

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Д.Н. Бондаренко, С.В. Дзалиев, Ф.В. Чмиленко

Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет,
Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

ABSTRACTS

In this article the problem of automation of induction heating installations (IHI) with power transistor generator is discussed. Traditional and novel control tasks and algorithms of automatized technological installations (IHI) in autonomous mode and integrated in workshop process control system (PCS) are analysed. Prospective decisions in different levels interface organization offer. There are endogenous (in-system), integral, human machine (HMI).

ВВЕДЕНИЕ

Современный транзисторный генератор является неотъемлемым элементом установки индукционного нагрева (УИН) на повышенных высоких частотах и представляет собой сплав силовой электроники, разнообразных узлов управления, выполненных на быстродействующих аналоговых и цифровых компонентах, объединенных в единую систему микроконтроллерами, технологией распределенных систем управления и человеко-машинного интерфейса.

КОНТУРЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ УИН

В приведенной на рис.1 схеме в верхнем ряду представлены основные силовые узлы УИН, в нижнем – узлы управления и связи между ними. Активный выпрямитель (АВ), фильтры (Ф), широтно-импульсный преобразователь (ШИП), транзисторный инвертор (И) и устройство согласования (УС) образуют систему питания индукционного нагревателя (ИН). Электропривод (ЭП) находит применение в узлах загрузки/выгрузки, нередко – для организации поступательного или возвратно-поступательного движения заготовки в нескольких индукторах для обеспечения требуемого распределения температуры.

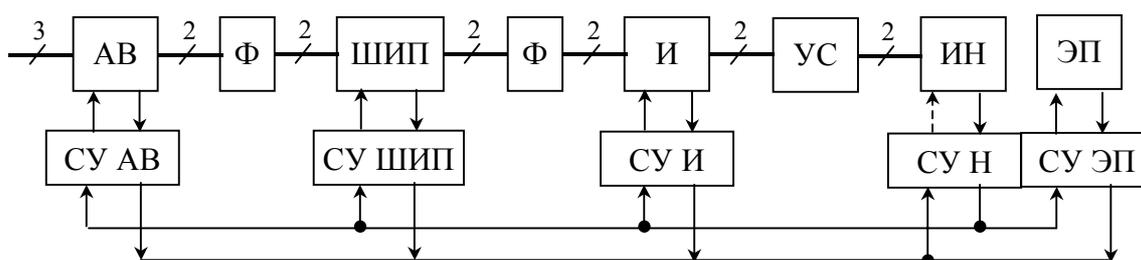


Рис. 1. Обобщенная структура технологической установки индукционного нагрева

Система управления нагревом (СУ Н) выполняет роль ведущей среди узлов управления. Она определяет задание для узлов управления системы питания и электропривода по заданной программе или по показаниям датчиков температуры и текущему заданию. Система управления электроприводом (СУЭП) кроме системы возбуждения регулируемого транзисторного преобразователя включает датчики положения/перемещения нагреваемых заготовок.

Среди устройств силовой электроники источника питания наиболее важными и сложными в управлении являются активный выпрямитель, обеспечивающий снижение влияния нелинейности преобразователя (как нагрузки) на питающую сеть и транзисторный инвертор, обеспечивающий требуемую частоту тока в нагрузке, как

правило, выполненный по схеме инвертора напряжения или инвертора тока. Нередко к ним добавляется широтно-импульсный преобразователь для регулирования потока энергии, поставляемой от выпрямителя к инвертору. Блок согласования, как правило, не содержит управляемых элементов, иногда используются силовые контакторы для подстройки компенсирующей емкости или витков трансформатора, выполняющие переключения в паузах протекания тока.

Требования к системе питания в УИН:

1. Способность энергетически эффективно работать на индукционную нагрузку в заданном диапазоне частот с широким диапазоном вариации параметров (L и R) как в ходе одного технологического процесса, так и при смене нагреваемого изделия и индукционной системы.

