

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ОБОРУДОВАНИЕМ ПРИ СВАРКЕ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 1-36 01 06
«Оборудование и технология сварочного производства»
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2022

УДК 621.791
ББК 32.965
У67

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» «2» февраля 2022 г., протокол № 8

Составитель канд. техн. наук, доц. С. М. Фурманов

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Методические рекомендации к лабораторным работам по дисциплине «Управление процессами и оборудованием при сварке» предназначены для студентов специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства» дневной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ОБОРУДОВАНИЕМ ПРИ СВАРКЕ

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	Т. А. Рыжикова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Исследование управления скоростью вращения вентилятора в режиме ШИМ с использованием термистора NTC и AVR-микроконтроллера ATmega128.....	4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование работы программно-аппаратного комплекса для управления машиной конденсаторной сварки МТК-1601 на основе системы сбора данных NI USB и программной среды LabVIEW.....	15
3 Лабораторная работа № 3. Система активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке.....	24
4 Лабораторная работа № 4. Разработка программы управления процессом контактной рельефной сварки Т-образных соединений по величине и скорости перемещения подвижного электрода	37

1 Лабораторная работа № 1. Исследование управления скоростью вращения вентилятора в режиме ШИМ с использованием термистора NTC и AVR-микроконтроллера ATmega128

Цель работы

1 Изучить особенности программной и аппаратной реализации временных функций, режимы работы и порядок программирования таймеров микроконтроллера, реализацию временных функций с помощью языка программирования C.

2 Разработать программу ШИМ-управления скоростью вращения вентилятора с использованием датчика температуры.

1.1 Оборудование, приборы и материалы

1 AVR-микроконтроллер ATmega128 с развитой RISC-архитектурой.

2 Учебный стенд СУ-МК НТЦ-31.100.

3 Цифровой запоминающий осциллограф типа GDS-71022.

4 Персональная ЭВМ.

5 Интегрированная среда разработки программного обеспечения для микроконтроллеров AVR «IAR Embedded Workbench for Atmel AVR kickstart».

1.2 Общие теоретические сведения

1.2.1 Таймеры-счетчики.

В состав AVR-микроконтроллера ATmega128 входят два 16-разрядных таймера-счетчика (T/C1 и T/C3) и два 8-разрядных (T/C0 и T/C2), предназначенных для точного задания временных интервалов, генерации прямоугольных импульсов и измерения временных характеристик импульсных сигналов. Укрупненная функциональная схема 16-разрядного таймера-счетчика показана на рисунке 1.1. Индекс x заменяет номер таймера-счетчика (1 или 3).

Регистр счета (TCNTx), регистры порогов сравнения (OCRxA/B/C), а также регистр захвата (ICRx) являются 16-разрядными. Регистры управления таймером (TCCRxA/B/C) являются 8-разрядными.

Таймер-счетчик может тактироваться внутренним сигналом через предделитель или внешним тактовым источником, подключенным к выводу T_x. Блок выбора тактового источника позволяет выбрать источник и фронт, по которому будет изменяться состояние таймера-счетчика. Если тактовый источник не задан, то таймер-счетчик находится в неактивном состоянии. Сигнал на выходе блока выбора тактового источника TCLK является тактовым сигналом таймера.

1.2.2 Обработка прерываний.

Прерывания – это вызовы определенных функций, генерируемые главным

образом аппаратной частью микроконтроллера. В результате прерывания выполнение программы останавливается, и происходит переход к соответствующей подпрограмме обработки прерывания.

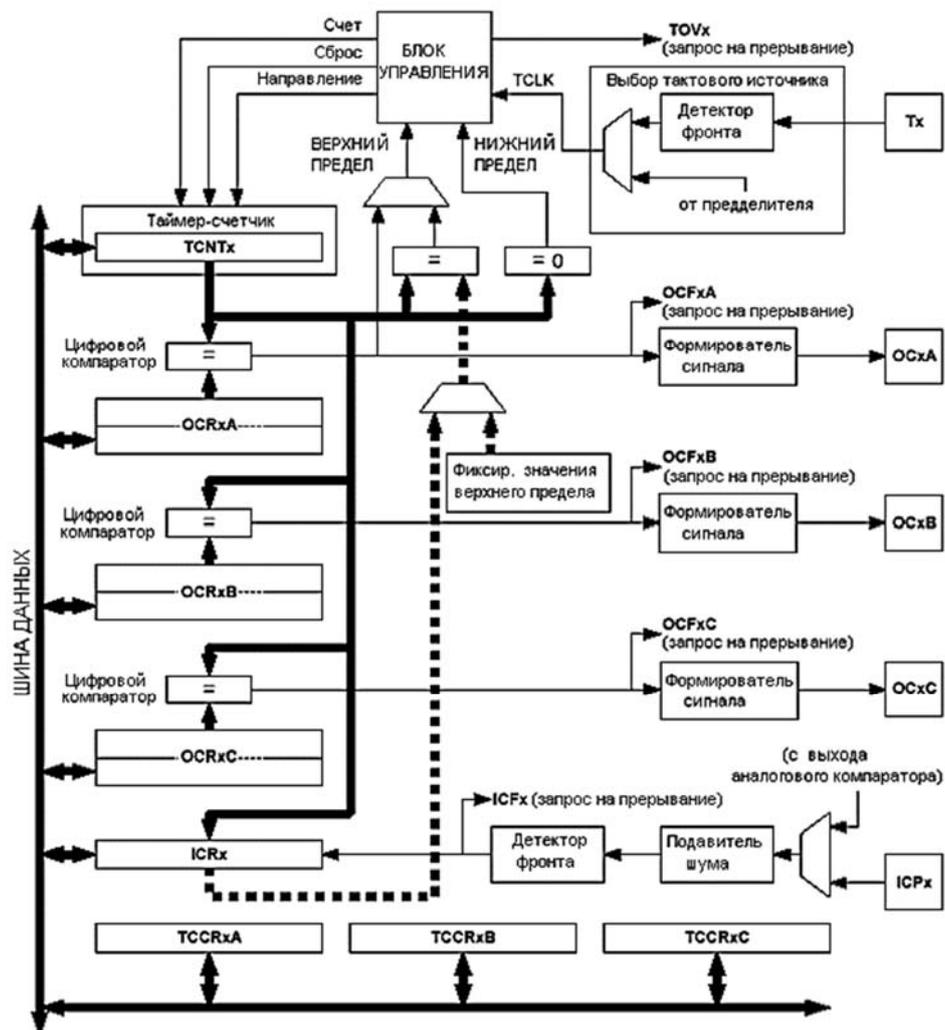


Рисунок 1.1 – Укрупненная функциональная схема 16-разрядного таймера-счетчика

Прерывания бывают внутренними и внешними. Источниками внутреннего прерывания являются встроенные модули микроконтроллера (например, таймер/счетчик или сторожевой таймер). Внешние прерывания вызываются сбросом (сигнал на выводе RESET). Всем прерываниям, включая сброс, поставлен в соответствие собственный **вектор прерывания** – адрес в начальной области памяти программ, по которому компилятор размещает команду перехода к подпрограмме обработки прерывания.

В момент возникновения прерывания в стек помещается адрес возврата – адрес команды, которая должна быть выполнена первой после выхода из подпрограммы обработки прерывания. В результате выполнения последней ассемблерной команды подпрограммы обработки прерывания (для микроконтроллеров AVR – это команда RETI) адрес возврата извлекается из стека в счетчик команд, и выполнение программы продолжается.

В микроконтроллерах AVR за управление прерываниями от таймеров/счетчиков отвечают следующие регистры (таблица 1.1):

TIMSK (Timer/Counter Interrupt Mask Register) – регистр маскирования прерываний от таймеров-счетчиков;

ETIMSK – регистр маски расширенных прерываний;

TIFR (Timer/Counter Interrupt Flag Register) – регистр флагов прерываний от таймеров-счетчиков;

ETIFR – регистр флагов расширенных прерываний.

О состоянии прерывания сигнализирует соответствующий флаг, который устанавливается или сбрасывается в регистре флагов. Даже если в регистре маски прерываний установлен соответствующий отдельный разряд разрешения прерывания, то прерывания могут активизироваться только тогда, когда в регистре состояния **SREG** установлен разряд общего разрешения прерываний I (разряд 7).

Таблица 1.1 – Структура регистров **TIMSK**, **ETIMSK**, **TIFR**, **ETIFR**, отвечающих за управление прерываниями от таймеров-счетчиков микроконтроллера AVR

Разряд	7	6	5	4	3	2	1	0
TIMSK	OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	OCIE0	TOIE0
ETIMSK	–	–	TICIE3	OCIE3A	OCIE3B	TOIE3	OCIE3C	OCIE1C
TIFR	OCF2	TOV2	ICF1	OCF1A	OCF1B	TOV1	OCF0	TOV0
ETIFR	–	–	ICF3	OCF3A	OCF3B	TOV3	OCF3C	OCF1C

Когда разряд **TOIE1** регистра **TIMSK** установлен в логическую единицу (лог. 1), то разрешено прерывание при переполнении таймера-счетчика T/C1. В случае переполнения в регистре **TIFR** устанавливается флаг **TOV1**.

Если разряд **TICIE1** установлен в логическую единицу, то разрешается прерывание при выполнении условия захвата. Когда возникает срабатывание по захвату, в регистре **TIFR** устанавливается флаг **ICF1**.

Если разряды **OCIE1A** или **OCIE1B** установлены в лог. 1, то разрешено прерывание при совпадении содержимого регистров сравнения A или B с текущим состоянием таймера-счетчика T/C1. В случае совпадения в регистре **TIFR** устанавливаются флаги **OCF1A** или **OCF1B** соответственно.

