

# АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПРОФИЛЯМИ ПАЙКИ

Владимир Ланин

[vlanin@bsuir.by](mailto:vlanin@bsuir.by)

Евгений Литвин

Рассмотрены характеристики программируемых контроллеров для управления температурными профилями пайки электронных модулей с поверхностным монтажом. Предложен автоматизированный стенд для управления высокочастотным инвертором и установлены оптимальные технологические параметры индукционного нагрева.

## Введение

Пайка один из древнейших способов соединения материалов известных человечеству. Ее начали применять ещё несколько тысяч лет назад в Риме, Египте и Китае и использовали для изготовления украшений, домашней утвари. Основным преимуществом пайки является возможность формирования паяного шва ниже температуры плавления соединяемых материалов. С увеличением спроса на паяные соединения, развивалась и технология. Изобретались различные нагреватели, способствующие ускорению процесса и упрочнению паяных соединений.

С развитием приборостроения, радиоэлектроники, автомобилестроения и авиастроения резко повысились объемы паяных соединений. Наиболее популярным нагревателем для пайки до сих пор является паяльник, применяемый при лужении и пайке для нагрева деталей, флюса, расплавления припоя и внесения его в место контакта соединяемых деталей. За время его существования предложено множество его усовершенствований: контроль температуры жала, сменные жала, паяльные станции. Появились импульсные и индукционные паяльники, что позволило значительно сократить время пайки.

Однако с приходом поверхностного монтажа, с уменьшением размеров компонентов до почти невидимых глазу, пайка паяльниками вытеснена из серийного производства электронных модулей. Появились высокопроизводительные бесконтактные технологии пайки – нагрев горячим воздухом, индукционный, лазерный и электронно-лучевой нагрев.

Индукционный метод бесконтактного нагрева электропроводящих материалов токами высокой частоты широко применяется в технологии пайки. Основными его преимуществами являются высокоскоростной разогрев электропроводящего материала, возможность нагрева в атмосфере защитного газа, отсутствие загрязнения заготовки, локальность и избирательность нагрева.

Питание индукционных нагревателей осуществляется мощными высокочастотными (ВЧ) генераторами–инверторами. Важнейшие преимущества инверторов – это резкое уменьшение массогабаритных параметров трансформаторов, а также увеличение КПД преобразователей до 100% за счет быстродействующих полупроводниковых ключей. Тем самым удается получить необходимые большие мощности для питания индукторов.

Управляя инвертором можно задавать необходимый режим пайки, выдерживая определенную температуру в течении заданного времени. Управление ВЧ инвертором может осуществляться посредством изменения питающего напряжения силового модуля. При использовании систем управления на основе промышленных контроллеров можно автоматизировать управление термическим циклом процесса пайки при заданных параметрах (табл. 1) (рис. 1) [1].

Таблица 1. Параметры термопрофилей пайки электронных модулей

Параметры термопрофиля	Эвтектический припой Sn-Pb	Бессвинцовый припой
Средняя скорость подъема температуры	3°C/c max	3°C/c max
Предварительный нагрев		
Температура минимальная	100°C	150°C
Температура максимальная	150°C	200°C
Время	60–120 с	60–180 с
Температура плавления, $T_L$	183°C	217°C
Время $t_L$	60–150 с	60–150 с
Пиковая температура, $T_p$	235°C	260°C
Время достижения пиковой температуры	10–30 с	20–40 с
Скорость охлаждения	6°C/c max	6°C/c max
Время охлаждения до 25°C	6 мин max	6 мин max
Количество допустимых циклов оплавления	3	3