2. Возможность глубокого регулирования выходной мощности с выбором закона (стабилизация или по программе) и параметра регулирования (мощность, ток, напряжение).

Нерегулируемый выпрямитель на диодах и, особенно, регулируемый на тиристорах имеют нежелательный гармонический состав тока потребляемого от сети, что резко снижает конкурентоспособность преобразователя в целом на западном, а со временем – и на отечественном рынке.

Алгоритмы управления мощными (трехфазными) активными выпрямителями находятся в стадии активного развития [4], как в плане гармонического состава потребляемого тока, так и по пути оптимизации числа и вариантов размещения датчиков обратной связи. Для снижения габаритов фильтров ВЧ-гармоник (20...200 кГц) на входе выпрямителя используют непрерывный режим работы. Вариации в управлении ВЧ- ключами сводятся к выбору компромисса между способами с постоянной частотой управления и самовозбуждения по критериям сложности реализации и минимизации мощности потерь в силовых вентилях. Для упрощенных алгоритмов управления существуют готовые специализированные микросхемы управления - Infineon TDA4862, Motorola MC33261/2, MC34167, MC33167, Thomson L6560 [8]. Более сложные и эффективные алгоритмы требуют применения программируемых контроллеров и цифровых сигнальных процессоров [6].

Важно отметить, что АВ позволяют регулировать выходное напряжение в некоторых пределах (20...40 %), что можно использовать непосредственно или для стабилизации выпрямленного напряжения Ud.

Способы регулирования мощности на выходе транзисторного преобразователя:

1. Частотное согласующее регулирование инвертора, работающего на высокочастотный резонансный контур.

2. Фазовое регулирование в инверторе путем задержки импульсов управления одного плеча, по отношению к другому.

3. Регулирование напряжения питания инвертора с использованием ШИП.

Широтно-импульсный преобразователь строится по схеме прерывателя, понижающего напряжение за счет уменьшения длительности импульса пропускания тока при постоянной частоте управления (20...50 кГц). Для возбуждения импульсов управления сегодня находят применение как специализированные микросхемы с аналоговым управлением, так и встроенные в большинство современных микроконтроллеров (МК) блоки цифровых счетчиков, работающих в режиме формирования ШИМ.

Сдерживающим фактором в применении ШИП в качестве основного регулирующего элемента является проблема снижения коммутационных потерь в силовом ключевом транзисторе, которая решается совершенствованием динамических свойств разработчиками IGBT и применением специальных схем снабберов со вспомогательными управляемыми ключами.

При использовании схемы инвертора напряжения наименьшие коммутационные потери обеспечиваются при некоторой индуктивной расстройке резонансного контура [1]. При этом сохраняются возможности частотного и фазового регулирования.

При использовании схемы инвертора тока (ИТ) гарантия режима работы на частоте резонанса позволяет иметь коммутацию с нулевым напряжением и не использовать последовательные отсекающие диоды. В этом режиме инвертор не может использоваться для регулирования мощности.

В обоих случаях система возбуждения инверторов должна сама подстраивать частоту и фазу импульсов управления с учетом вариации параметров индукционной системы. Для этого применяется принцип самовозбуждения (особенно применим в ИТ), либо частотный способ с независимым возбуждением и фазовой автоподстройкой.

С учетом высокой добротности индукционной системы (5...20) здесь неприемлем принцип цифрового преобразования код-частота, поэтому в СУ инверторов напряжения находят применение специализированные микросхемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), состоящие из генератора управляемого напряжением и фазового компаратора. Последний обеспечивает заданную фазу между передним фронтом импульса управления и переходом тока инвертора через ноль.

КОНЦЕПЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК:

1. Универсальный источник питания для различных вариантов технологических применений.
2. Модульность в наращивании мощности как при работе на один индуктор (рис. 2. а), так и на многосекционные индукционные системы (рис. 2. б).
3. Транзисторный генератор – как ядро системы автоматизации технологической установки. Алгоритмы регулирования (температуры) технологической установки: а) управление «по модели» - табличная реализация; б) с ОС (по температуре).

