

Контроллер управления компенсацией реактивной мощности

индукционной печи промышленной частоты

В статье приводятся результаты разработки, производства и применения специализированного контроллера типа АРМ/ИП для управления компенсацией реактивной мощности индукционной печи (ИП) промышленной частоты. Контроллер обеспечивает заданную величину и направление реактивной мощности в узле подключения ИП к печному трансформатору (электрической сети) в определенном диапазоне $\cos \varphi$ около единицы путем автоматической ступенчатой коммутации секций статических конденсаторов к индуктору ИП.

Владимир Копырин,
к. т. н.

kamen@mail.ur.ru

Андрей Ткачук,
к. т. н.

tkachuk@asc-ural.ru

Введение

Индукционные печи (ИП) промышленной частоты (тигельные и каналные) широко применяются на промышленных предприятиях для плавки черных и цветных металлов и их сплавов. Они также используются для перегрева металлов и сплавов перед разливкой, выравнивания их химического состава, легирования и поддержания постоянных температурных условий при литье (миксеры), а также для последовательного выполнения плавильного и миксерного режимов [1–4].

Регулируемым технологическим параметром ИП является температура металла. Ее изменение или стабилизация производится путем регулирования величины активной мощности, подводимой к индуктору ИП. В качестве управляемого источника электроэнергии ИП используется печной трансформатор Т1. Он обеспечивает ступенчатое изменение (9–23 ступени) напряжения на его вторичной обмотке и, следовательно, на индукторе ИП.

Регулируемым электрическим параметром является реактивная мощность (РМ), потребляемая индукционной установкой. Это объясняется тем, что ИП представляет собой изменяющуюся активно-индуктивную нагрузку. Причем индуктивная составляющая значительная, что соответствует минимальному значению коэффициента мощности ($\cos \varphi$), равного 0,3–0,4 [1–3]. Следовательно, необходимым требованием является компенсация РМ непосредственно на зажимах индуктора ИП [1–5]. Отсутствие компенсации РМ приводит к существенному увеличению мощности печного трансформатора, потерь электроэнергии, сечения силовых токопроводов и характеристик коммутационно-защитной аппаратуры. Учитывая широкий диапазон изменения РМ при плавке металлов, требуется изменяющаяся компенсирующая мощность источника реактивной энергии. Таким источником является батарея статических конденсаторов (БК), включающая N секций (С1 — СN), которые коммутируются в различных

сочетаниях параллельно индуктору ИП. Коммутация секций С1 — СN должна производиться в автоматическом режиме, а в некоторых случаях и в ручном, например при наладке.

Таким устройством автоматического регулирования РМ в узле подключения индукционной установки к питающей сети или на вторичной обмотке печного трансформатора может быть специализированный контроллер [5–7]. В полной мере эту функцию выполняет специализированный контроллер типа АРМ/ИП, который разработало, освоило выпуск и применило для индукционных печей типа ИАТ1 научно-производственное предприятие «Энергия и экология» (Екатеринбург) [6, 7].

1. Описание контроллера

Контроллер посредством коммутационных аппаратов осуществляет автоматический выбор количества коммутируемых секций батареи конденсаторов с целью поддержания заданной реактивной мощности или коэффициента мощности индукционной установки. Он обеспечивает автоматический и ручной режим управления до восьми секций БК с заданным соотношением емкостей, например 1:1:1:1:1:1:1, 1:1:2:2:2:2:2:2 или 1:2:2:2:2:2:2:2. Количество секций может быть меньшим.

Контроллер может изменять заданную величину и направление реактивной мощности в узле подключения ИП. Следовательно, поддерживается как нулевая реактивная мощность, так и мощность с заданным индуктивным или емкостным характером. При изменении нагрузки ИП контроллер автоматически стабилизирует заданный уровень и знак реактивной мощности путем ступенчатой коммутации определенного числа секций конденсаторной батареи.