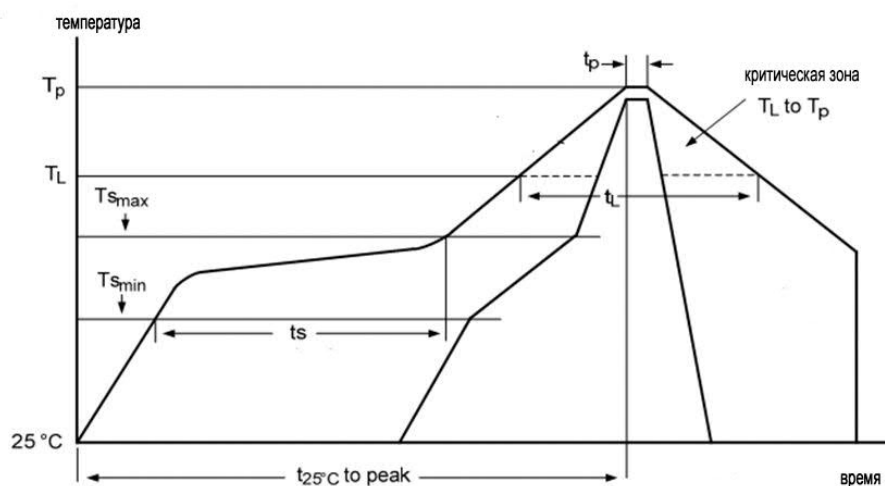


Рис. 1. Рекомендуемый термопрофиль пайки электронных модулей

## Выбор контроллера для управления термопрофилем пайки

В автоматизированных системах управления технологическими установками широко применяются микроконтроллеры, промышленные компьютеры и программируемые логические контроллеры (ПЛК). В отличие от микроконтроллеров с ограниченным количеством входов и выходов, ПЛК имеют модульную структуру: главный модуль с необходимыми интерфейсами и входами питания, большое разнообразие дополнительных модулей, осуществляющих прием, обработку и выдачу различных цифровых и аналоговых сигналов. Количество этих модулей для одного ПЛК ограничено (от 16 до 256 в зависимости от модели), однако существует ряд решений для увеличения их количества (установка промежуточных блоков питания и усилителей сигналов) [2].

В настоящее время производится огромное разнообразие ПЛК, различающихся как фирмой изготовителем, так и поддержкой машинных протоколов. Наиболее известны: Siemens, Wago, Beckhoff, Omron, Mitsubishi. Вне зависимости от особенностей их конструкций и функционала применяют общий стандарт языков программирования ПЛК IEC61131-3, в котором используют 6 основных языков – 4 графических и 2 текстовых.

Модульный программируемый контроллер Siemens SIMATIC S7-400 (рис. 2,а) предназначен для решения сложных задач автоматического управления, имеет широкий спектр модулей для максимальной адаптации к требованиям решаемых задач. ПЛК S7-400 [3] включают в свой состав:

- модуль центрального процессора CPU, а при необходимости используют мультипроцессорные конфигурации, включающие до 4 центральных процессоров, выполняющих параллельную обработку информации;
- сигнальные модули SM, предназначенные для ввода и вывода дискретных и аналоговых сигналов;
- коммуникационные процессоры CP для организации сетевого обмена данными через Industrial Ethernet, PROFINET, PROFIBUS или PtP интерфейс;
- интеллектуальные модули FM для решения задач позиционирования, автоматического регулирования и управления.

Основное преимущество данного контроллера заключается в возможности комплектоваться различными типами центральных процессоров, которые отличаются вычислительными возможностями, объемами памяти, быстродействием, количеством встроенных интерфейсов. Для программирования и конфигурирования контроллеров S7-400 используется пакет STEP 7, весь спектр инструментальных средств проектирования и программное обеспечение Runtime.

Контроллер Wago 750-8202 (рис. 2,б) представляет собой компактный ПЛК, полностью совместимый с модульной системой WAGO-I/O. Кроме сетевых и полевых интерфейсов, контроллер поддерживает все дискретные, аналоговые и специальные модули, входящие в серии 750/753. Два ETHERNET порта и встроенный коммутатор позволяют объединять контроллеры в сеть по линейной топологии без

дополнительных устройств. Встроенный web-сервер предоставляет пользователю возможности конфигурирования и информацию о состоянии PFC 200 [4].



а

б

**Рис. 2.** Контроллеры Siemens SIMATIC S7-400 (а) и Wago 750-8202(б)

Данный контроллер использует процессор ARM Cortex A с тактовой частотой 600 МГц, энергонезависимой памятью объемом 128 Кбайт и оперативной памятью 256 Мбайт. В качестве интерфейса связи серийный порт, переключаемый между RS232 и RS485, может быть заменен на разъем CAN или Profibus.