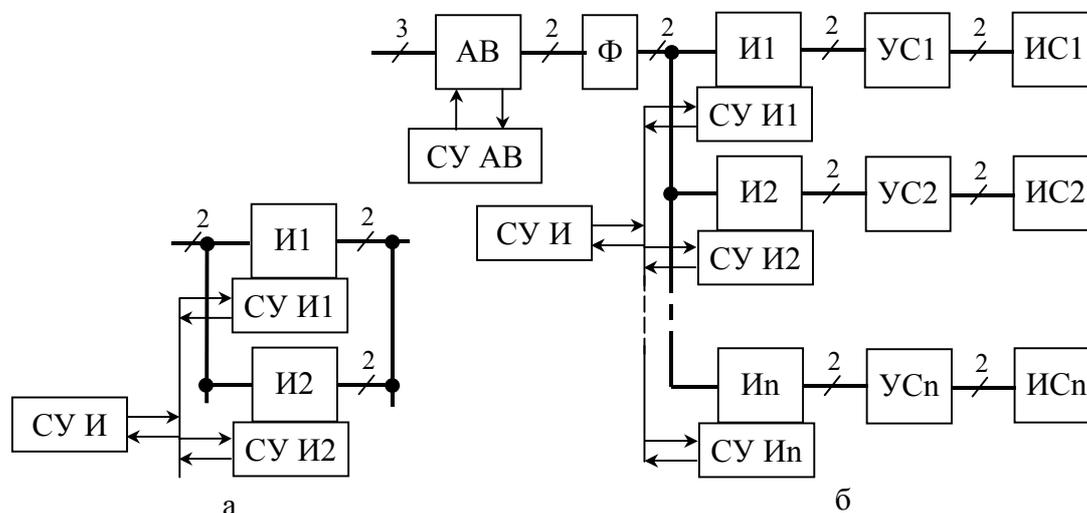


Рис. 2. Варианты построения многозвенных систем питания УИН

Преимущества сложной структуры ИП с множеством сравнительно высокочастотных ключевых ячеек проявляются только при грамотном сочетании режимов работы (алгоритмов управления), конструкции силовой ячейки (включая силовую ошиновку с минимизацией паразитных индуктивностей в контурах коммутации) и правильного выбора силовых транзисторов и цепей управления и защиты (драйверов) к ним. Все вышеперечисленное предъявляет высокие требования к квалификации и опыту разработчика: кроме хороших конструкторских навыков требуются глубокие знания в электротехнике и современной элементной базе,

понимание природы быстротекущих физических процессов, особенно при коммутациях и владение современным аппаратом моделирования процессов в электронных схемах.

Поэтому, на наш взгляд, базовые силовые узлы – инвертора, ШИП, активного выпрямителя – должны разрабатываться достаточно тщательно (и долго) и совершенствоваться не по логике построения того или иного ИП, а по мере развития элементной базы силовой электроники и технологий современного монтажа. А вот объединение этих качественных силовых узлов в систему питания, отвечающую конкретному и достаточно широко варьируемому набору требований со стороны технологического процесса (УИН) – это уже чисто системная задача, и одним из важных интегрирующих компонентов этой системы выступают узлы и связи межблочного уровня.

ЗАДАЧИ ИНТЕРФЕЙСА СУ ИП С ПЕРСОНАЛЬНЫМ КОМПЬЮТЕРОМ

Функции управления и автоматизации, реализуемые за счет интерфейса с компьютером (ноутбуком) и дополнительного программного обеспечения [2], существенно расширяют возможности автоматизации без удорожания стоимости СУ:

1. Автоматизация протоколирования и архивирования технологических процессов путем записи трэндов электрических и тепловых параметров (рис. 3):
 - а) для обеспечения качества производства (паспорт технологического процесса);
 - б) для анализа динамики работы системы питания при автоматизации научных исследований в новых применениях индукционных технологий.