Структура контроллера типа АРМ/ИП представляет собой аналого-цифровую систему автоматического регулирования с отрицательной обратной связью по реактивной мощности индукционной печи (рис. 1). При отклонениях и колебаниях реактивной

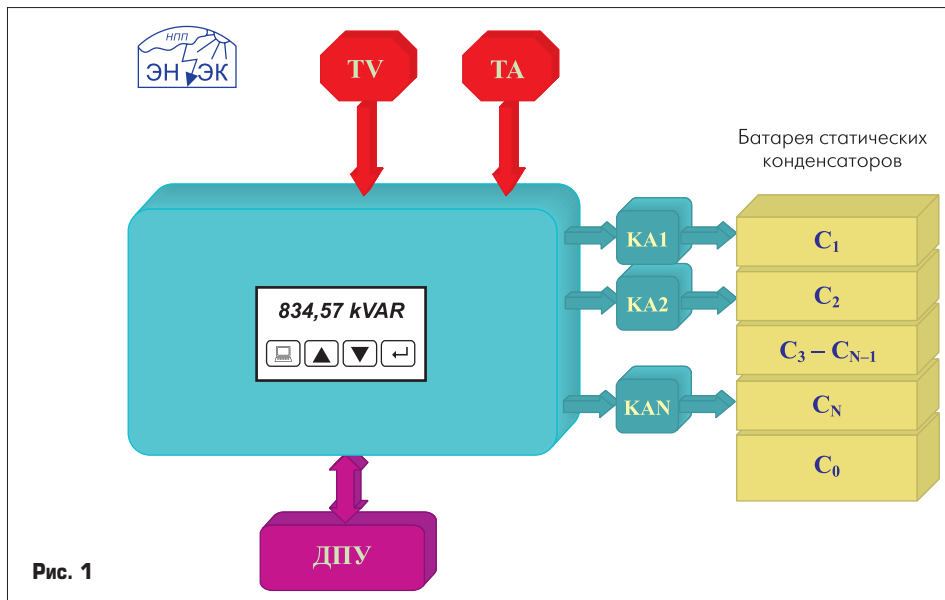


Рис. 1

мощности интегральный регулятор контроллера последовательно увеличивает или уменьшает емкость, подключенную к индуктору таким образом, чтобы реактивная мощность в контролируемом узле нагрузки достигла близкого к заданному значения.

Контроллер состоит из следующих основных модулей: датчиков тока и напряжения (ДТ и ДН); дискриминатора реактивной мощности (ДРМ); сумматора (С); компаратора (К); последовательного логического устройства (ПЛУ); электронных ключей (ЭК1 — ЭК8) и блока питания. Рассмотрим его принцип действия. Входными сигналами являются напряжение и ток первичной или вторичной обмотки печного трансформатора. Напряжение к двухдиапазонному ДН может подаваться с измерительного трансформатора напряжения TV1 (U100V) или со вторичной обмотки печного трансформатора Т1 (U600V). Ток к ДТ подается от вторичной обмотки измерительного трансформатора тока ТА1 или ТА2 (I5AX и I5AY), включенных в цепь первичной или вторичной обмоток трансформатора Т1 со стандартным выходом 5 А. В датчиках сигналы гальванически изолируются и нормализуются для правильного функционирования системы регулирования.

На основе информации о токе и напряжении в ДРМ образуется сигнал, пропорциональный реактивной мощности, со знаком, определяющим характер нагрузки: индуктивный или емкостной. Далее этот сигнал поступает в сумматор, который осуществляет выбор уставки регулирования по РМ:

- полная компенсация РМ — уставка равна нулю, то есть регулятор должен обеспечить нулевую реактивную мощность в контролируемом узле;
- частичная компенсация РМ — уставка реактивной мощности варьируется в пределах от -60 до $+60\%$ номинального значения полной измерительной мощности $S_{\text{НОМ.ИЗ.}}$, определяемой как произведение номинального измерительного тока $I_{\text{НОМ.ИЗ.}}$ на номинальное измерительное напряжение $U_{\text{НОМ.ИЗ.}}$ ($S_{\text{НОМ.ИЗ.}} = I_{\text{НОМ.ИЗ.}} \times U_{\text{НОМ.ИЗ.}}$). Сигнал с выхода сумматора поступает на компаратор, в котором сравнивается с ши-

риной зоны нечувствительности. При выходе сигнала за верхнюю границу зоны нечувствительности компаратор формирует команду на отключение секций силовых конденсаторов, а при выходе сигнала за нижнюю границу — команду включения секций конденсаторов. Последовательное логическое устройство осуществляет распределение команд управления по восьми каналам с задержкой времени от 5 до 90 с. При этом в зависимости от команды коммутируемая емкость либо наращивается, либо снижается. Если команды отсутствуют, то емкость не изменяется.