Beckhoff CX9000 (рис. 3,а) является компактным, устанавливаемым на DIN-рейку контроллером шины Ethernet с процессором Intel ® IXP420 с технологией XScale, имеющим тактовую частоту 266 МГц. Модуль связи с системой ввода/вывода интегрирован в процессорный модуль. CX9000 выпускается в двух версиях: одна для подключения модулей шины K-bus, а другая для подключения модулей EtherCAT шины E-bus. CX9000 включает в себя процессор, внутреннюю флэш-память, ОЗУ, а также энергонезависимую память NOVRAM [5].



а

б

**Рис. 3.** Контроллеры Beckhoff CX9000 (а) и Omron CJ2M (б)

Два разъема интерфейса Ethernet (разъемы RJ 45) также являются частью базовой конфигурации. Эти интерфейсы соединены внутренним переключателем, что позволяет создавать топологию последовательного соединения устройств Ethernet без дополнительных переключателей. В качестве дополнительной опции предлагается модуль для подключения флеш-накопителя типа Compact Flash типа I или II. Операционная система контроллера CX9000 - Microsoft Windows CE. ПО TwinCAT превращает контроллер CX9000 в мощный ПЛК и контроллер системы позиционирования, которая может работать с или без визуализации. Опция CX9000- N010 позволяет подключать панели управления Beckhoff или стандартные мониторы с интерфейсом DVI или VGA через DVI и USB разъемы. Устройства типа принтера, сканера, мыши, клавиатуры, и т.д. могут быть подключены через интерфейс USB 2.0. Модуль CX9000-N031 предлагает два дополнительных последовательных интерфейса RS485 с максимальной скоростью передачи 115 Кбод.

Серия контроллеров CJ2M (рис. 2,б) подходит для применения в автоматизированных технологических линиях и другом оборудовании промышленного назначения. Подключение к контроллеру возможно через встроенный порт USB или предоставляемый на выбор порт Ethernet / последовательный порт RS-232C/422/485 [6]. Емкость памяти программ варьируется в широких пределах: от 5К до 60К шагов. Специальная память для функциональных блоков гарантирует эффективное выполнение программных модулей.

Контроллеры MELSEC System Q (рис. 4) являются самыми мощными и высокопроизводительными ПЛК Mitsubishi с модульной структурой и мультипроцессорной технологией. По своим возможностям они превосходят хорошо известные компактные ПЛК блочного типа серии FX, а также контроллеры модульного типа серии L. Модульная структура контроллера позволяет подобрать оптимальное сочетание процессорных модулей, модулей коммуникации, специальных модулей и модулей ввода/вывода в соответствии с конкретными требованиями.



**Рис. 4.** Контроллер Mitsubishi MELSEC System Q

В зависимости от выбранного типа процессорного модуля CPU адресное пространство контроллера может составлять до 4096 локальных (до 8192 удаленных) точек ввода/вывода. CPU и модули устанавливаются в базовом шасси, которое имеет внутреннюю шину для обеспечения связи между отдельными модулями

и CPU. Модуль источника питания также установлен в базовом шасси. Базовые шасси доступны в 4 различных версиях с количеством посадочных мест модулей от 3 до 12. Базовые шасси могут быть дополнены шасси расширения, обеспечивающим добавочные посадочные места. Емкость RAM, ROM, FLASH может быть выбрана до 32 Мб. Имеется возможность многопроцессорного режима, в котором установленные ЦПУ (до 4-х) могут выполнять независимые задачи или могут разделить свои ресурсы на выполнение одной большой задачи.

Сравнительная характеристика рассмотренных выше контроллеров дана в табл. 2.