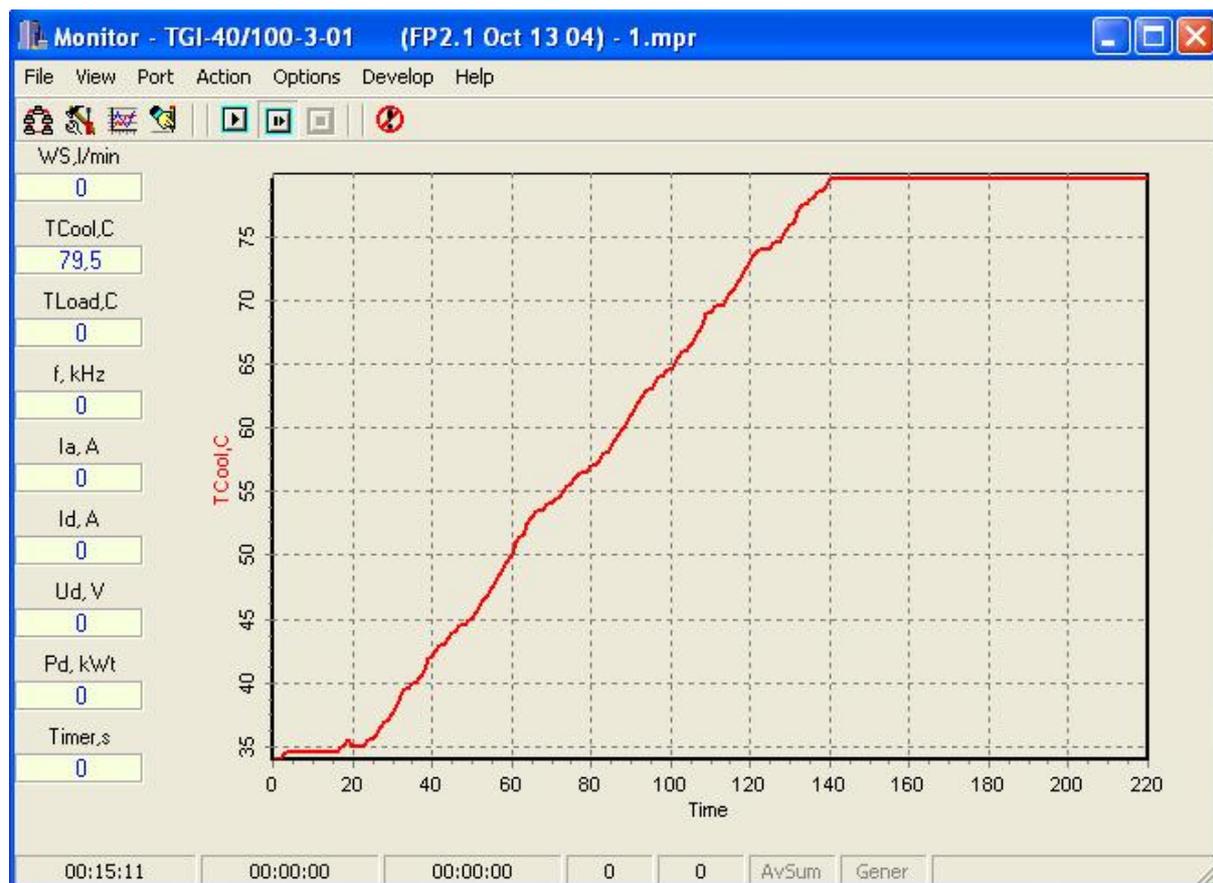


Рис. 3. Вид основного окна программы связи компьютера с источником питания серии ТГИ – режим записи процесса нагрева

2. Гибкость настройки параметров системы управления (рис. 4):
 - а) коэффициенты масштабирования и параметры индикации измеряемых электрических, тепловых и пр. параметров;

