

УДК 621.365.5

**Ю.М. Голембиовский, А.А. Костерев**

**СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМОДУЛЬНЫМ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ**

*Обсуждается проблема управления многомодульными частотными источниками питания индукционных плавильных установок. Обосновывается построение иерархической двухуровневой системы управления. Описываются структура и алгоритмы управления.*

Параллельная работа, многомодульность, система управления, индукционный нагрев, инвертор

Yu.M. Golembiovsky, A.A. Kosterev

**ADAPTIVE CONTROL OF A MULTIMODULAR CONVERTING COMPLEX FOR INDUCTION MELTING OF METALS**

*The article describes the issues related with controlling the multimodular frequency power supplies of induction melting units. Creation of a hierarchical two-level control system finds substantiation. The structure and algorithms for the control are described.*

Parallel work, multimodularity, control system, induction heating, inverter

**1. Состояние проблемы. Постановка задачи**

Современный этап развития силовой электроники характеризуется усилением внимания к разработке и внедрению многомодульных преобразовательных комплексов, представляющих собой группу работающих параллельно на общую нагрузку автономных инверторов (АИ) [1-3, 9].

Модульные системы имеют целый ряд достоинств, делающих их привлекательными для разработчиков вторичных источников электропитания различного назначения. Такими преимуществами являются [4, 5, 10]:

- экономия ресурса работоспособности модулей и комплекса в целом;
- возможность наращивания выходной мощности путем увеличения количества параллельно работающих инверторов;
- унификация изделий силовой электроники;
- повышение эффективности использования силового оборудования и к.п.д. источников электропитания;
- повышение надежности системы электропитания при минимальных затратах на резервирование.

В то же время реализация указанных преимуществ модульной архитектуры систем электропитания возможна лишь при обеспечении надлежащего управления каждым модулем и комплексом в целом. В этой связи на систему управления возлагается целый ряд сложных задач:

- измерение потребляемых каждым модулем токов;
- определение состава включаемых на параллельную работу модулей;
- оперативная перестройка структуры преобразовательного комплекса (т.е. включение или отключение отдельных модулей) с целью адаптации ее к изменяющимся параметрам нагрузки;
- обеспечение равномерной загрузки модулей.

Задача повышения технико-экономических показателей особенно актуальна для систем электропитания индукционных плавильных печей в силу больших (двух–пяти кратных) нелинейных изменений электрофизических параметров нагрузки в процессе плавки [6,7].

Совершенно очевидно, что решение перечисленных выше задач управления возможно лишь с использованием современных средств обработки информации, в частности микроконтроллеров (МК) [11], широкая номенклатура которых представлена на рынке цифровых вычислительных устройств. Не касаясь вопроса выбора конкретных типов МК для управления преобразовательным комплексом, остановимся на концепции построения микроконтроллерной системы.

**2. Структура системы управления преобразовательным комплексом индукционной плавки металлов**

Современные установки для индукционной плавки металлов работают на частотах от 500 Гц и выше (стандартной частотой является 2,4 кГц). При таких частотах становится практически невозможным использование одноуровневой системы управления даже на базе высокопроизводительных МК с временем выполнения команды 0,1 мкс. Дело здесь не столько в том, что на такой контроллер будут возлагаться задачи выработки управляющих сигналов для каждого модуля, опроса датчиков, аналого-цифрового преобразования, расчета величины уставки по току для каждого модуля и выработки управляющих воздействий, сколько в инерционности силовой части преобразовательного комплекса, из-за которой вывод модуля на рабочий режим осуществляется в течение нескольких периодов выходной частоты преобразовательного комплекса (ПК) [8]. Микроконтроллер должен управлять этим процессом, постоянно контролируя параметры каждого модуля в процессе перестройки структуры преобразовательного комплекса, решая при этом одновременно и все перечисленные выше задачи.

Изложенные соображения делают, с нашей точки зрения, предпочтительным построение иерархической двухуровневой системы управления сетью. На микроконтроллер верхнего уровня целесообразно возложить стратегическую задачу вычисления оптимальной конфигурации ПК в зависи-

мости от изменяющихся параметров нагрузки. Микроконтроллеры нижнего уровня должны осуществлять управление работой каждого отдельного модуля.