**Таблица 2.** Сравнительная характеристика контроллеров

Тип контроллера	Тактовая частота процессора, МГц	Оперативная память, МБ	Flash память, МБ	Поддержка SD-карт	Количество подключаемых модулей
Siemens SIMATIC S7-400	16-60	0,15-16	0,15-16	+	128
Wago 750-8202	600	256	256	+	64
Beckhoff CX9000	266	64-128	16-32	-	64
Omron CJ2M	25	0,32-1	0,32-1	-	40
Mitsubishi MELSEC System Q	5-32	0,032-0,256	1-32	-	64

У каждого из рассмотренных выше контроллеров есть свои достоинства и недостатки. У Siemens SIMATIC S7-400 и Mitsubishi MELSEC System Q представлена большая линейка процессоров под разные задачи, однако собственная среда разработки и особенности конструкции требуют большого опыта в работе с данными контроллерами. Контроллер Omron CJ2M хорошо подойдет для решения небольших задач, однако в крупных проектах проявится недостаток в небольшом количестве подключаемых модулей и мощности главного процессорного блока. Серия контроллеров Wago 750-8202 характеризуется высокой мощностью процессорного блока, большим количеством различных модулей и поддержкой среды разработки Codesys, распространенной среди разработчиков систем автоматизации. К недостаткам стоит отнести высокую стоимость процессорного блока и модулей.

Контроллер Beckhoff CX9000 выделяется наличием большого количества одновременно подключаемых интерфейсов связи (COM, USB, DVI, Ethernet), большим объемом энергонезависимой и оперативной памяти, простотой в обслуживании и средней ценой.

## Автоматизированный стенд управления ВЧ инвертором

Для автоматизированного стенда управления ВЧ инвертором использованы программируемый логический контроллер Beckhoff CX9000 и панель оператора WeintekMT607i (рис. 5).

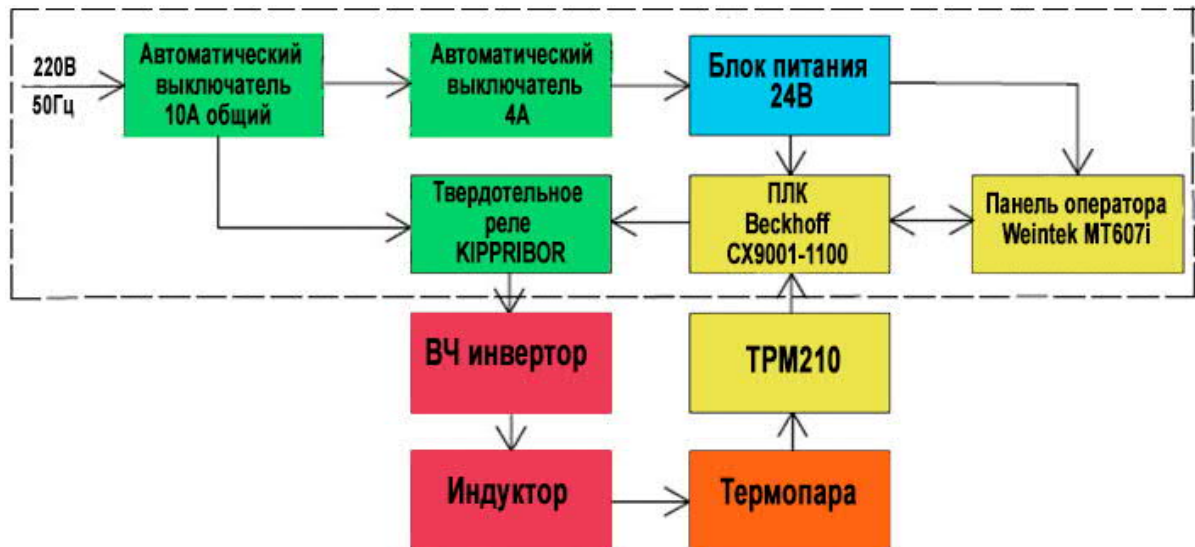


Рис. 5. Схема автоматизированного стенда

Твердотельное реле серии HD2522.10U применено для непрерывного регулирования напряжения нагрузки от 0 до 230 В пропорционально входному сигналу управления. Максимально допустимые рабочие токи составляют 20 А. Одноканальный модуль аналогового выхода KL4001 управляется контроллером по шине К-BUS. Задавая значение переменной от 0 до 32767, на выходе модуля регулируется напряжение от 0 до 10 В. Автоматические выключатели ETI ETIMAT 6 C10 2P и ETI ETIMAT 6 C4 2P ограничивают ток потребления в 10 А и 4А соответственно по двум подключенным полюсам.