Если разряд **OCIE1C** регистра **ETIMSK** установлен в логическую единицу, то разрешается прерывание при совпадении содержимого регистра сравнения C с текущим состоянием таймера-счетчика T/C1. В случае совпадения в регистре **ETIFR** устанавливается флаг **OCF1C**.

ICF1 – флаг захвата состояния таймера-счетчика T/C1. Флаг устанавливается, если на входе **ICR1** определяется условие захвата.

Установка в логическую единицу одного из флагов в регистре **TIFR** приводит к переходу по соответствующему вектору прерывания. При входе в подпрограмму обработки прерывания флаг в регистре **TIFR** аппаратно сбрасывается в логический нуль.

Назначение отдельных регистров таймера-счетчика T/C1:

TCNT1 – счетный регистр (содержимое счетчика);

TCCR1A – регистр управления для определения реакции выводов OC1A/OC1B в случае совпадения состояния счетчика в регистре TCNT1 с регистрами сравнения OCR1A/OCR1B, а также для выбора режима широтно-импульсной модуляции;

TCCR1B – регистр управления для настройки делителя частоты, для разрешения подачи сигнала сброса для регистра TCNT1 и для управления захватом;

ICR1 – регистр захвата по входу (при появлении на выводе ICF1 фронта входного сигнала, определенного как активный, текущее состояние счетчика будет перенесено в этот регистр);

OCR1A, OCR1B – регистры сравнения; их содержимое постоянно сравнивается с состоянием счетчика. В случае совпадения выполняются действия, определенные регистром **TCCR1A**.

Регистры управления таймером-счетчиком T/C1 **TCCR1A** и **TCCR1B** представлены в таблице 1.2. Режимы работы таймера-счетчика T/C1 и коэффициент деления частоты осциллятора определяются с помощью разрядов CS12, CS11 и CS10 регистра **TCCR1B** (таблица 1.3).

Таблица 1.2 – Регистры управления TCCR1A и TCCR1B таймера-счетчика T/C1

Разряд	7	6	5	4	3	2	1	0
TCCR1A	COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	COM1C1	COM1C0	WGM11	WGM10
TCCR1B	ICNC1	ICES1	-	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10

Таблица 1.3 – Выбор режима и входного такта для таймера-счетчика T/C1

CSx2	CSx1	CSx0	Описание
0	0	0	Нет синхронизации. Таймер-счетчик остановлен
0	0	1	Режим «Таймер», такт = такт системной синхронизации
0	1	0	Режим «Таймер», такт = такт системной синхронизации / 8
0	1	1	Режим «Таймер», такт = такт системной синхронизации / 64
1	0	0	Режим «Таймер», такт = такт системной синхронизации / 256
1	0	1	Режим «Таймер», такт = такт системной синхронизации / 1024
1	1	0	Режим «Счетчик», такт – внешний на входе T1, активный фронт сигнала – падающий
1	1	1	Режим «Счетчик», такт – внешний на входе T1, активный фронт сигнала – нарастающий

Разряды COM1A1/COM1A0, COM1B1/COM1B0 и COM1C1/COM1C0 определяют состояние выводов OC1A/OC1B/ OC1C при совпадении содержимого регистров сравнения A/B/C с содержимым счетчика.

Когда регистр управления **TCCR1A** определяет работу в конфигурации широтно-импульсного модулятора, то T/C1 работает как суммирующий и вычитающий счетчик, осуществляя циклические переходы от 0x0000 к максимальному значению TOP и затем снова возвращаясь к 0x0000. При запрограммированной разрешающей способности ШИМ в N разрядов значение TOP рассчитывается как

$$TOP = 2^N - 1.$$

Частота f_{PWM} повторения циклов ШИМ вычисляется по формуле

$$f_{PWM} = f_{T/C1} / (2^{N+1} - 2),$$

где частота таймера/счетчика $f_{T/C1}$ выбирается с помощью разрядов CS10–CS12 регистра **TCCR1B** (см. таблицу 1.3), а режим широтно-импульсной модуляции и разрешающая способность N – с помощью разрядов WGM13:2 регистра **TCCR1B** и WGM11:0 регистра **TCCR1A** (таблица 1.4).

Когда состояние счетчика в регистре **TCNT1** совпадает со значением 10 младших разрядов регистра **OCR1A/OCR1B/OCR1C**, то в зависимости от состояния разрядов **COM1A1/COM1A0**, **COM1B1/COM1B0** или **COM1C1/COM1C0** регистра **TCCR1A** вывод **OC1A/OC1B/OC1C** последующим тактовым импульсом устанавливается или сбрасывается (таблица 1.5).

Таблица 1.4 – Выбор режима ШИМ с помощью разрядов WGM13:0

WGM13	WGM12	WGM11	WGM 10	Режим работы таймера-счетчика	Верхний предел TOP	Частота ШИМ
0	0	0	0	Режим ШИМ не активен		
0	0	0	1	8-разрядная ШИМ ФК	0x00FF (255)	$f_{T/C1} / 510$
0	0	1	0	9-разрядная ШИМ ФК	0x01FF (511)	$f_{T/C1} / 1022$
0	0	1	1	10-разрядная ШИМ ФК	0x03FF (1023)	$f_{T/C1} / 2046$

Таблица 1.5 – Возможности выбора для режима сравнения при работе ШИМ

COM1x	COM1x	Действие в случае совпадения
0	0	На выводе OC1x нет никакого сигнала
0	1	На выводе OC1x нет никакого сигнала
1	0	Неинвертирующий широтно-импульсный модулятор. В случае совпадения при суммирующем подсчете регистра TCNT1 со значением регистра OCR1A/OCR1B/OCR1C на выводах OC1A/OC1B/OC1C устанавливается логический нуль, а при подсчете с вычитанием – логическая единица
1	1	Инвертирующий широтно-импульсный модулятор. В случае совпадения при суммирующем подсчете регистра TCNT1 со значением регистра OCR1A/OCR1B/OCR1C на выводах OC1A/OC1B/OC1C устанавливается логическая единица, а при подсчете с вычитанием – логический нуль

В случае неинвертирующего широтно-импульсного модулятора коэффициент заполнения g прямоугольного сигнала на выводе с ШИМ соответствует значению $n / (2N - 1)$, где n – значение в соответствующем регистре **OCR1A/B/C**, а N – разрешающая способность ШИМ в разрядах (рисунок 1.2).

Если регистр сравнения **OCR1A/OCR1B** содержит значение TOP или 0, то на соответствующем выводе в соответствии с правилами, представленными в

таблице 1.6, постоянно поддерживается уровень логического нуля или логической единицы.



Рисунок 1.2 – Определение периода T , коэффициента заполнения g и среднего арифметического U_{AV} прямоугольных импульсов напряжения U

Таблица 1.6 – Вывод ШИМ для особых случаев $OCR1x = TOP$ или $OCR1x = 0$

COM1x1	COM1x0	OCR1x	Вывод OC1x
1	0	0	0
1	0	TOP	1
1	1	0	1
1	1	TOP	0

В режиме ШИМ устанавливается флаг переполнения TOV1, если счетчик при достижении состояния 0 меняет направление счета на обратное. Это прерывание по T/C1 при переполнении, как и при нормальной работе в режиме счетчика, вызывается в том случае, если установлен флаг общего разрешения прерываний I в регистре состояния SREG, а также флаг TOIE1 в регистре TIMSK. В соответствии с этим прерывания при совпадении регистров TCNT1 и OCR1B/OCR1C вызываются тогда, когда в регистре TIMSK установлен флаг OCIE1B, а в регистре ETIMSK – флаг OCIE1C.

1.2.3 Пример формирования выходных ШИМ-сигналов.

На рисунке 1.3 на примере фиктивной трехразрядной ШИМ показано формирование неинвертированного и инвертированного ШИМ-сигналов на выходе OC1B. На диаграмме А приведен примерный вид ступенчатого сигнала, соответствующий состоянию счетчика TCNT1, на диаграмме В – неинвертированный, а на диаграмме С – инвертированный выходные сигналы. Продолжительность периода T_{PWM} в этом случае вычисляется в соответствии с рассмотренным выше уравнением $T_{PWM} = T_{T/C1}(2^{N+1} - 2)$. Таким образом, при $N = 3$ период ШИМ-сигнала состоит из 14 периодов тактового сигнала $f_{T/C1}$ на входе TCNT1.

В примере регистр сравнения OCR1B содержит значение 5. В регистре TCNT1, с учетом того, что его исходное значение равно 0, значение 5 появляется после пяти тактовых импульсов. На следующем тактовом импульсе после распознавания совпадения на выводе OC1B устанавливается уровень логического нуля.