Современные микроконтроллеры являются функционально законченными вычислительными устройствами, содержащими на одном кристалле все необходимые средства обработки информации: процессор, память программ и память данных, таймеры, систему прерывания. Связь с внешними устройствами осуществляется через порты ввода-вывода, а также последовательный интерфейс. Структура предлагаемой двухуровневой системы управления представлена на рис. 1. Функции верхнего уровня выполняет контроллер *МК1*, функции нижнего уровня реализуются микроконтроллерами *МК2.1–МК2.N*, каждый из которых управляет своим модулем, включающим управляемый выпрямитель (*УВ2.i*) и автономный инвертор (*И2.i*), ( $i=1,2,\dots,N$ ).

Взаимодействие контроллеров верхнего и нижнего уровней осуществляется через порты ввода-вывода. Такое сопряжение позволяет простейшим образом организовать асинхронный обмен информацией между верхним и нижним уровнями. При этом МК-система нижнего уровня должна не только выработать импульс управления выпрямителем и инвертором, но и осуществлять непрерывный контроль функционирования своего модуля. Считав переданную с верхнего уровня уставку  $I^H_i$ , микроконтроллер *МК2.i* реализует предписанные действия и снова считывает уставку. Если за это время уставка изменилась, то *МК2.i* производит изменение режима работы модуля (т.е. его включение или отключение) или корректировку отдаваемой им мощности. Если же верхний уровень управления не изменил уставку, то *МК2.i* производит лишь проверку правильности функционирования модуля (отклонение от ранее выставленной уставки и корректировку режима, если это необходимо). Конфликтные ситуации разрешаются программным путем. Для этого в определенных точках программы управления предусмотрены команды, запрещающие или разрешающие обращения к портам ввода-вывода *МК2.i*.

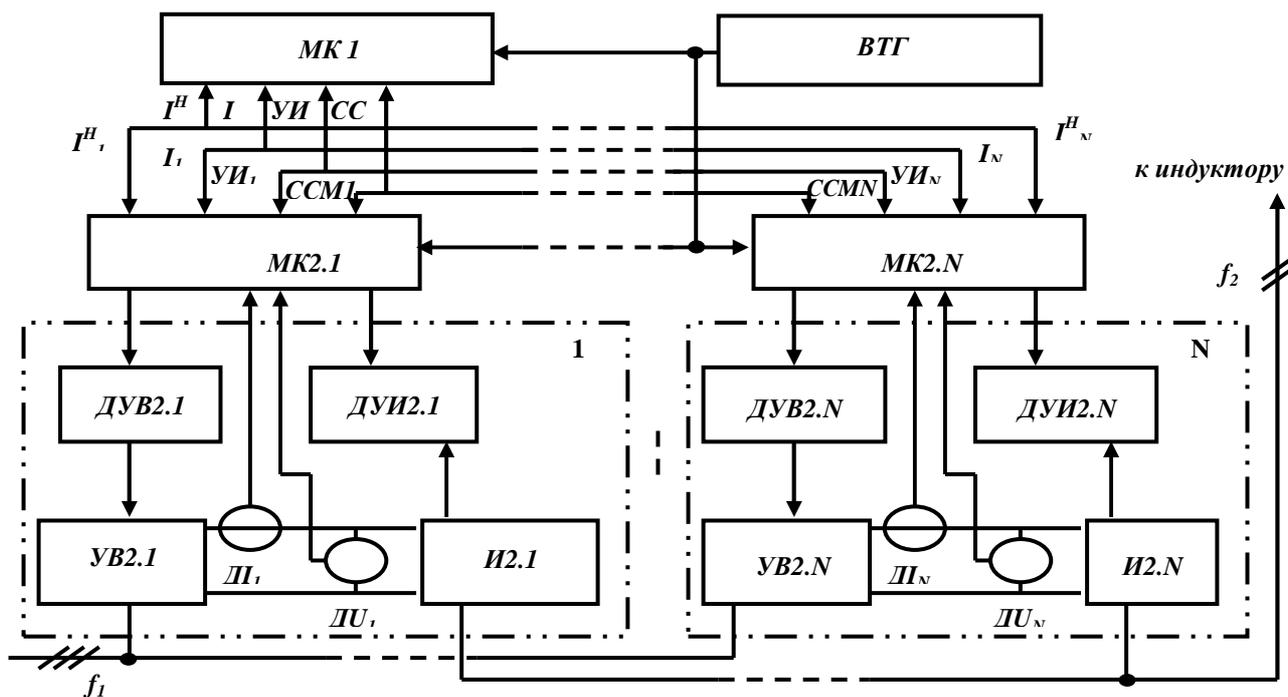


Рис. 1. Структура системы управления преобразовательным комплексом для индукционной плавки металлов

Синхронизация работы микроконтроллеров верхнего и нижнего уровней осуществляется от единого внешнего тактового генератора (*ВТГ*), что обеспечивает строгую синфазность генерируемых модулями напряжений. Формирование, усиление и гальваническую развязку сигналов управления управляемыми выпрямителями *УВ2.i* и инверторами *И2.i* осуществляют драйверы *ДУВ2.i* и *ДУИ2.i*.