- б) коэффициенты настройки таймера;
- в) коэффициенты настройки диапазонов уставок и регуляторов;
- г) коды выбора режимов работы систем защиты, измерения и пр.
- 3. Автоматизация системы согласования с индукционной нагрузкой.
- 4. Обеспечение программируемого многоступенчатого режима регулятора (рис. 5)

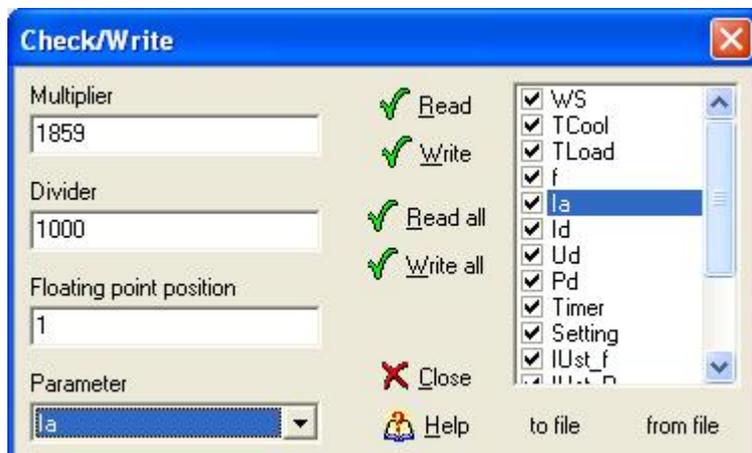


Рис. 4. Вид окна редактирования параметров настройки СУ

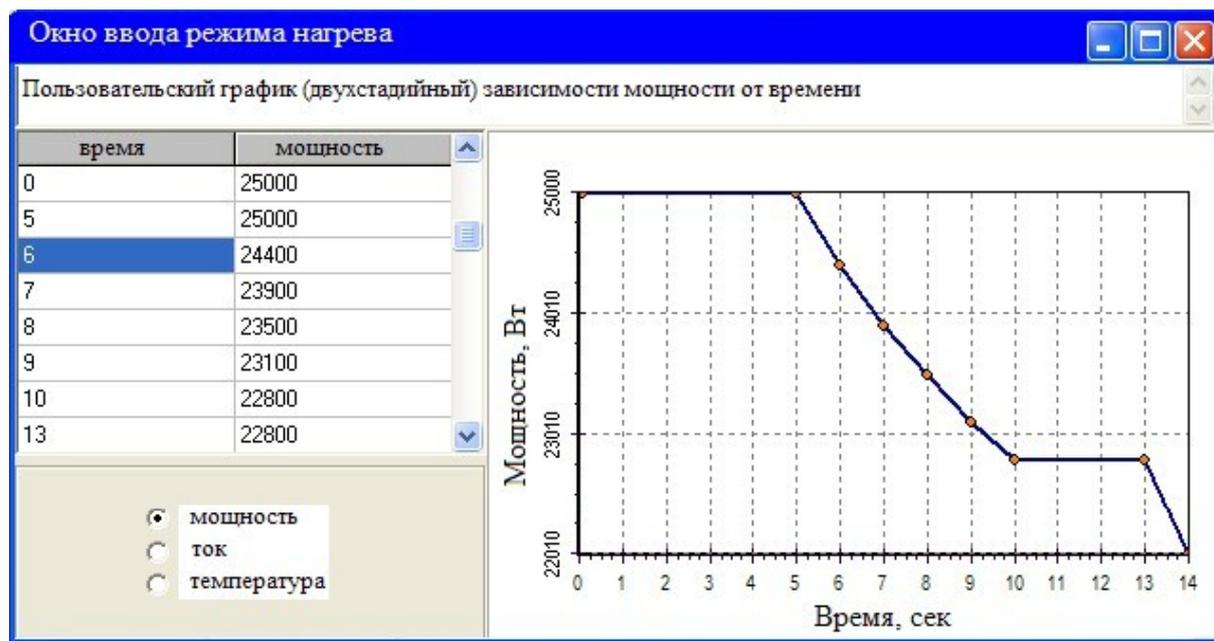


Рис. 5. Вид окна ввода параметров многостадийного режима работы.