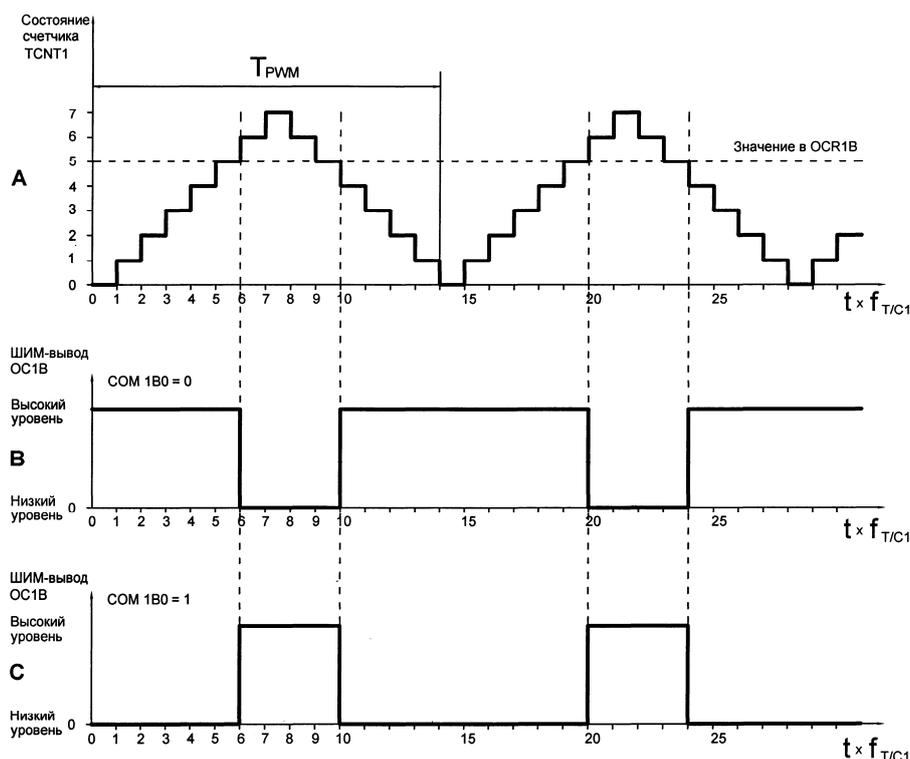


Рисунок 1.3 – Формирование неинвертированных и инвертированных ШИМ-сигналов

Регистр **TCNT1** инкрементируется далее до тех пор, пока не будет достигнуто значение **TOP**, которое при трехразрядной ШИМ составляет 7. Как только достигнуто значение **TOP**, направление счета меняется на обратное, и регистр выполняет вычитание. После девятого тактового импульса, начиная от стартового значения 0, содержимое регистра **TCNT1** опять совпадает с содержимым регистра **OCR1B**. На следующем тактовом импульсе на выходе **OC1B** устанавливается уровень лог. 1.

Регистр **TCNT1** декрементируется далее до тех пор, пока опять не будет достигнуто значение 0. Это происходит после четырнадцати тактовых импульсов, считая от начального значения 0. Таким образом завершается период ШИМ-сигнала, направление счета вновь меняется на обратное и регистр **TCNT1** опять выполняет сложение. Как видно из рисунка 1.3 (диаграмма В), «высокая» составляющая выходного сигнала держится в течение 10 тактовых периодов, а «низкая» – в течение четырех. Таким образом, коэффициент заполнения $g = 10/14$ или $g = 5/7$. Аналогично диаграмма С показывает соотношения для инвертированного выходного ШИМ-сигнала.

1.3 Порядок выполнения работы

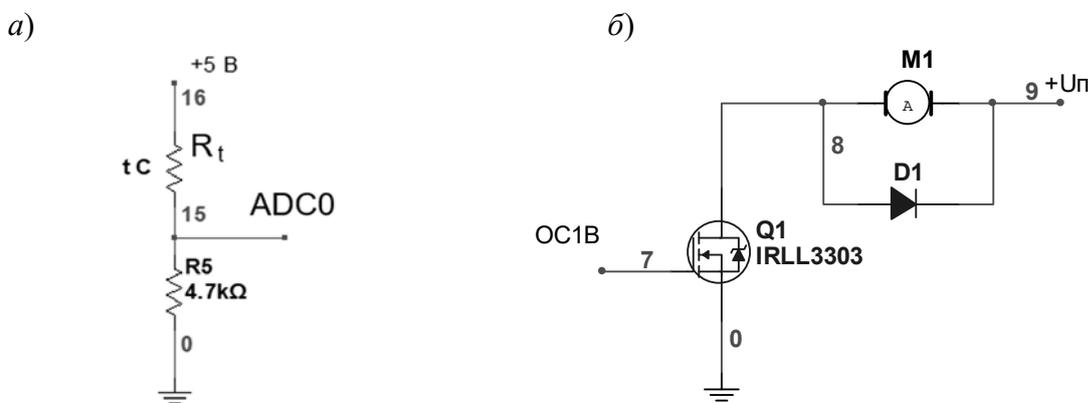
1 Изучить следующий пример выполнения задания.

Разработать программу для учебного стенда НТЦ-31.100, позволяющую осуществлять управление скоростью вращения вентилятора с учетом показаний датчика температуры. Данные о текущей температуре и относительной скорости вращения вентилятора будут отображены на семисегментном индикаторе.

2 Проанализировать задачу. Замер температуры осуществляется с помощью термистора (терморезистора) с отрицательным температурным коэффициентом NTC (Negative Temperature Coefficient). Такие устройства выпускаются для широкого диапазона температур и при правильном подборе не требуют специального усиления или предварительной обработки сигналов. Поскольку термистор выдает значения в виде процентов сопротивления на градусы Цельсия, для измерения температуры можно воспользоваться резистивным делителем. Диапазон выходных напряжений делителя также можно приспособить к диапазону АЦП, обеспечив таким образом наилучшее разрешение.

В микроконтроллерах AVR ко входу АЦП обычно подключают цепи с небольшим выходным импедансом (около 5 кОм или ниже). Выберем резистор на 4,7 кОм для формирования делителя с термистором $R_t = 1$ кОм (приблизительное сопротивление при 23 °С) (рисунок 1.4, а). Термистор размещен в верхнем плече делителя, поскольку его отрицательный импеданс изменяется с температурой. В результате с повышением температуры будет повышаться и напряжение на входе АЦП. В качестве аналогового входа, к которому подключен выход резистивного делителя с термистором, используется вывод порта F – PORTF0/ADC0.

Для приведения в действие вентилятора воспользуемся электродвигателем на 12 В, схема подключения которого представлена на рисунке 1.4, б. Исходя из этой схемы, управлять скоростью вращения можно в режиме ШИМ таймера-счетчика T/C1 с помощью выхода OC1B.



а – делителя с термистором; б – подключения электродвигателя вентилятора

Рисунок 1.4 – Электрическая принципиальная схема

Текущее сопротивление терморезистора R_t вычисляется на основании регистра данных ADC, в котором хранится результат аналого-цифрового преобразования, с учетом схемы делителя (см. рисунок 1.4, а):

$$R_t = 1023 \cdot 4700 / \text{ADC} - 4700.$$

Для выбранного термистора на основании экспериментальных данных был построен график взаимосвязи температуры и сопротивления $T = f(R_t)$ (рису-

нок 1.5), которая аппроксимируется следующей формулой:

$$T = a + b \cdot R_t + c \cdot R_t^2 + d \cdot R_t^3 + e/R_t,$$

где a, b, c, d, e – коэффициенты уравнения; $a = 63,657$; $b = -0,0836$; $c = 5,238E - 05$; $d = -1,43E - 08$; $e = 5111,287$.

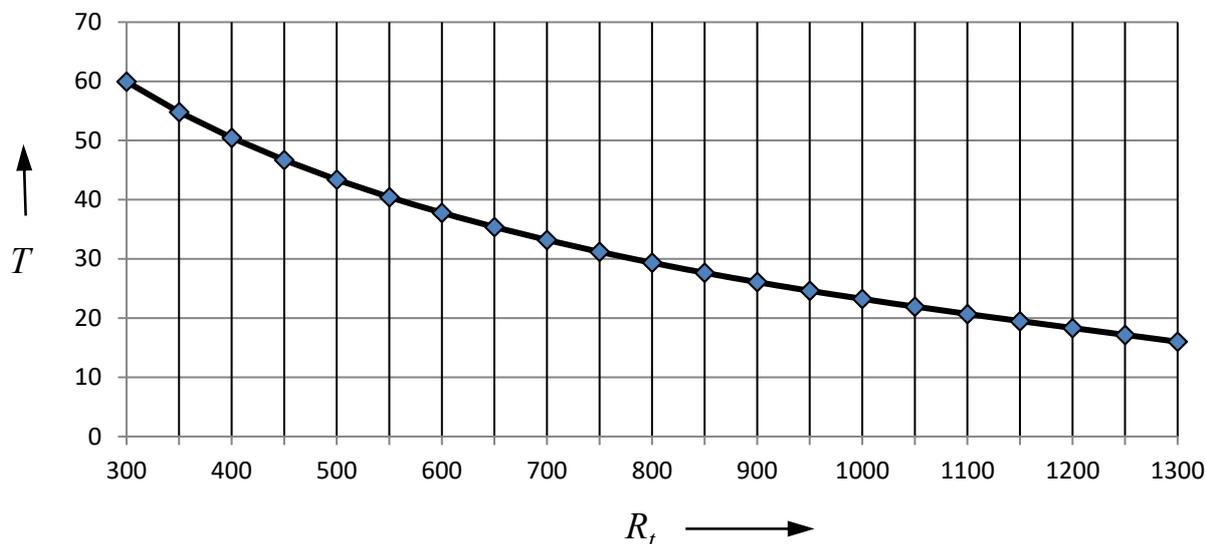


Рисунок 1.5 – Взаимосвязь температуры и сопротивления термистора

В режиме ШИМ Т/С1 канал А работает как суммирующий и вычитающий счетчик, осуществляя циклические переходы от 0x0000 к максимальному значению и затем снова возвращаясь к 0x0000. Когда значение счетного регистра совпадает со значением регистра **OCR1B**, то на выводе микроконтроллера OC1B устанавливается высокий или низкий уровень сигнала (определяется состоянием разрядов COM1B1 и COM1B0 регистра **TCCR1A**). Таким образом, чем меньше значение хранится в регистре сравнения OCR1B, тем реже поступают управляющие импульсы, включающие двигатель. Примем, что при температуре 20 °С и ниже двигатель вообще отключен ($OCR1B = 0$), а при температуре 40 °С – вращается с максимальной скоростью ($OCR1B = 1023$). Отсюда формула для определения текущего значения регистра OCR1B в зависимости от температуры имеет вид:

$$OCR1B = (T - 20) \cdot 1023 / 20.$$

Таким образом, запись вычисленного значения в регистр OCR1B изменяет скорость вращения двигателя вентилятора.