На передней панели установлена панель оператора WeintekMT607i, на которой можно выбрать необходимый режим нагрева, величину питающего напряжения инвертора, наблюдать термограмму и текущие показатели термопары (рис. б). Данная панель представляет собой 7 дюймовый сенсорный резистивный экран разрешением 800x480 пикселей в паре с процессором ARM RISC, тактовой частотой 400 МГц, 64 Мб оперативной памяти и 128 Мб встроенной flash памяти. В качестве интерфейсов связи выступают два COM порта, переключаемые между RS232 и RS485, два USB порта (USB 1.1 и USB 2.0), слот для SD карт, Ethernet и линейный аудиовыход [7].

Принцип работы стенда следующий: сетевое напряжение через автоматические выключатели попадает на блок питания, преобразующий сетевое напряжение в напряжение питания 24 В для панели оператора и контроллера. Контроллер с помощью модуля аналогового выхода управляет силовым модулем, изменяя напряжение питания ВЧ инвертора от 0 до 230 В.



**Рис. 6.** Панель оператора Weintek MT607i

Показания термопары считываются цифровым измерителем-регулятором температуры TPM210, передаются на контроллер и отображаются на панели оператора промышленного компьютера в виде графика. Изменяя напряжение питания инвертора, регулируют скорость нагрева детали в индукторе, подключенном к высокочастотному инвертору. Так же возможна регулировка частоты управляющих импульсов от 60 до 300 кГц.

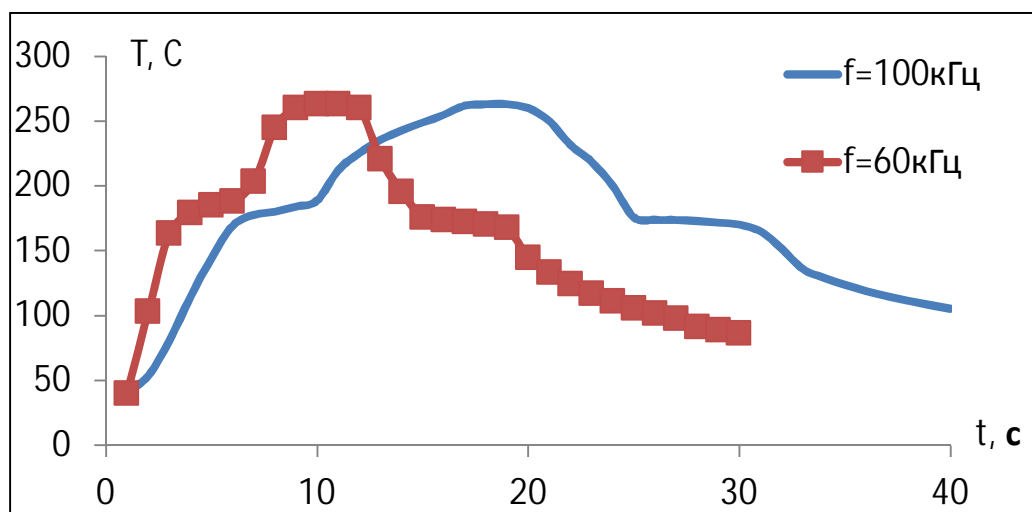
Для управления ВЧ инвертором необходимо разработать программные средства для контроллера Beckhoff CX9001-1100 и панели оператора Weintek MT607i. Программирование контроллера осуществляется программным обеспечением TwinCAT 2. Для конфигурирования контроллера используется TwinCAT System Manager. TwinCAT PLC Control необходима для создания и отладки программы контроллера. Для создания программы с визуальным отображением информации для оператора используется InduSoft Web Studio 6.1. Передача информации между контроллером, панелью оператора и измерителем TPM210 производится с помощью протокола Modbus RTU по интерфейсу RS485.

Подключив ко входу термопару, наблюдают текущее значение температуры датчика на индикаторе. Это значение измеряется и передается в сеть MODBUS-RTU по интерфейсу RS-485. Таким образом, записывают измерения на персональном компьютере с помощью преобразователя OWEN RS585-USB, либо на любом другом устройстве, поддерживающем данный протокол и физический интерфейс.