Электронные коммутаторы реализуют преобразование потенциальных команд управления, поступающих с выходных каналов ПЛУ. Коммутаторы непосредственно управляют мощными промежуточными реле, контакты которых включены в цепь катушек силовых контакторов коммутирующих секций конденсаторных батарей. Аналого-цифровая система управления реализована на современной микроэлектронной базе с применением микроконтроллера.

На пульте АРМ/ИП имеется светодиодный цифровой дисплей, служащий для отображения режима работы, уставок, значения измеряемой реактивной мощности, коэффициента мощности, тока, напряжения, времени отработки ступени и др. Срабатывание промежуточных реле сопровождается световой индикацией на дисплее контроллера. Контроллером можно управлять с дистанционного пульта управления (ДПУ).

2. Технические характеристики

Контроллер типа АРМ/ИП предназначен для работы под навесом и в закрытых помещениях при соблюдении следующих условий:

- высота над уровнем моря не более 1000 м;
- температура окружающего воздуха от -10 до 40 °С;
- относительная влажность воздуха до 80% при 15 °С;
- допускается использование для работы в среде, насыщенной пылью;
- рабочее положение в пространстве — вертикальное.

Таблица 1

Наименование параметра	Величина
Номинальное напряжение питания регулятора, В	220
Частота питающей сети, Гц	50
Допустимое отклонение напряжения питающей сети от номинального, %	+10
Мощность, потребляемая по цепи питания, ВА	5
Номинальное значение измерительного напряжения, В	100 и 660
Номинальное значение измерительного тока, А	5
Мощность, потребляемая по цепям измерительного напряжения и тока, не более ВА	1
Диапазон уставки реактивной мощности, %	$-60... +60$
Дискретность уставки реактивной мощности, %	0,1
Диапазон ширины зоны нечувствительности реактивной мощности, %	2–25
Дискретность уставки зоны нечувствительности, %	0,1
Интервал времени отработки на коммутацию секций конденсаторной батареи, с	5–90
Дискретность уставки времени, с	1
Погрешность измерения реактивной мощности, не более %	2,5
Максимальное коммутируемое напряжение выходных контактов контроллера, В	380
Максимальный коммутируемый ток выходных контактов контроллера, А	5
Габаритные размеры, мм	200×150×55
Масса, кг	0,7
Исполнение оболочки по ГОСТ 14254-80	IP66
Срок службы контроллера, не менее лет	10

Контроллер эксплуатируется при воздействии климатических факторов, соответствующих исполнению УХЛ, категории размещения 4, тип атмосферы II по ГОСТ 15150-69. Контроллер функционирует и сохраняет свои параметры при воздействии механических факторов, соответствующих группе М6 условий эксплуатации ГОСТ 17516-90. Контроллер является стационарным устройством и предназначен для установки в электротехническом шкафу с коммутационной аппаратурой. Основные технические характеристики приведены в таблице 1.

Электронная часть устройства выполнена на двух печатных платах с поверхностным монтажом и располагается в герметичном пластмассовом боксе, защищенном от попадания пыли и влаги. Бокс при помощи универсальных кронштейнов может крепиться к любой поверхности, например в шкафу или к внутренней стороне дверцы шкафа.

3. Пример схемной реализации контроллера

Рассмотрим пример использования контроллера типа АРМ/ИП при реализации компенсации реактивной мощности индукционной печи типа ИАТ1, которые широко используются на предприятиях. Например, на ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (КУМЗ) они применяются для плавки алюминия и его сплавов. Индукционные печи являются довольно энергоемкими электротехнологическими установками. Мощность печного трансформатора равна 400 кВА. При плавке металла доля реактивной мощности, потребляемой из сети, достигает более 50% от полной мощности. В зависимости от загрузки печи, режима плавки и типа металла РМ изме-

Таблица 2

$U_2, В$	$I_2, А$	$S_2, кВА$	$P_2, кВт$	$Q_2, квар$	$\cos \varphi$	$N_{бат}, секц$
460	291	133	133	10	-0,99	0,3,4
467	320	150	139	56	+0,92	0,1,2,4
468	427	153	139	65	+0,9	0,1,3,4
475	361	169	142	91	+0,85	0,2,3,4
484	439	211	145	152	+0,7	0,1,2,3,4