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Выбор элементной базы для реализации системы управления транзисторными преобразователями для индукционного нагрева:

1. «Жесткая» логика – аналоговые и цифровые ИМС малой и средней степени интеграции – обладают максимальным быстродействием, поэтому незаменимы в цепях быстродействующей защиты, формирования и распределения импульсов управления.

2. Программируемая логика – обеспечивает сочетание гибкости (программируемость) с быстродействием «жесткой» логики. Цифровая программируемая логика [9] уже широко применяется и постепенно вытесняет «жесткую» логику благодаря повышению гибкости устройств с их применением.

Аналоговые программируемые ИМС пока только выходят на рынок, вероятно, они смогут потеснить не только собственно аналоговые микросхемы средней и высокой степени интеграции, но и микроконтроллеры в применениях связанных с обработкой аналоговых сигналов.

3. Микроконтроллеры (МК) и специализированные контроллеры обеспечивают наибольшую гибкость (программное решение логических и вычислительных задач, аппаратная реализация разнообразных интерфейсов и задач формирования и измерения временных интервалов):

а) 8-разрядные МК – «клоны» Intel MCS51, в том числе с аналоговым интерфейсом (10 и 12-разрядные АЦП и ЦАП) или «оригинальные» семейства таких производителей, как Atmel, MicroChip, Motorola и пр.

б) Высокопроизводительные МК на базе симбиоза 16 или 32-разрядных МК и цифровых сигнальных процессоров.

в) Так называемые «системы на кристалле» [9], объединяющие 8/16-разрядные МК и программируемую логику на одном кристалле.

4. «Готовые» устройства автоматизации:

а) программируемые логические контроллеры (ПЛК) [7];

б) программируемые терморегуляторы/измерители температуры, поддерживающие связь с компьютером (RS-232/485);

в основном применяются для построения системы управления нагревом и взаимодействия с автоматизированной системой управления технологическими процессами на уровне участка/цеха. Требуется обеспечить взаимодействие СУ ИП и СУН на уровне сигналов управления и передачи данных.

СТРУКТУРА СУ ИП – РАЗДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ И ИНТЕРФЕЙСОВ

Модульность построения СУ ИП (рис. 6) позволяет гибко изменять структуру преобразователя в целом, облегчает модернизацию отдельных узлов управления.

Модуль СУ И строится на базе 8-разрядного МК, программируемой логики (ПЛИС – функции быстродействующих блокировок с запоминанием, автомата пуска/защиты), ФАПЧ и некоторых аналоговых узлов.

Функции МК:

1. Измерения I_{a_rms} , U_{a_rms} , P_a с использованием встроенного АЦП, частоты f_u путем аппаратного подсчета импульсов за 1 мс таймером/счетчиком.

2. Вывод напряжения задания по частоте f_u или фазе φ_u с использованием внешнего ЦАП с последовательным интерфейсом.

3. Программный регулятор частоты или фазы.

4. Обслуживание внешнего автомата пуска/защиты, чтение кодов быстродействующих блокировок.

5. Обмен командами и данными другими интеллектуальными модулями по последовательному интерфейсу.

Модуль СУ ШИП строится на базе 8-разрядного МК или специализированного контроллера (СК) и формирует импульсы управления с использованием сигналов с датчиков тока i_{d2} и напряжения u_{d2} .

Модуль СУ АВ в качестве интеллектуального ядра должен использовать 16-разрядный ЦСП (или МК с подобными чертами) для непосредственного управления ключами АВ (через драйверы) по сигналам от датчиков фазного тока (ДТ) i_a , i_b , i_c и напряжения u_a , ... , u_{d1} .