### **Исследование режимов работы ВЧ инвертора**

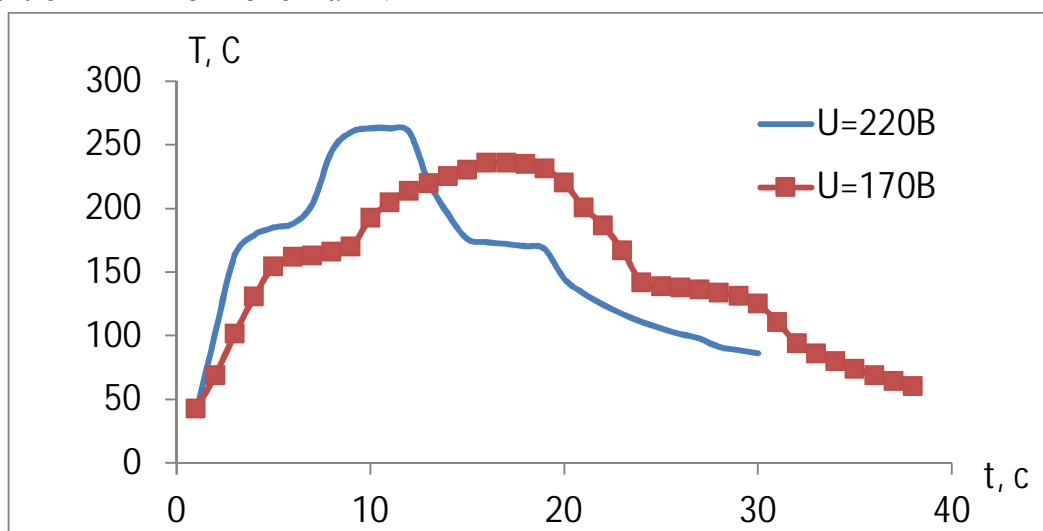
Термопрофили ВЧ нагрева деталей на двух частотах 60 и 100 кГц приведены на рис. 7. Как видно из графиков, скорость нагрева выше на более низкой частоте, что связано с глубиной проникновения вихревых токов. При разнице частот в 40 кГц, максимальная скорость при 60 кГц составила около 50°C/с, а при частоте 100 кГц – около 30°C/с. На участке предварительно нагрева от 150 до 200°C скорость нагрева автоматически снижалась до 8–10°C/с.





**Рис. 7.** Термограмма индукционного нагрева на разных частотах

Скорость нагрева на начальном участке зависит также от питающего напряжения (рис. 8). При напряжении питания ВЧ инвертора 170 В, скорость нагрева уменьшилась почти в 2 раза, относительно сетевого напряжения питания. При этом реализуется более плавный нагрев паяльной пасты на контактных площадках с установленными компонентами.



**Рис. 8.** Термограмма индукционного нагрева при разном напряжении

### Заключение

Предложен автоматизированный стенд управления ВЧ инверторами на базе программируемых логических контроллеров с заданными температурными профилями пайки элементов поверхностного монтажа. На основании термограмм выбран оптимальный режим нагрева ВЧ инвертором с необходимой скоростью и максимальной пиковой температурой. Оптимальные условия индукционного нагрева: напряжение питания 250 В, частота 60 кГц, ток в обмотке индуктора 5 – 6А, время нагрева 8 –10 с до температуры 300–350°C.

## Литература

1. IPC/JEDEC J-STD-020D.1. Joint Industry Standard. [www.adeptotech.com](http://www.adeptotech.com).
2. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия - Телеком. 2009.
3. <http://abn.by/Product/Controller/Siemens/S7-400>.
4. <http://www.wago-klemmy.ru/catalog/automation/controllers/750-8202>.
5. <http://www.beckhoff-automation.ru>.
6. <https://industrial.omron.ru>.
7. Ланин В.Л., Литвин Е.А., Васильев А.С. Высокочастотный инвертор для индукционного преобразователя на магнитопроводе //Современные средства связи. Труды XIX Международной научн.-технич. конф. 14–15 октября 2015, Минск, ВГКС.