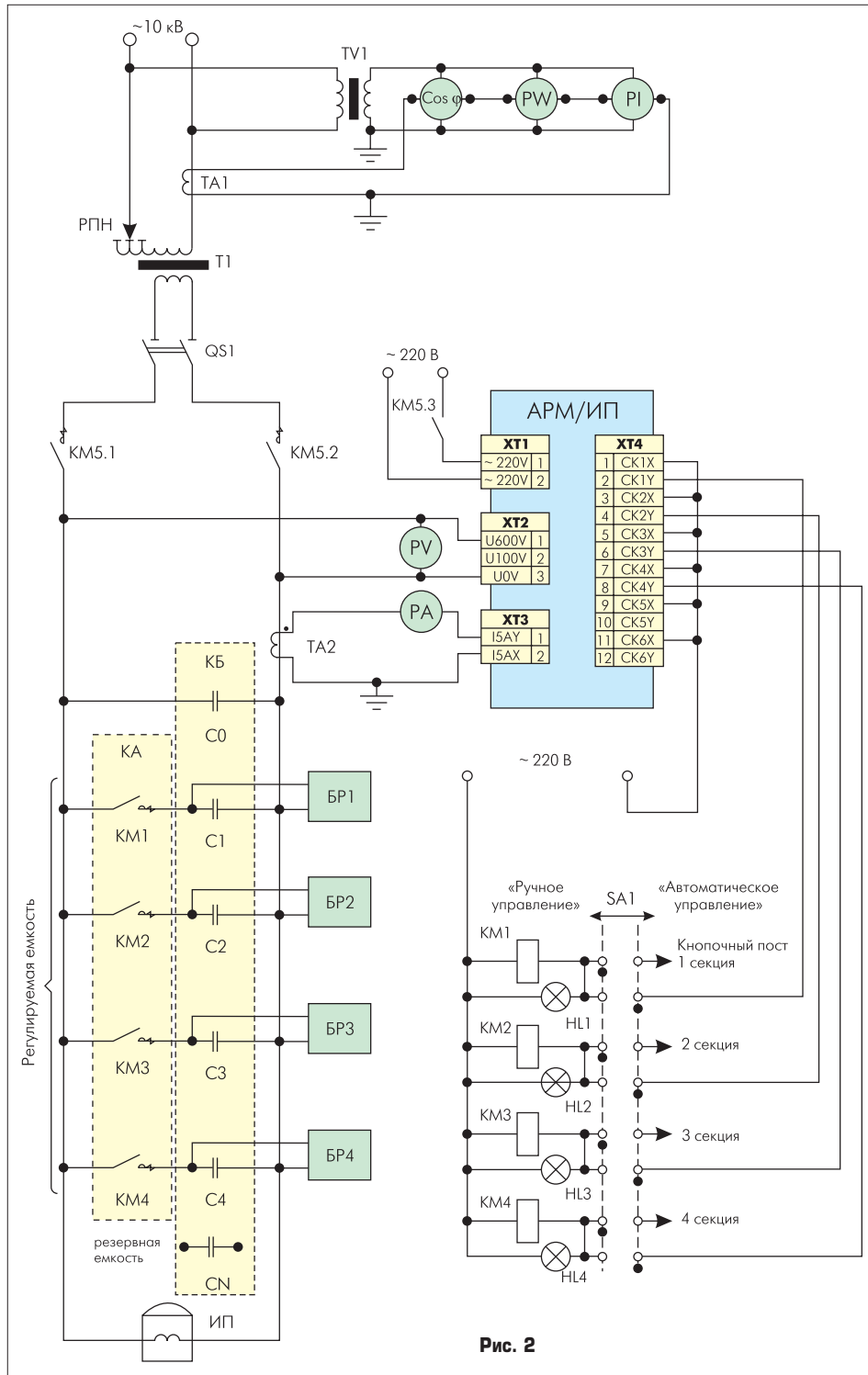


Рис. 2

няется в широких пределах. Соответственно изменяется время плавки и существенно возрастает нагрузка на печной трансформатор и систему электроснабжения.

Силовая схема ИП строится, как правило, по типовой однофазной схеме. Принципиальная электрическая схема ИП типа ИАТ1 приведена на рис. 1. Питание установки осуществляется от сети напряжением 10 кВ. На входе печного трансформатора Т1 установлены эле-

менты энергоконтроля: счетчик активной энергии Р1, ваттметр РW и косинусметр $\cos \varphi$. Регулирование напряжения на вторичной обмотке печного трансформатора Т2 выполняется регулятором под нагрузкой РПН, установленным на первичной обмотке Т1. Батареи конденсаторов включает несколько секций (у ИАТ1 — 5 секций). Четыре секции конденсаторов С1 — С4 коммутируются соответствующими контакторами КМ1 — КМ4, а пятая