### 3. Алгоритмы управления

На рис. 2 представлена граф-схема алгоритма работы микроконтроллера верхнего уровня. Цикл управления начинается с выборки цифровых эквивалентов входных токов инверторов. Полученная информация используется микроконтроллером *МК1* для вычисления уставок по току  $I^H$  (если все модули одинаковой мощности, то  $I^H_1 = I^H_2 = \dots = I^H_N$  и представляет собой среднее значение  $\sum_{i=1}^N I_i / N$ ).

Вычисленные для каждого модуля значения уставок  $I^H$  передаются затем на нижний уровень управления. При этом с целью исключения возможности искажения информации передача уставки на нижний уровень производится лишь в том случае, если  $MK2.i$  позволяет смену значения  $I^H$  в своем порту. При этом микроконтроллер  $MK1$  на момент записи новой уставки запрещает считывание ее микроконтроллеру нижнего уровня.

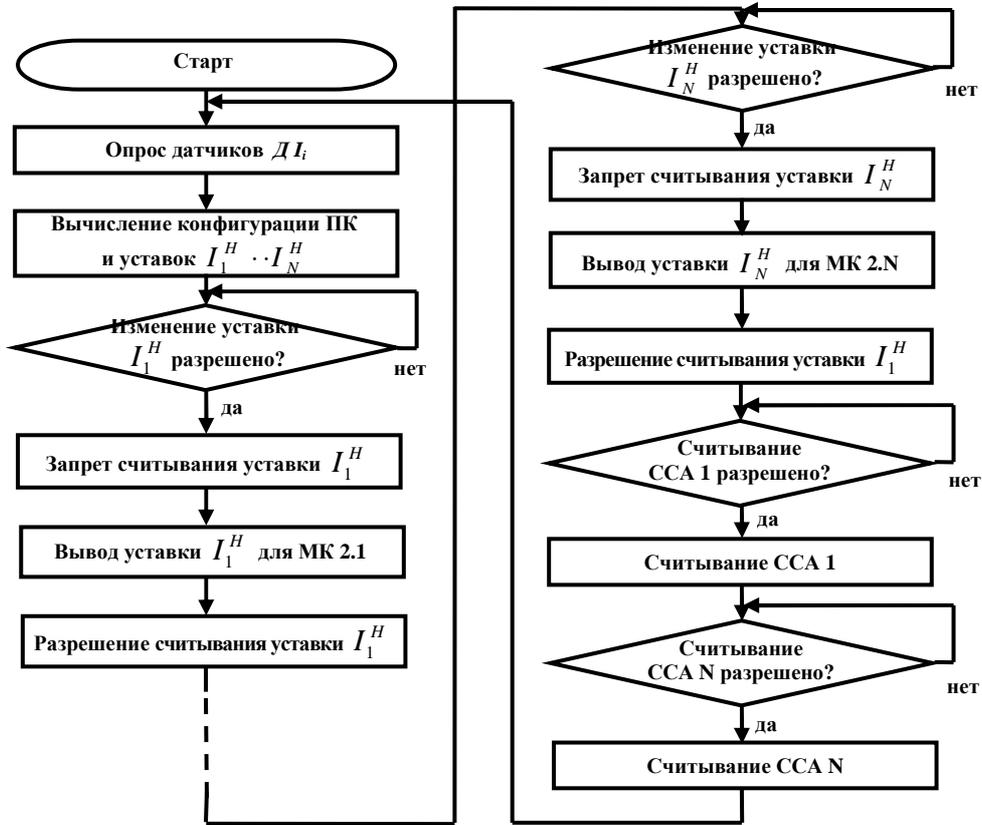


Рис. 2. Алгоритм работы МК верхнего уровня

Аналогичным образом организована асинхронная передача на верхний уровень слова состояния модуля (ССМ), несущую информацию о режиме работы агрегата и наличии аварийных ситуаций. Распределение разрядов ССМ показано на рис. 3.