3 Загрузить программу в учебный стенд НТЦ-31.100. Отладить программу в среде EW AVR. Фрагменты текста программы представлены ниже.

```
#include "ioavr.h" //Подключение макросов и библиотечных функций для
#include "inavr.h" //доступа к периферии микроконтроллера
#include "lib\common_utils.h"//Подключение сервисных библиотечных функций
```

```

#include "math.h"    // Подключение математических функций

void adc_select_channel (unsigned char channel) // Подпрограмма выбора аналогового входа
{
  ADMUX = channel;    // Выбор канала
  ADMUX = ADMUX | 0x40; // Выбор внутреннего источника опорного напряжения AVCC = 5.5 В
}

unsigned int adc_read (void) // Подпрограмма чтения результата АЦП
{
  unsigned int adc_data; // Буферная переменная для хранения результата преобразования
  float a, b, c, d, e, Rt, CurrentTemp, CurrentVel;
  a = 63.657; b = - 0.0836; c = 5.238e-5; d = - 1.43e-8; e = 5111.287;
  ADCSRA = 0xEE; /* 0b11101110 – активизируем АЦП в несинхронизируемом режиме с коэффициентом деления 64, разрешаем прерывание от АЦП и начинаем преобразование */
  adc_data = ADC; // Запись результата преобразования в буферную переменную
  // Вычисляем текущее сопротивление терморезистора Rt на основании регистра ADC
  Rt = 1023*4700/adc_data - 4700;
  // Вычисляем текущую температуру на основании сопротивления терморезистора Rt
  CurrentTemp = a+b*Rt+c*Rt*Rt+d*Rt*Rt* Rt+e/Rt;
  // Вычисляем значение для записи в регистр OCR1B
  CurrentVel = ((int)CurrentTemp - 21) * 1023 / 10;
  i=0;
  ssi_write_word((int)CurrentTemp); // Вывод на ССИ текущей температуры
  i=4;
  ssi_write_word((int)CurrentVel); // Вывод на ССИ текущей скорости
  OCR1B = (int)CurrentVel; // Изменяем скорость вращения двигателя вентилятора
  return (adc_data);    // Функция возвращает значение буферной переменной adc_data
}

void init_timer (void) // Инициализация таймера-счетчика 1
{
  // Режим работы таймера-счетчика 1–10-разрядный ШИМ ФК (с фазовой коррекцией)
  // Для выхода OC1B задается сброс при совпадении во время прямого счета и установка
  // при совпадении во время обратного счета.
  // Для выхода OC1C задается установка при совпадении во время прямого счета и сброс
  // при совпадении во время обратного счета.
  // TCCR1A | 0x2F; 0b00101111
  TCCR1A = (1 « WGM10) | (1 « WGM11) | (1 « COM1B1) | (1 « COM1C1) | (1 « COM1C0);
  TCCR1B = 1 « CS10; // TCCR1B | 0x01; // Делитель частоты не используется
  TCCR1C = 0;
  TIFR |= 1 « OCF1B;    // Очистка OCF1B
  ETIFR |= 1 « OCF1C; // Очистка OCF1C
  TIMSK |= 1 « OCIE1B; // TIMSK | 0x08;
  // Разрешаем прерывание по результату сравнения канала В счетчика T/C1
  ETIMSK |= (1 « OCIE1C); // Разрешаем прерывание по результату сравнения канала С счетчика T/C1
  ACSR |= 1 « ACD; // ACSR | 0x80; // Отключаем аналоговый компаратор
  TCNT1 = 0; // Начинаем счет с 0
}

// Обработчики прерываний от таймера
#pragma vector=TIMER1_COMPB_vect
__interrupt void interrupt_routine(void)
{
  TIFR |= 1 « OCF1B;    // Очистка OCF1B
}

```

```

}
#pragma vector=TIMER1_COMPC_vect
__interrupt void interrupt_routine2(void)
{
ETIFR |= 1 « OCF1C; // очистка OCF1C
}
__task void main{ void )
{
    common_init(); // Начальная инициализация оборудования стенда
    ssi_init(); // Инициализация ССИ
    init_timer (); // Инициализация таймера-счетчика
    enable_interrupt(); // Разрешение прерываний
    DDRB = DDRB | 0xC0; // Линия 6 порта В - выход OC1B в режиме ШИМ
                    // Линия 7 порта В - выход OC1C в режиме ШИМ
    PORTB= PORTB | 0xC0;
    DDRF=DDRF & 0xF0; // Четыре младших разряда порта F – аналоговые входы
    PORTF=PORTF | 0x0F; // Устанавливаем входы PORTF0 – PORTF3 в высокое состояние
    OCR1B = 0x00; // Начальное значение для режима ШИМ канал В
    OCR1C = 0x00; // Начальное значение для режима ШИМ канал С
    adc_select_channel(0); // В качестве аналогового входа выбираем PORTF0/ADC0
    while(1) // Непрерывный цикл
    {
        adc_read(); // Подпрограмма чтения результата АЦП
    }
}
}

```

4 Запустить программу контроля скорости вращения вентилятора. Наблюдать изменение скорости вращения вентилятора при увеличении показаний датчика температуры на семисегментном светодиодном индикаторе ССИ.

1.4 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, постановку задачи, листинг программы на языке С в редакторе «IAR Embedded Workbench» с комментариями к каждому шагу, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите функциональную схему 16-разрядного таймера-счетчика.
- 2 Как осуществляется обработка прерываний в микроконтроллерах AVR? Какие регистры отвечают за управление прерываниями от таймеров/счетчиков?
- 3 Поясните назначение отдельных регистров таймера-счетчика T/C1.
- 4 Как задать режим работы таймера-счетчика T/C1 в конфигурации широтно-импульсного модулятора?
- 5 Поясните последовательность действия программы для учебного стенда НТЦ-31.100, позволяющей управлять скоростью вращения вентилятора с учетом показаний датчика температуры.

2 Лабораторная работа № 2. Исследование работы программно-аппаратного комплекса для управления машиной конденсаторной сварки МТК-1601 на основе системы сбора данных NI USB и программной среды LabVIEW

Цель работы: ознакомиться с принципом работы и особенностями конденсаторной машины МТК-1601, разработать программу в среде графического программирования LabVIEW для задания циклограммы работы сварочной машины конденсаторного типа.

2.1 Оборудование, приборы и материалы

- 1 Машина контактной точечной конденсаторной сварки МТК-1601.
- 2 Персональная ЭВМ с программным комплексом LabVIEW 2017.
- 3 Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи напряжений NI USB 6251, 6009.
- 4 Регистратор сварочных процессов РКДП 0401.
- 5 Датчик тока ДТПХ-32000, двухполярный источник питания ± 12 В.
- 6 Щупы для снятия напряжения с электродов.

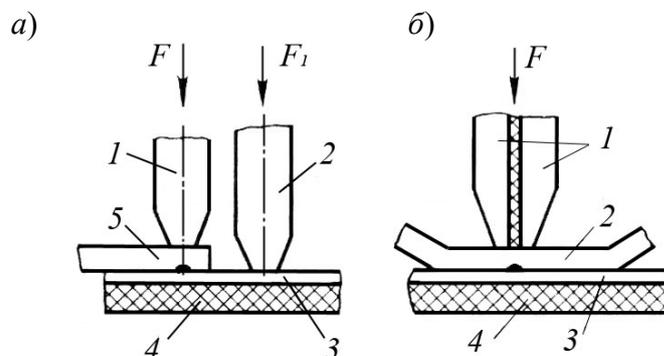
2.2 Общие теоретические сведения

Конденсаторная контактная сварка аккумулированной энергией – это технологический процесс, при котором сварное соединение металлов осуществляется за счет джоулевой теплоты, выделяемой сварочным током, который получается при использовании заранее накопленного количества энергии.

В сравнении с контактной точечной сваркой на машинах переменного тока, конденсаторная сварка обладает рядом преимуществ, таких как:

- снижение потребляемой мощности ввиду значительной разности между временем зарядки t_z и разряда t_p конденсаторов (к примеру, точечная сварка латуни толщиной 0,7 мм + 0,7 мм предполагает использование однофазной контактной машины мощностью 25...30 кВ·А, в то время как мощность конденсаторной машины для выполнения данной операции не будет превышать 0,8 кВ·А);
- возможность точной дозировки энергии, вводимой в зону сварки, что позволяет достичь высокой стабильности качества сварных соединений, связанной с расплавлением вполне определённого объёма металла в зоне соединения;
- минимальная зона термического влияния вследствие повышенной жесткости режимов, допускающая осуществление сварки рядом с теплочувствительными элементами;
- повышенная стойкость электродов и снижение глубины вмятины от них (связанные с применением жестких режимов сварки и относительно большой паузой между выполнением соединений);
- широкие возможности по созданию высокопроизводительного и автоматизированного оборудования и др.

Кроме представленных выше специфических достоинств конденсаторной сварки, можно назвать и общие для некоторых видов контактной сварки, а именно: отсутствие необходимости в присадочных материалах, экологичность процесса, низкие требования по подготовке рабочего персонала. Конденсаторная сварка широко применяется для соединения тонких и ультратонких металлов (толщиной менее 0,3 мм). При этом используют одностороннюю точечную сварку (рисунок 2.1, а) и сварку сдвоенным электродом (рисунок 2.1, б).



