  
 Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электрозаводская, 5  
 Телефон: (0922) 27-94-57, факс: 27-94-37  
 www.vemp.ru E-mail smis@vemp.ru

## МАЛОШУМНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ПАССАЖИРСКИХ ЛИФТОВ Особенности проектирования

Канд. техн. наук **В.И. Афонин**  
 ОАО «Владимирский электромоторный завод»

При проектировании двигателей пассажирских лифтов большую роль играет оценка производимого ими шума. В этом нет ничего удивительного, так как большинство лифтов установлено в жилых и административных зданиях, где любое шумообразование должно быть сведено к минимуму [6].

Вибрация и шум, создаваемые вращающимися электрическими машинами, в том числе лифтовыми двигателями, могут быть вызваны различными причинами, зависящими от геометрии составных частей машины, магнитных и токовых нагрузок, конструкции оболочки, вентиляционных и подшипниковых узлов, технологии, точности обработки деталей, качества сборки и т.д. В электрических машинах и, в частности лифтовых, шумы обусловлены совокупностью многих факторов [2-4,7].

В лифтовом двигателе несколько источников шумообразования (рис. 1): а – электромагнитный; б – механический; в – аэродинамический.

Электромагнитный шум – результат действия вибровозмущающих магнитных сил, вызванных переменным магнитным полем в воздушном зазоре, распределением обмоток по пазам, магнитным использованием статора и ротора, насыщением и эксцентричным расположением ротора в расточке статора. Эти магнитные силы, во-первых, деформируют стальной пакет статора, вызывая тем са-

мым в окружающем воздухе звуковые колебания; во-вторых, создают колебательные моменты, а следовательно, и корпусный шум.

Уровень электромагнитного шума зависит не только от амплитуды и частоты силовых волн, но и от частоты собственных колебаний стальных пакетов. Поскольку при совпадении порядкового числа силовой волны с порядковым числом собственных колебаний возникает резонанс, большее шумообразование возможно и при меньшем возбуждении.

Механические источники шумообразования – это подшипники и неуравновешенный ротор.

Шум подшипников качения возникает в процессе обкатки тел качения и в результате колебаний тел качения и ротора типа беличьей клетки. Эти колебания образуют сначала корпусный шум, который передается прочим частям двигателя, а затем превращается в слышимый шум подшипников. Уровень такого шума практически невозможно рассчитать по формулам – большей частью его определяют экспериментально.

Аэродинамическим источником шумообразования является прежде всего вентилятор, с помощью которого создается поток охлаждающего воздуха, поступающего непосредственно внутрь корпуса двигателя для отвода теплоты от его активных частей. При этом образуются воздушные шумы, которые часто определяют общий уровень шума двигателя.

В двигателях с числом включений в час до 150 таким источником являются лопатки ротора. При большем числе включений для улучшения отвода теплоты применяют независимую вентиляцию. Воздушное шумообразование в подобных двигателях зависит от конструкции и производительности вентиляторов-наездников. При окружных скоростях наружных кромок лопаток вентилятора более 15 м/с он может быть определяющим. Основные

© В.И. Афонин, 2002

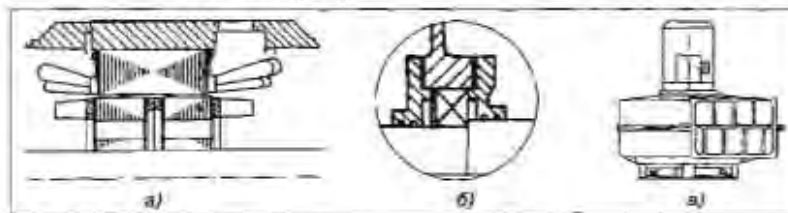


Рис. 1. Источники шумообразования лифтового двигателя