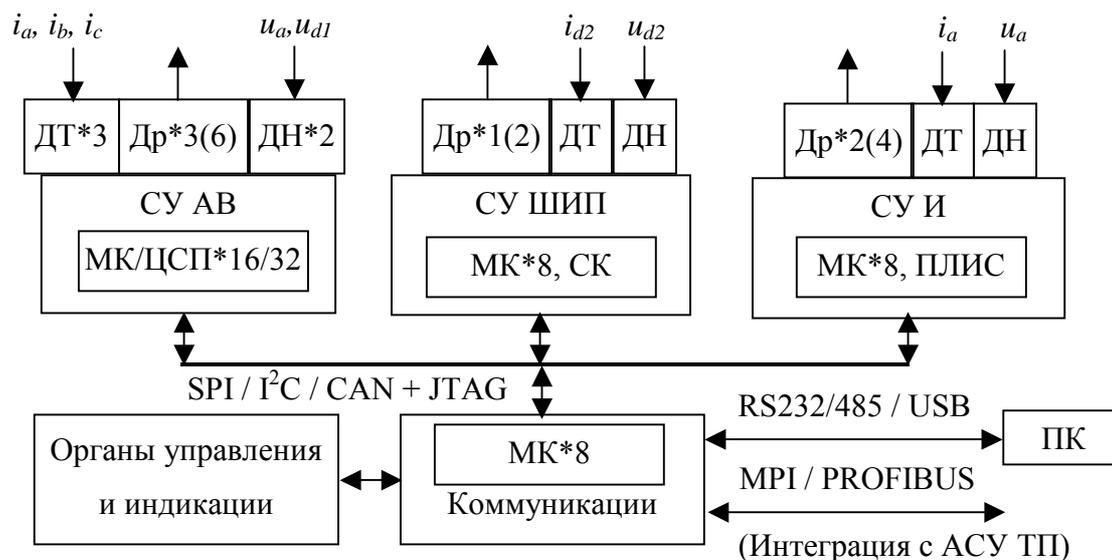


Рис. 6. Структурная схема модульной системы управления источника питания УИН

Коммуникационный модуль располагается на передней панели ИП, строится на базе 8-разрядного МК и выполняет функции обслуживания органов управления и индикации, коммуникации с персональным компьютером (ПК) и АСУ ТП.

К дополнительным общесистемным функциям (на схеме не показано) относятся контроль системы охлаждения преобразователя: полупроводниковый датчик температуры силовых модулей DS1820 (однопроводной двунаправленный интерфейс), датчик расхода охлаждающей воды (подсчет импульсов), датчик числа оборотов вентилятора, и аналоговый канал измерения температуры (нагреваемого объекта) с помощью терморпары (К – типа).

Все эти модули объединяются последовательным двухпроводным каналом связи, реализуемым с использованием одного из встроенных в МК специализированных аппаратных блоков. В 8-разрядных МК распространены интерфейсы: I²C (Phillips, до 400 Кбод) синхронного типа или байтовый универсальный асинхронный приемник/передатчик (УСАПП). В высокопроизводительных 16/32-разрядных МК распространяется более совершенный асинхронный интерфейс для построения локальных управляющих сетей типа CAN (до 1 Мбод). Его можно использовать и в виде отдельной микросхемы с параллельным магистральным интерфейсом.

Для связи СУ с компьютером сейчас используется интерфейс RS-232C (типа точка-точка) реализованный в МК в виде контроллера УСАПП (логика), в ПК он полностью совместим с СОМ-портом. Аппаратные узлы УСАПП в МК обеспечивают обмен на скорости до 115 Кбод, вполне достаточной для передачи из СУ ИП в ПК пакетов измеряемых параметров с частотой до 100 Гц.