а – сварка двумя электродами: 1, 2 – электроды; 3 – контактная площадка; 4 – диэлектрическое основание; 5 – привариваемый проводник; б – сварка сдвоенным электродом: 1 – сдвоенный электрод; 2 – привариваемый проводник; 3 – контактная площадка; 4 – диэлектрическое основание

Рисунок 2.1 – Способы односторонней конденсаторной сварки

В зависимости от области применения конденсаторные машины можно разделить на три группы: для сварки изделий малых, средних и больших толщин. Машина точечной конденсаторной сварки МТК-1601 относится к первой группе и предназначена для сварки деталей из низкоуглеродистой стали толщиной 0,05...0,8 мм, из латуни, никеля и нержавеющей стали толщиной 0,05...0,6 мм.

В соответствии с техническими характеристиками длительность разрядного тока машины имеет пределы 1...5 мс, при этом предусмотрена реализация одно- и двухимпульсной циклограмм. Униполярный импульс сварочного тока конденсаторных машин определяется несколькими характеристиками (рисунок 2.2): амплитудным значением I_m , длительностью фронта τ_f (время нарастания от нуля до амплитуды). В зарубежной практике определяют параметр, который можно назвать активной длительностью импульса τ_a , ограниченный рамками от начала сварочного импульса и до достижения током на участке среза импульса значения $0,5I_m$. Такой подход к определению τ_f связан с тем, что при разряде конденсаторных батарей формирование соединения заданных геометрических параметров завершается вскоре по достижении током амплитудного значения.

В простейшем случае амплитудно-временные характеристики сварочного импульса определяются такими факторами, как ёмкость конденсаторных батарей C_p , напряжения их заряда U_c и коэффициент трансформации сварочного трансформатора K_T . Каждый из указанных параметров имеет вполне определённую связь с крутизной фронта, максимальным значением и длительностью импульса тока во вторичной цепи сварочного трансформатора.

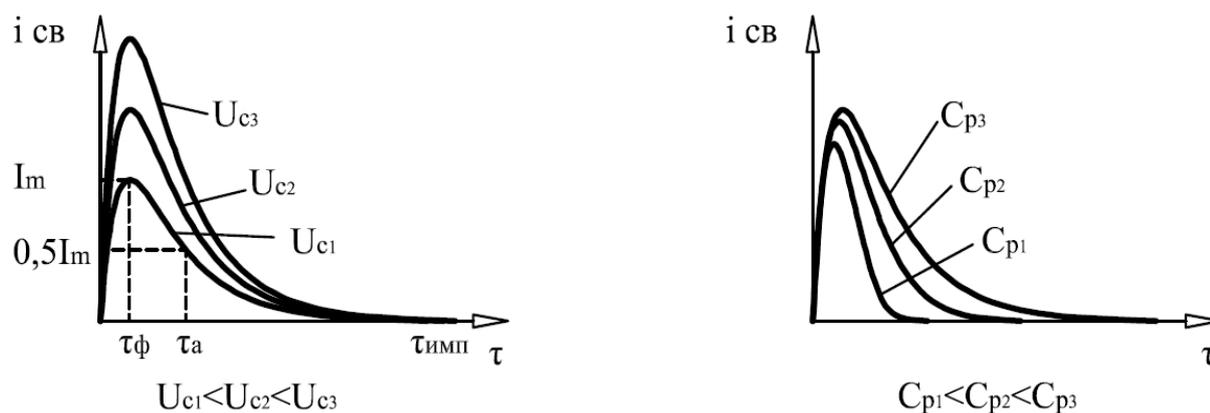


Рисунок 2.2 – Зависимость основных характеристик разрядного импульса тока от изменения параметров C_p и U_c

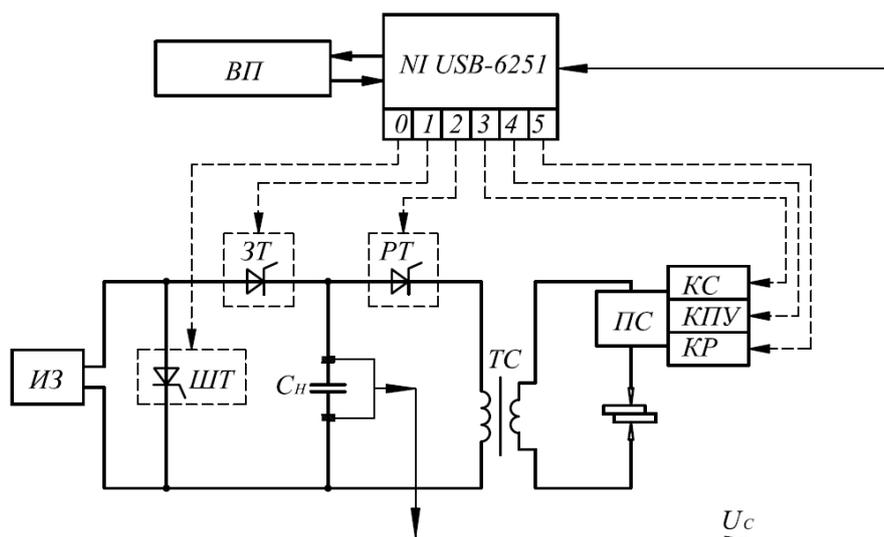
Увеличение напряжения U_c на батарее конденсаторов приводит к пропорциональному росту амплитуды импульса, его длительность не меняется, равно как и время фронта. Скорость нарастания тока при увеличении U_c возрастает. Изменяя напряжение заряда, можно влиять на величину силы сварочного тока $i_{св}$ при неизменной длительности его импульса, а значит, эффективно корректировать скорость нагрева свариваемого металла.

При переключении на повышенную ступень емкости C_p увеличиваются амплитуда и длительность импульса сварочного тока, градиент нарастания тока остается почти неизменным. Изменение коэффициента трансформации K_T сварочного трансформатора влечет за собой изменение амплитуды, длительности и угла нарастания тока. Значение параметров C_p и K_T может быть использовано для некоторого увеличения или снижения жёсткости режимов, в том числе и для снижения склонности процесса к образованию выплесков.

К основным параметрам, влияющим на проплавление свариваемых деталей, относят также и усилие сжатия электродов $F_{сж}$, форму и размеры рабочей поверхности электродов. Изменение каждого из основных параметров приводит к изменению условий деформации, нагрева, плавления и кристаллизации металла, что отражается на качестве сварного соединения.

2.3 Программная реализации системы управления процессом сварки

Функциональная схема управления машиной МТК-1601 представлена на рисунке 2.3. Зарядный тиристор $ЗТ$ отвечает за заряд батареи конденсаторов от источника зарядки $ИЗ$ – мостового неуправляемого выпрямителя, шунтирующий тиристор $ШТ$ контролирует достижение требуемого уровня напряжения заряда, разрядный тиристор $РТ$ осуществляет разряд батареи на первичную обмотку трансформатора сварочного $ТС$. Пневматический привод сжатия $ПС$ включает: клапан разведения токоведущих электродов $КР$, клапан сжатия свариваемых деталей $КС$ и клапан повышенного усилия сжатия $КПУ$ за счет задействования вспомогательного поршня пневматического привода. Управление рабочими органами машины МТК-1601 осуществляется посредством цифровых выходов 0–5 аналого-цифрового / цифроаналогового преобразователя NI USB-6251.



ИЗ – источник зарядки; *ШТ* – шунтирующий тиристор; *ЗТ* – зарядный тиристор; *РТ* – разрядный тиристор; *ПС* – привод сжатия; *КС* – клапан сжатия; *КПУ* – клапан повышенного усилия; *КР* – клапан разведения электродов; *ТС* – сварочный трансформатор; *ВП* – виртуальный прибор; 0–5 – цифровые выходы

Рисунок 2.3 – Функциональная схема системы управления конденсаторной машиной

Для программной реализации системы управления процессом сварки малых толщин на машине МТК-1601 и задания циклограммы её работы были использованы программные средства компании National Instruments, а именно программа LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), представляющую собой среду прикладного графического программирования и предназначенную для создания так называемых виртуальных приборов *ВП* – программ, написанных в среде LabVIEW. Блок-диаграмма и лицевая панель, являясь основными компонентами виртуального прибора, несут в себе функции алгоритма программы и пользовательского интерфейса соответственно.

Работа с готовым и отлаженным *ВП* предусматривает использование только лицевой панели, которая содержит различные элементы управления (выключатели, переключатели, поля ввода и т. д.), индикации и визуализации информации (цифровые индикаторы, графические экраны, графики и т. д.). При создании программ стремятся к тому, чтобы все эти элементы соответствовали аналогичным по назначению элементам, расположенным на лицевой панели традиционных измерительных приборов.

Программа LabVIEW может иметь как модульную, так и иерархическую структуру, а сложный *ВП* может содержать в своем составе более простые *ВП*. Концепция LabVIEW существенно отличается от системы традиционных языков программирования. Разработчику *ВП* предоставляется графическая оболочка, включающая в себя весь набор инструментов, необходимых для сбора данных, их анализа и представления полученных результатов. Создаваемая в процессе программирования диаграмма напоминает привычную для инженера блок-схему. Поэтому разработчик даже при отсутствии навыков программирования затратит на решение своих задач в LabVIEW значительно меньше времени и усилий по сравнению с написанием программ по традиционной технологии.

2.4 Порядок выполнения работы

1 На языке программирования LabVIEW составить блок-диаграмму программы, обеспечивающей отработку конденсаторной машиной одноимпульсного сварочного цикла. Циклограмма и значения цифровых сигналов управления представлены на рисунке 2.4. Особенность данного цикла заключается в том, что заряд батареи конденсаторов до напряжения U_c производится в двухступенчатом режиме. Конденсаторная батарея имеет ограничение по величине максимального напряжения заряда не выше 500 В и в целях безопасности.