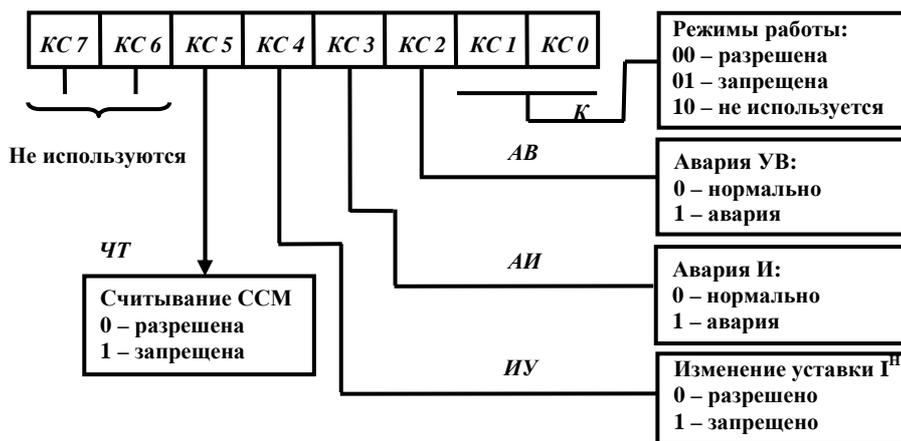


Рис. 3. Распределение разрядов слова состояния модулей

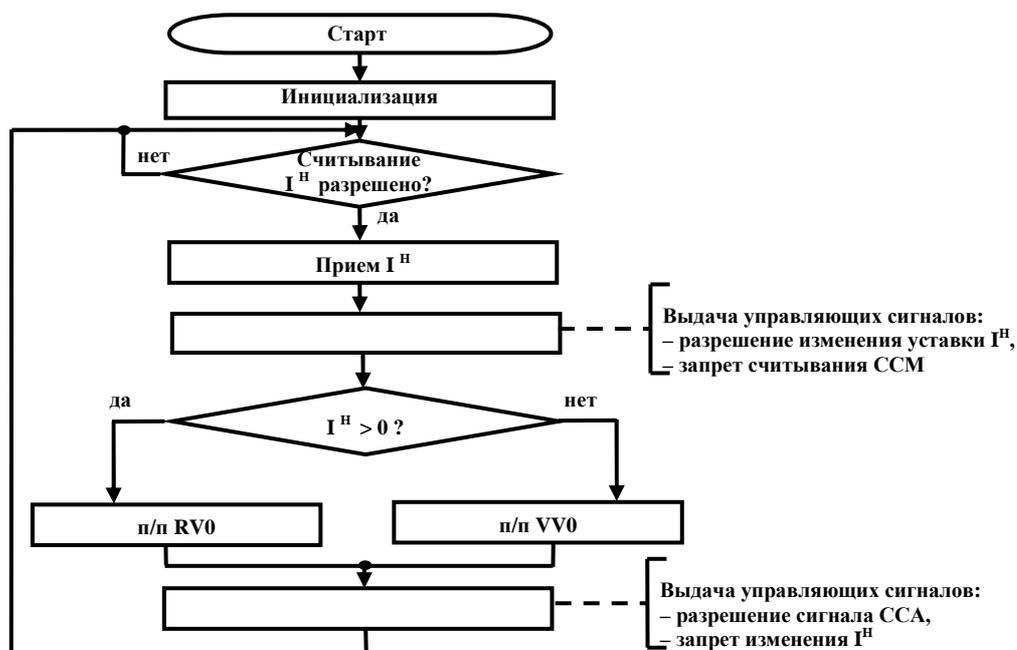


Рис. 4. Алгоритм работы контроллера нижнего уровня

Уставка несет информацию не только о величине тока, но и о том, в каком режиме должен работать модуль до следующей смены уставки. Принято следующее соглашение:

$I_i^H = 0$  – перевод  $i$ -го преобразователя в резерв;

$I_i^H > 0$  – перевод  $i$ -го преобразователя в режим инвертирования или корректировки отдаваемой мощности.

Задачи, решаемые микроконтроллерами нижнего уровня, отражает алгоритм, представленный на рис. 4. Цикл управления модулем предусматривает считывание уставки  $I_i^H$  из порта  $MK1$ , выполнение требуемых действий по изменению режима работы агрегата и передачу на верхний уровень информации о его состоянии. На рис. 4 приняты следующие обозначения:

$RV0$  – подпрограмма регулирования выпрямителя;

$VV0$  – подпрограмма выключения выпрямителя.