секция С0 постоянно подключена к индуктору ИП. Коммутируемые секции конденсаторов соединены с блоками разряда конденсаторов БР1 — БР4. Блоки БР1 — БР4 функционируют после отключения С1 — С4 от индуктора ИП. В большинстве случаев подключение конденсаторов к индуктору ИП производится вручную путем коммутации требуемого количества секций конденсаторов КБ. При этом оператор с кнопочного поста последовательно включает или отключает контакторы и по показаниям косинусметра и ваттметра стремится достичь наилучших энергетических показателей печи. Опыт эксплуатации печи показывает, что ручной способ регулирования РМ очень неудобен. Для поддержания постоянства компенсируемой реактивной мощности требуется часто прибегать к коммутации секций. Поэтому ручное регулирование РМ производится не постоянно, а это приводит к неэффективному режиму плавки металла, повышенному потреблению и дополнительным потерям электроэнергии.

Для детального исследования режимов потребления реактивной мощности НПП «Энергия и экология» были проведены измерения энергетических показателей печи ИАТ1 номинальной мощностью 220 кВА при различных значениях компенсирующей емкости. Результаты энергетических показателей печи ИАТ1 приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, наибольшая активная мощность P_2 печи обеспечивается при малом опережающем коэффициенте мощности. При этом потребляемая электроэнергия наибольшая, а время плавки наименьшее. В результате подключения большей емкости к индуктору суммарное сопротивление нагрузки печного трансформатора уменьшается. По вторичной обмотке печного трансформатора протекает большой ток I_2 , который вызывает повышение напряжения на батарее конденсаторов. Соответственно, напряжение на индукторе печи U_2 возрастает и приводит к увеличению активной (нагревающей металл) мощности. В этом режиме, хотя время плавки и наименьшее, из сети потребляется значительная мощность S_2 . Например, увеличение активной мощности всего на 12% приводит к двукратному увеличению полной мощности печи. Следовательно, для оптимального выбора необходимой емкости конденсаторов необходима система автоматического управления РМ на базе контроллера. Подключение контроллера к цепям коммутации компенсирующих конденсаторов осуществляется довольно просто и быстро. Схема подключения приведена на рис. 2.

Эксплуатация индукционной печи типа ИАТ1 с контроллером АРМ/ИП обеспечивала энергосбережение при ее работе. Оно достигается за счет двух основных факторов. Первый — компенсация реактивной мощности ИП и минимизация потребления мощности индукционной установкой. Второй — рациональное использование электроэнергии на плавку металла в соответствии с режимом работы печи. Следовательно, экономически целесообразно применение контроллера типа АРМ/ИП для индукционных печей промыш-

шленной частоты, которое обусловлено уменьшением удельного электропотребления на 1 т металла и времени плавления.

Литература

1. Электротермическое оборудование: Справочник / Под общ. ред. А. А. Альтгаузена. — 2-е изд. М.: Энергия. 1980.
2. Соколов М. М., Грасевич В. Н. Электрооборудование механизмов электротермических установок. М.: Энергоатомиздат. 1983.
3. Автоматическое управление электротермическими установками: Учебник для вузов / А. М. Кручинин, К. М. Махмудинов, Ю. М. Миронов, В. П. Рубцов, А. Д. Свенчанский. М.: Энергоатомиздат. 1990.
4. Справочник электроэнергетика предприятий цветной металлургии / Под ред. М. Я. Басальгина, В. С. Копытина. М.: Металлургия. 1991.
5. Бакута В. П., Копырин В. С. Автоматическое управление реактивной мощностью в узле нагрузки системы электроснабжения предприятия // Промышленная энергетика. 2002. № 5.
6. Автоматический регулятор компенсации реактивной мощности индукционной печи типа ИАТ1 / А. Н. Южанин, И. А. Загодный, В. А. Сошников, В. С. Копырин, А. А. Ткачук, Е. Г. Бородацкий. В сб. докл. 7-й региональной науч.-практич. конф. «Энергосберегающие техника и технологии». Екатеринбург: Уральские выставки. 2004.
7. Автоматическое регулирование компенсации реактивной мощности индукционной печи типа ИАТ1 / В. С. Копырин, А. А. Ткачук, А. Н. Южанин, И. А. Загодный, В. А. Сошников. В сб. докл. 4-й региональной науч.-практич. конф. «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург: Уральские выставки. 2004.