Тенденция производителей ПК, особенно ноутбуков, отказываться от «устаревших» СОМ-портов делает актуальным использование современных (высокопроизводительных) последовательных интерфейсов, прежде всего USB. Возможны два варианта использования USB. Первый практически не требует переработки программного обеспечения в МК и ПК и использует готовые аппаратные «переходники» USB – СОМ. Второй – использование аппаратно реализованного USB-порта – сдерживается их малым распространением в 8-разрядных МК

5-х проводной отладочный интерфейс JTAG сейчас активно интегрируется в МК новых разработок различных фирм и может выполнять следующие функции:

а) Программирование энергонезависимой памяти программ/данных МК и ПЛИС;

б) Тестирование качества соединений на плате методом граничного сканирования;

в) отладка программы в режиме реального времени.

Избыточность предложенной схемы по числу дискретных и аналоговых входов/выходов позволяет использовать ее для построения СУН при ограничениях на стоимость.

Для интеграции с системой управления нагревом или АСУ ТП, реализуемыми на базе программируемых логических контроллеров используется последовательный канал связи. Требуется согласовать тип канала и протокол связи.

К сожалению, пока не выработан единый стандарт для каналов и протоколов в промышленных сетях связи, но отдельные страны и крупные фирмы производители продвигают свои решения. Для стандартизации протоколов связи существует набор рекомендаций, оговаривающий 8 уровней детализации. Большинство производителей соблюдает только 2 – 4 нижних уровня этой избыточной структуры, прежде всего физический, каналный и транспортный.

Согласование типа канала (электрические и временные параметры сигналов, среда передачи) облегчается тем, что большинство реализованных промышленных каналов связи придерживаются рекомендованного стандарта RS-485 [7]. Например, фирма Siemens, как один из ведущих европейских производителей ПЛК, на базе RS-485 использует два протокола: MPI (Multi Point Interface) для объединения до 32 устройств на обычной скорости 187 Кбод и PROFIBUS для объединения до 128 устройств на обычной скорости 10 Мбод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные взгляды и решения закладываются в разработки, учебный процесс и могут быть темой для обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коммутационные процессы в транзисторных инверторах для индукционного нагрева/ Бондаренко Д.Н., Дзлиев С.В., Патанов Д.А.// Изв. ГЭТУ. – 1996. - Вып. 497. - С.98-110.
2. High-frequency transistor converters for induction heating. / D. Bondarenko, S. Dzliev, D. Ershov, D. Patanov, I. Tihomirov, P. Chernetsov. // Proceedings of the International Seminar on Heating by Internal Sources, Padua, 2004.
3. Investigation of the high-level surface hardening of steel. / A. Vasilev, S. Dzliev, F. Tchmilenko, P. Chernetsov, D. Patanov, D. Bondarenko. // Proceedings of the International Seminar on Heating by Internal Sources, Padua, 2004.
4. Kolar J.W., Ertl H., Zach F.C. Design and Experimental Investigation of a Three-Phase High Power Density High Efficiency Unity Power Factor PWM (Vienna) Rectifier Employing a Novel Integrated Power Semiconductor Module. Proceedings of the 11th IEEE Applied Power Electronics Conference, San Jose (CA), USA, March 3-7, Vol.2, pp.514-523 (1998).
5. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2001. - 384 с.
6. Солонина А.И., Улахович Д.А., Яковлев Л.А. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 464 с.
7. Олсон Г., Джангуидо П. Цифровые системы автоматизации и управления // СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.
8. Энциклопедия ремонта. Выпуск 11: Микросхемы для современных импульсных источников питания. – М.: ДОДЭКА, 1999. – 288 с.
9. Грушвицкий Р.И., Мурсаев А.Х., Угрюмов Е.П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.

10. Ремизевич Т.В. Микроконтроллеры для встраиваемых приложений: от общих подходов – к семействам HC05 и HC08 фирмы Motorola. / под ред. Кирюхина И.С. – М.: ДОДЭКА, 2000. – 272 с.