Программа должна обеспечивать следующие функции:

- получение данных о текущем заряде конденсаторных батарей;
- отработка одноимпульсного сварочного цикла;
- вычисление энергии накапливаемой конденсаторными батареями.

Загрузить программу LabVIEW 2017. Создать новое приложение, для чего выбрать **Blank VI**. Переключиться в окно редактирования диаграмм **Window» Show Block Diagram**.

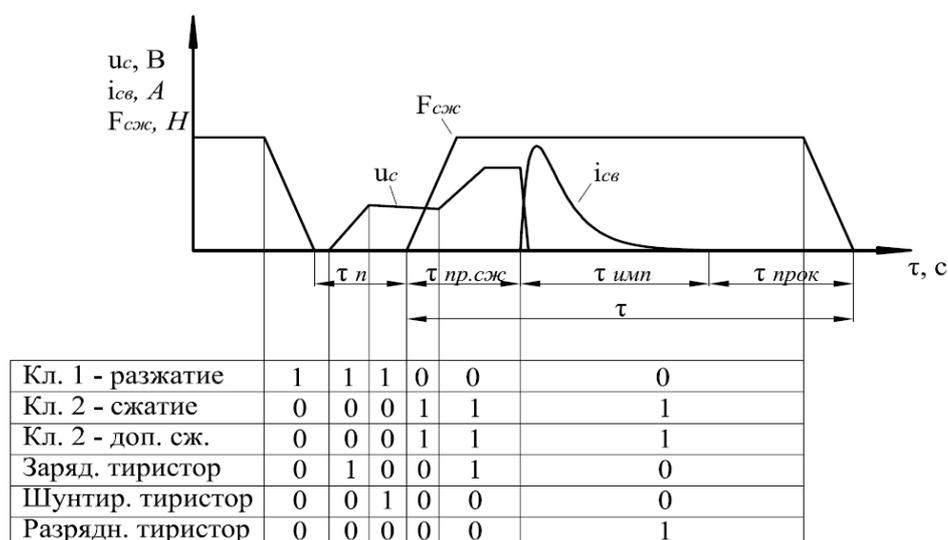


Рисунок 2.4 – Циклограмма работы машины МТК-1601 в одноимпульсном режиме

Организовать циклическое выполнение операции, как показано на блок-диаграмме (рисунок 2.5). Для этого добавить два цикла **While Loop** из палитры программирования **Programming» Structures** (рисунок 2.6). В цикл № 2 поместить структуру последовательности **Stacked Sequence Structure** из той же палитры. Увеличить общее количество кадров структуры до шести (0...5) путем нажатия на край структуры правой кнопкой мыши и выбора пункта **Add Frame After** в появившемся выпадающем меню.

Поместить в цикл № 1 два блока **DAQ Assistant** из палитры **Express**. Настроить первый блок **DAQ Assistant** для регистрации напряжения заряда конденсаторных батарей: **Acquire Signals» Analog input» Voltage» AI1**.

Настроить второй блок **DAQ Assistant** для работы с цифровыми сигналами: **Generate Signal» Digital Output» Line Output» P0.0 ... P0.5** (шесть каналов цифрового вывода соответствуют шести управляемым элементам машины).

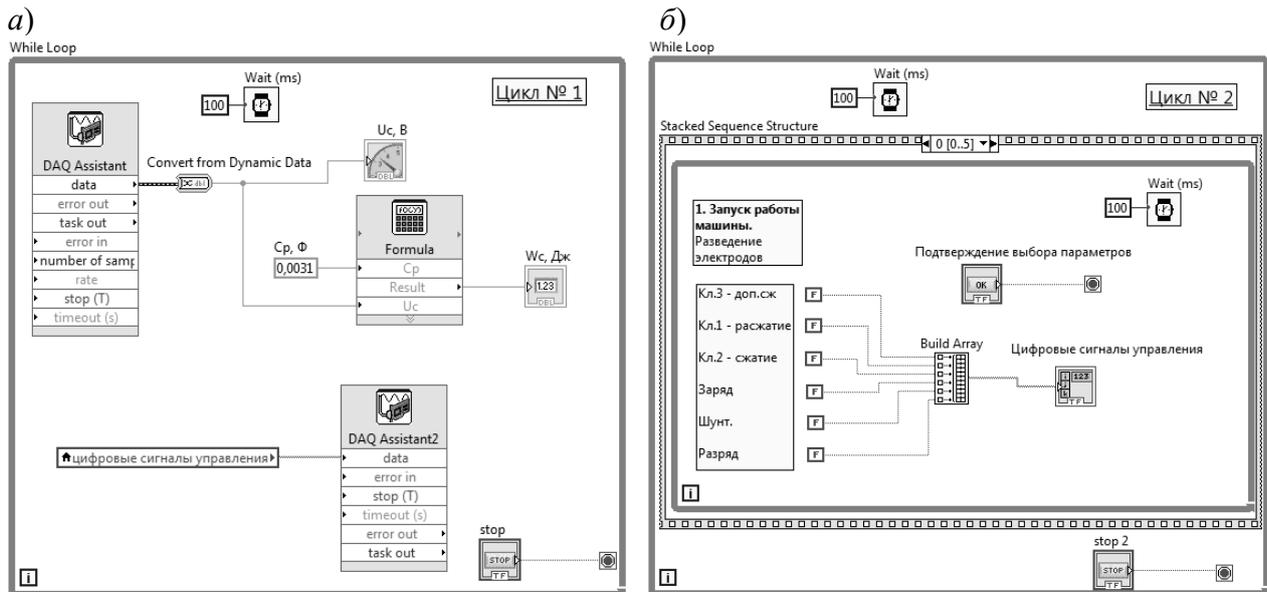
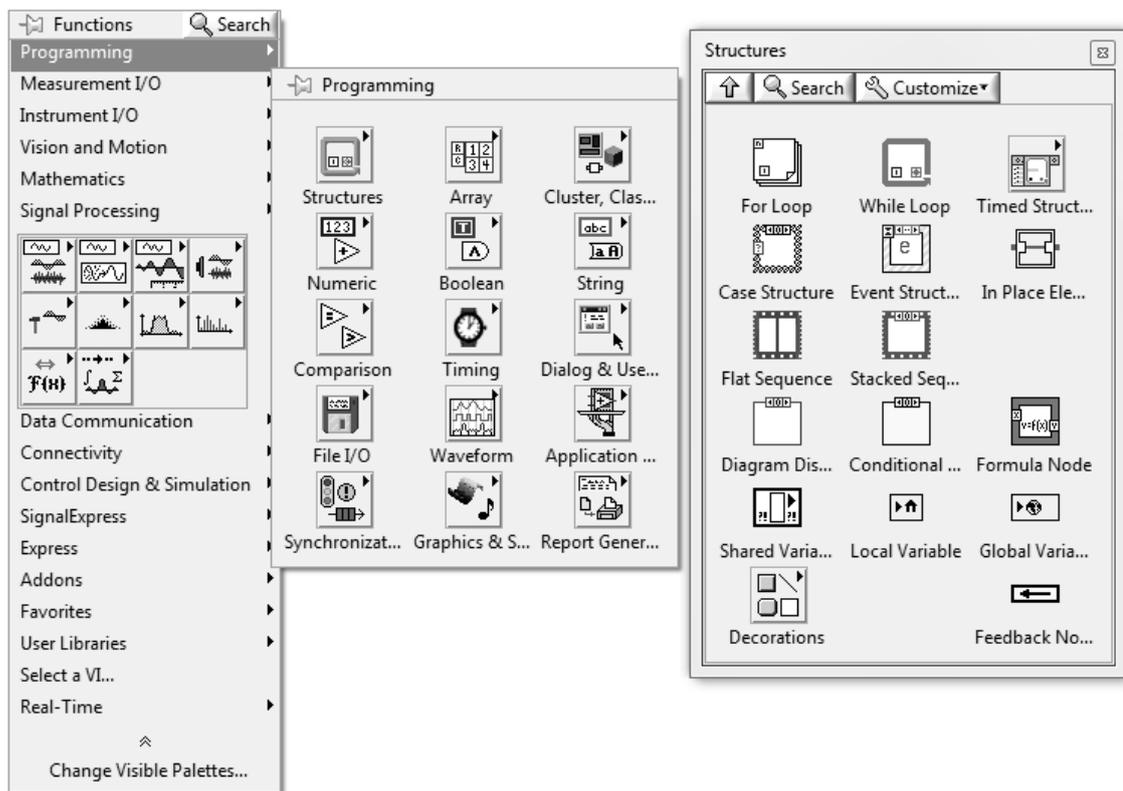


Рисунок 2.5 – Блок-диаграмма виртуального прибора

Рисунок 2.6 – Палитра программирования **Programming**»**Structures**

Блок **Formula** (палитра программирования **Express**»**Arithmetic & Comparison**) реализует вычисление энергии, аккумулированной конденсаторной батареей сварочной машины:

$$W_c = \frac{C_p \cdot U_c^2}{2},$$

где W_c – энергия, Дж;

C_p – емкость батареи конденсаторов, Ф;

U_c – напряжение зарядки батареи конденсаторов, В.

Для передачи сигнала напряжения заряда конденсаторных батарей U_c от блока **DAQ Assistant (data)** к блоку **Formula** используется преобразование динамического типа данных с помощью блока **Convert from Dynamic Data Type (from DDT)** из палитры программирования **Express»Signal Manipulation** (рисунок 2.7). В открывшемся меню настройки **Configure Convert from Dynamic Data** в разделе **Conversion»Resulting data type** (Тип данных результата) выбирают **Single Scalar** (Скалярная величина).