Подпрограмма  $RV0$  осуществляет перевод преобразователя из резерва в режим инвертирования или корректировку отдаваемой инвертором мощности. Регулирование производится изменением угла  $\alpha$  отпирания тиристорov выпрямителя. Знак изменения определяется в результате сравнения уставки  $I^H$  с током  $I$  в цепи питания инвертора. Шаг  $\Delta\alpha$  изменения угла управления выпрямителем выбирается из соображений обеспечения желаемой динамики изменения режима работы модуля, благоприятных переходных процессов и требуемой точности управления.

Подпрограмма  $VV0$  реализует процесс перевода преобразователя в резерв путем постепенного уменьшения угла управления  $\alpha$ . После достижения  $\alpha=0$  осуществляется контроль выключения выпрямителя опросом датчика  $DU$  напряжения на входе инвертора. Если  $U \neq 0$ , то формируется сообщение об аварии выпрямителя.

#### Выводы

1. Для повышения технико-экономических показателей систем индукционной плавки металлов целесообразно использовать многомодульные преобразовательные комплексы.

2. Реализация всех потенциальных преимуществ многомодульных систем по сравнению с применяемыми в настоящее время источниками электропитания индукционных плавильных установок возможна лишь путем осуществления оперативного управления, обеспечивающего адаптацию топологии системы питания к изменяющимся параметрам индуктора в процессе плавки по критерию минимума потерь электроэнергии и экономии ресурса силового оборудования.

3. Учитывая, что индукционные плавильные печи работают на высоких частотах, целесообразно применение двухуровневых микроконтроллерных систем управления с распределением соответствующим образом задач управления между уровнями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адамия Г.Г. Распределение нагрузок между параллельно работающими инверторами / Г.Г. Адамия, П.Г. Билинкис, В.А. Чванов // Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. 1971. №17. С. 15-18.
2. Адамия Г.Г. Принципы построения систем содержащих параллельно работающие автономные инверторы / Г.Г. Адамия, В.А. Чванов // Материалы семинара по кибернетике. Ч. 1. Динамика систем управления. Кишинев: Штинница, 1975. С. 22-25.
3. Артюхов И.И. Тиристорные преобразователи частоты с перестраиваемой структурой / И.И. Артюхов, Ю.Б. Томашевский, В.А. Серветник // Вопросы преобразовательной техники и частотного электропривода: межвуз. науч. сб. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1985. С. 47-53.
4. Голембиовский Ю.М. Управление комплексом тиристорных преобразователей частоты на базе автономных инверторов тока с перестраиваемой структурой / Ю.М. Голембиовский, Г.Э. Суманеев, Ю.Б. Томашевский // Силовая электроника в решении проблем ресурсо- и энергосбережения: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Крым, Алушта, 1996. С. 65-66.
5. Кантер И.И. Система централизованного электроснабжения на базе параллельно работающих преобразователей частоты / И.И. Кантер, Ю.Б. Томашевский, Ю.М. Голембиовский // Электричество. 1991. № 1. С. 39-47.
6. Особенности индукционного нагрева ферромагнитных сталей при различных режимах работы преобразователя частоты / С.Н. Владимиров, С.К. Земан, А.В. Осипов, В.П. Толстов // Известия вузов. Электромеханика. 2004. № 1. С. 50-54.
7. Земан С.К. Исследование зависимостей характеристик резонансного контура от конструктивных и электрических параметров системы «индуктор – нагреваемый объект» / С.К. Земан, А.В. Осипов, М.С. Сахаров // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310. № 1. С. 197-202.
8. Голембиовский Ю.М. Один из вариантов перестройки структуры источника питания индукционной установки / Ю.М. Голембиовский, А.А. Костерев // АПЭП-2012: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 2012. С.355-359.
9. Robust Control of Parallel DC-DC Buck Converters by Combining Integral-Variable-Structure and Multiple-Sliding Surface Control Schemes / S.K. Mazumder, A.H. Nayfeh, D. Borojevic // IEEE Transactions on Power Electronics/ 2002. V. 17. № 3. P. 428-437.
10. A Control Method for Voltage Balancing in Modular Multilevel Converters / Fujin Deng, Zhe Chen // Power Electronics, IEEE Transactions on, 2013. V. 29. №1. P. 66-76.
11. Leonhard W. Microcomputer Control of High Dynamic Performance ac-Drives-A Survey / W. Leonhard // Automatica. London, 1986. V. 22. №1. P. 1-19.

**Голембиовский Юрий Мичиславович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Yuriy M. Golembiovsky** – Dr. Sc., Professor  
Department of Systems Engineering  
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Костерев Андрей Александрович** – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Andrey A. Kosterev** – Postgraduate  
Department of Systems Engineering  
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 17.08.13, принята к опубликованию 15.09.13*