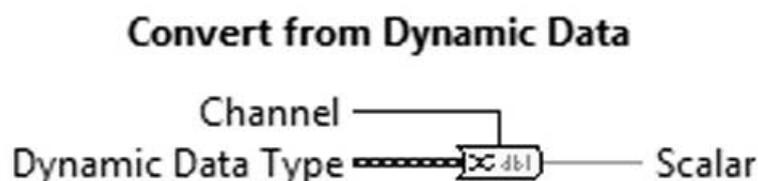


Рисунок 2.7 – Преобразование динамического типа данных в скалярную величину для использования другими виртуальными инструментами и функциями

Блок **Wait (ms)** milliseconds to wait  из палитры программирования **Programming»Timing** задерживает включение текущего цикла на заданное количество миллисекунд.

Для того чтобы осуществить индикацию сигнала напряжения U_c , на панели инструментов нажимают **Window»Show Front Panel**. В появившемся клеточном поле правой клавишей мыши вызывают **Controls»Express» Numeric Indicators»Gauge**. Затем перетаскивают блок **Gauge** (Измерительный прибор) на клеточное поле. Подписывают индикатор для напряжения U_c . На панели инструментов нажимают **Window»Show Block Diagram** и соединяют появившийся на белом поле индикатор с сигналом напряжения U_c (см. рисунок 2.5, а).

В блоке 0 (см. рисунок 2.5, б) создается массив цифровых сигналов управления. Правой клавишей мыши вызывают меню **Functions**, нажимают **Programming»Array**, перетаскивают блок **Build array** на рабочее поле и растягивают его на шесть входов. Затем нажимают **Express»Arithmetic/Comparison»Boolean** и перетаскивают на это же поле блоки **True Constant** и **False Constant**. Затем соединяют выходы блоков **True Constant** и **False Constant** с входами блока **Build array**. На выход блока **Build array** нажимают правой клавишей мыши и создают индикатор **Create»Indicator**, который обозначают «Цифровые сигналы управления». В результате создается вариативный массив из шести цифровых сигналов для управления конденсаторной машиной.

Для создания кнопки **OK Button** на панели инструментов нажимают **Window»Show Front Panel**. В появившемся клеточном поле правой клавишей мыши вызывают **Controls»Express» Buttons & Switches**. Затем перетаскивают кнопку **OK Button** на клеточное поле и подписывают «Подтверждение выбора

параметров». На панели инструментов нажимают **Window»Show Block Diagram** и соединяют появившуюся на белом поле кнопку с красным индикатором **Loop Condition** окончания цикла **While Loop** (см. рисунок 2.5, а).

Заполнить шесть кадров **Stacked Sequence Structure** (0...5), как представлено ниже (рисунок 2.8). Для поиска требуемых элементов программы можно воспользоваться поиском **Search**.

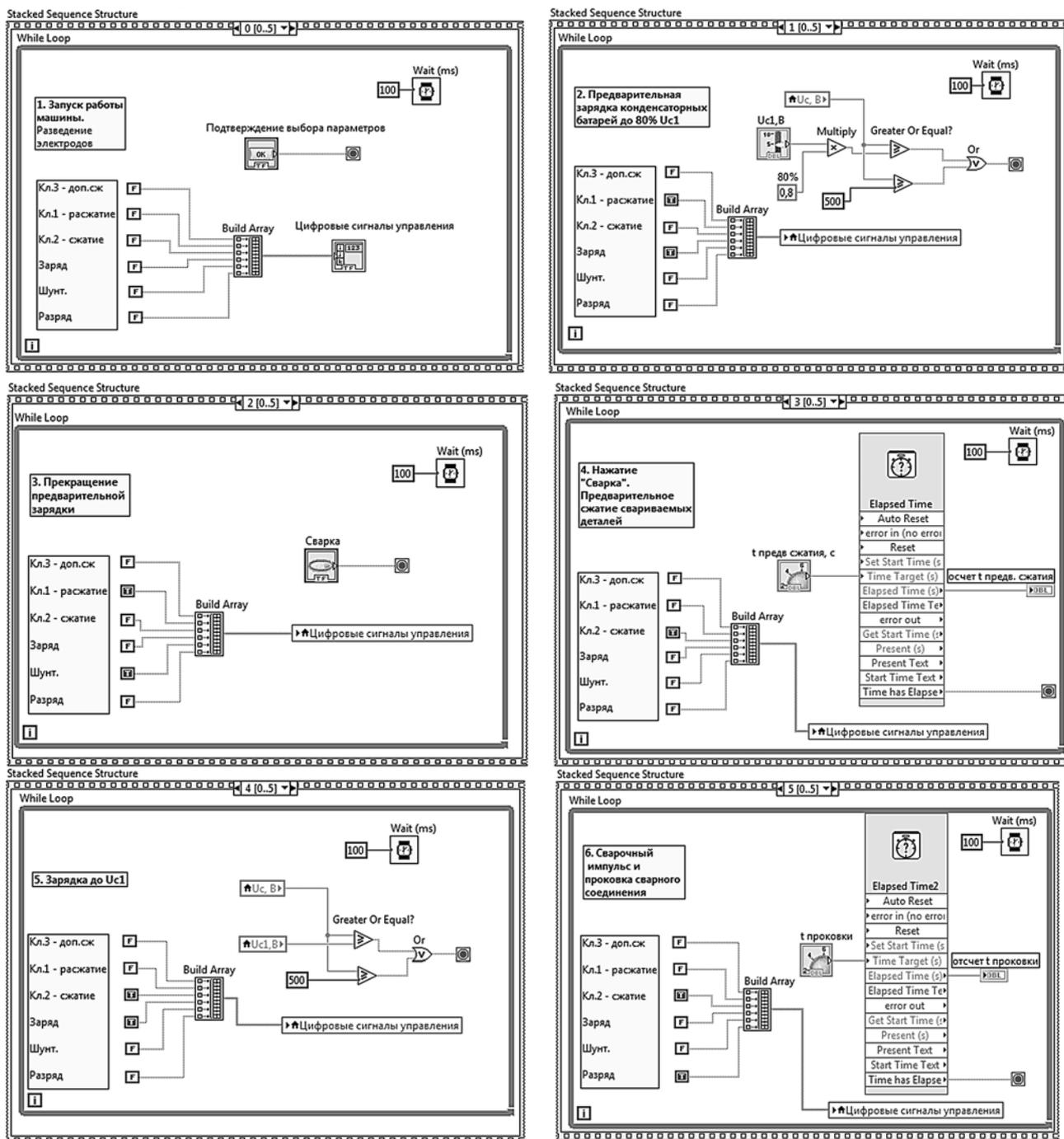


Рисунок 2.8 – Блок-диаграмма виртуального прибора

В кадре 1 для вызова арифметических и логических функций используют меню **Functions»Express»Arithmetic & Comparison**. Блок сравнения **Greater**

or Equal? находится в разделе **Comparison**, логические функции – в разделе **Boolean**, арифметические функции – в разделе **Numeric**.

Для создания локальных переменных **Uc, В**, **Цифровые сигналы управления** добавляют блок **Local Variable** из палитры **Programming»Structures**. Присвоение имени переменной осуществляется путем нажатия правой кнопкой мыши и выбора пункта **Select Item** в появившемся выпадающем меню.

Для задания времени предварительного сжатия и проковки в циклах 3 и 5 нажимают в меню правой клавиши мыши **Express» Execution Control** и перетаскивают на рабочее поле блок **Elapsed Time**, затем задают в опции **Time Target** соответствующее время, а выход **Time has Elapsed** соединяют с красным индикатором **Stop**.

2 Самостоятельно оформить лицевую панель виртуального прибора. Пример исполнения элементов индикации представлен на рисунке 2.9.

3 Проверить работоспособность разработанной блок-диаграммы с помощью средств отладки приложений LabVIEW, изменив цикл № 1 так, как показано на рисунке 2.10.

4 Ознакомиться с работой системы управления машиной конденсаторной сварки МТК-1601.

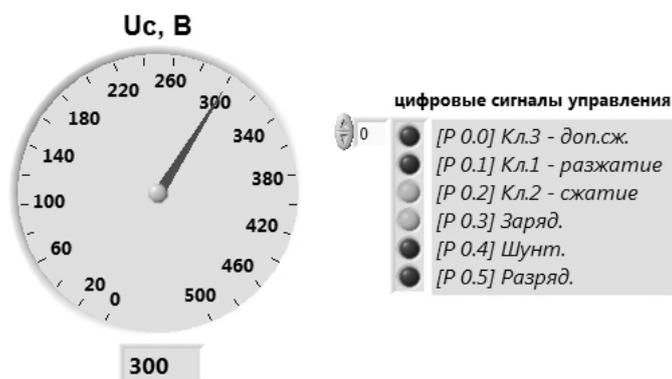


Рисунок 2.9 – Элементы индикации виртуального прибора

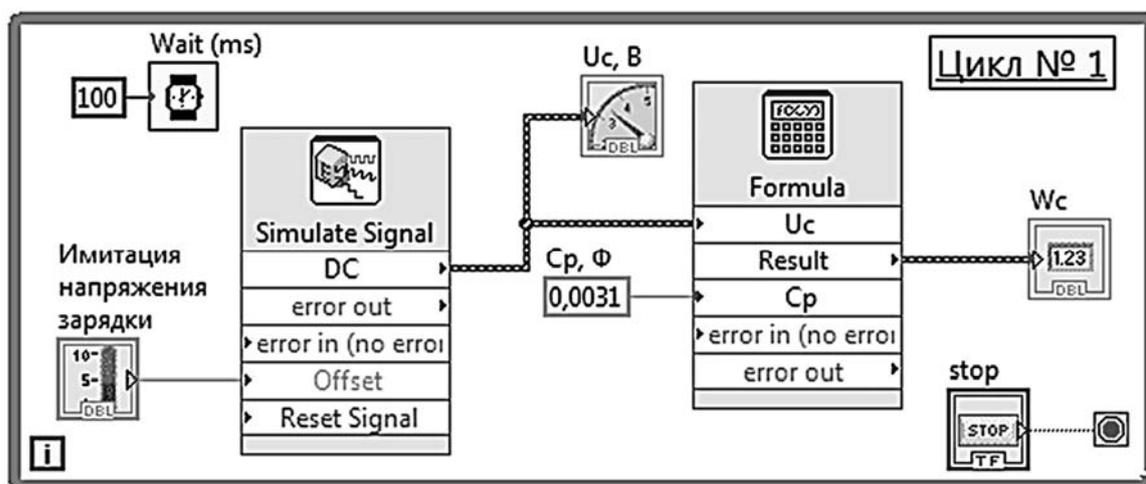


Рисунок 2.10 – Имитация напряжения зарядки

2.5 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, постановку задачи, функциональную схему управления и циклограмму работы конденсаторной машины, блок-диаграмму и лицевую панель программы в среде LabVIEW, результаты расчета энергии, накапливаемой в конденсаторной батарее, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Преимущества контактной сварки на конденсаторных машинах по сравнению с другими видами контактной сварки.
- 2 Какими факторами определяются амплитудно-временные характеристики сварочного импульса при разряде конденсаторных батарей?
- 3 Опишите функциональную схему управления и циклограмму работы конденсаторной машины МТК-1601.
- 4 Опишите функции программы управления и блок-диаграмму на языке LabVIEW, обеспечивающую обработку конденсаторной машиной одноимпульсного сварочного цикла.

3 Лабораторная работа № 3. Система активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке

Цель работы

- 1 Изучить назначение и функции регулятора цикла сварки РКС-801 контактной машины и схему подключения цепей внешнего управления регулятора.
- 2 Разработать графический программный код системы автоматического управления процессом контактной точечной и рельефной сварки с активным контролем энергии тепловложения в межэлектродную зону.

3.1 Оборудование, приборы и материалы

- 1 Машина контактной точечной сварки МТ-3201 с регулятором цикла сварки РКС-801.
- 2 Датчик тока ДТПХ-32000, двухполярный источник питания ± 12 В.
- 3 Щупы для снятия напряжения с электродов.
- 4 Аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователь напряжений NI USB 6251, 6009.
- 5 Устройство согласования сигналов (УС).
- 6 Персональная ЭВМ с программным комплексом LabVIEW 2017.
- 7 Регистратор сварочных процессов РКДП 0401.

3.2 Общие теоретические сведения

3.2.1 Назначение регулятора цикла сварки контактных машин.

Регулятор цикла сварки является устройством, главная функция которого – управление контактной машиной путем задания и отработки необходимой циклограммы процесса сварки. В свою очередь, задание циклограммы процесса сварки включает в себя:

- предварительное сжатие деталей электродами (перед включением тока);
- пропускание через детали импульса тока подогрева;
- пропускание через детали основного сварочного импульса тока;
- проковка зоны сварки после выключения импульса сварочного тока;
- пропускание через детали импульса термообработки;
- пауза до следующего цикла сварки.

Сегодня на заводах постсоветского пространства довольно широко распространены регуляторы цикла сварки типа РКС-801, которыми укомплектовываются машины контактной точечной сварки МТ-3201, МТ-1617. Достоинства данных регуляторов – простота в настройке и хорошая ремонтпригодность.

Главные их недостатки:

- невозможность автоматической корректировки настроенных параметров режима сварки в том случае, если на процесс внезапно начинают оказывать влияние возмущающие воздействия (скачки напряжения питания, изменение состояния поверхности электродов, изменение состояния поверхности деталей, изменение сопротивления вторичного контура, введение в зону сварки ферромагнитных масс, появление инерционности в работе привода сжатия и др.);
- невозможность задавать на регуляторе импульсы сварочного тока необходимой формы (импульс тока можно задавать только модуляцией до установленного значения).

Длительность протекания сварочного тока $\tau_{СВ}$ – один из основных параметров сварочного процесса. В литературе существуют многие рекомендации параметров режима контактной точечной и рельефной сварки соединений, допускающие значительный разброс в отработке интервалов сварки. Кроме того, на многих предприятиях используется достаточное число сварочных машин, оснащенных регуляторами цикла сварки, которые нуждаются в постоянном контроле за отработкой длительности импульса сварочного тока. В условиях высокого темпа работы сварочной машины разница между фактическими параметрами режима сварки и параметрами, выставленными на регуляторе цикла сварки согласно картам технологического процесса, приводит к дестабилизации равномерного введения электрической энергии в межэлектродную зону и возникновению дефектов.

3.2.2 Разработка системы активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону при контактной точечной и рельефной сварке.

Для устранения указанных выше недостатков регулятора цикла сварки используется система активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону, которая выполняет следующие задачи:

– внешнее воздействие на аппаратуру управления контактной машиной с целью независимого от начальных настроек регулятора цикла сварки задания величины и длительности протекания сварочного тока;

– обеспечение точного введения в зону сварки минимального количества электрической энергии, которое обеспечит формирование литых зон требуемых размеров и формы, что, в свою очередь, гарантирует требуемые прочностные характеристики получаемого сварного соединения;

– учет инерционности пневмопривода контактной машины, т. е. включение сварки, прием и программная обработка сигналов напряжения и тока должны начинаться после выдержки предварительного сжатия электродов;

– использование системы автоматического регулирования параметров режима не должно снижать производительности труда сварщика.

Первым входным параметром в системе активного контроля является расчетное количество электрической энергии $Q_{ЭЭ}$, вводимой в межэлектродную зону. Расчет текущего значения энергии $Q_{ЭЭ}$ производился на основе анализа регистрируемых фактических сигналов сварочного тока и напряжения межэлектродной зоны непосредственно в процессе сварки.

Вторым входным параметром в данной системе являлась величина сварочного тока, т. е. сварочный ток задавался ступенчато.

Выходным параметром при этом является длительность протекания сварочного тока $\tau_{СВ}$. Корректировка данного параметра осуществляется путем воздействия импульсами напряжения с выходов платы NI USB посредством имитационной модели программной среды LabVIEW на позиции регулятора цикла сварки РКС-801, такие как «Задержка цикла на позиции СЖАТИЕ» и «Ограничение импульса тока».

Для подключения платы NI USB к РКС-801 и усиления аналоговых и цифровых сигналов управления было разработано устройство согласования (УС) (рисунок 3.1).

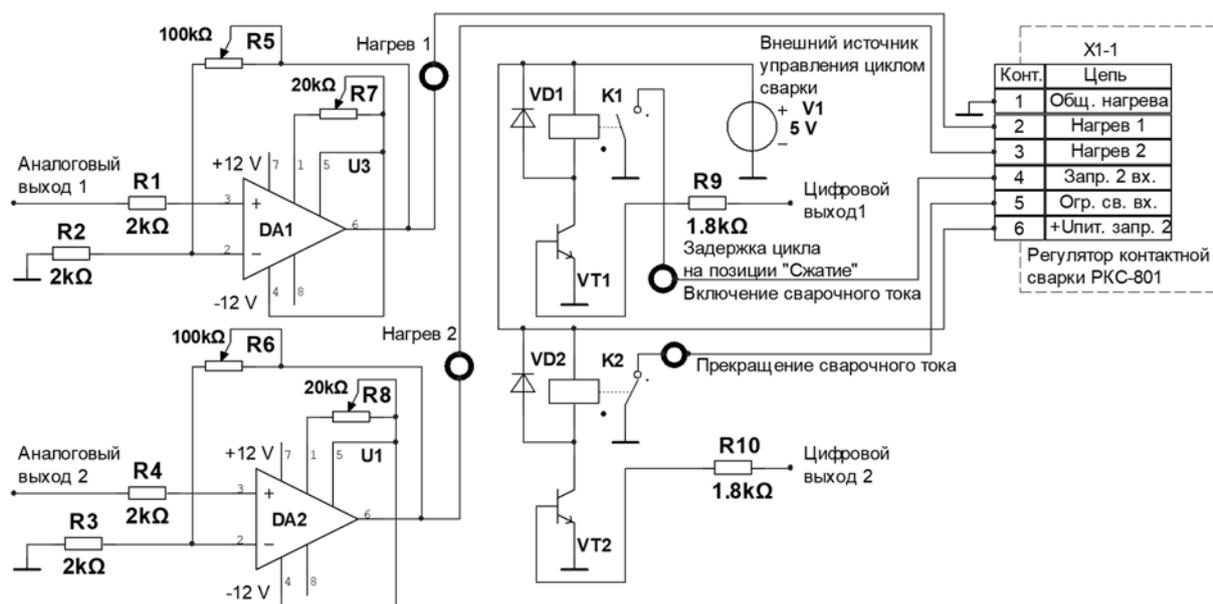


Рисунок 3.1 – Принципиальная электрическая схема устройства согласования преобразователя напряжений NI USB 6251 и регулятора контактной сварки РКС-801

Устройство согласования состоит из двух цепей.

1 Цепь регулирования аналоговых сигналов на базе двух операционных усилителей DA1 и DA2, позволяющая задавать величину управляющих импульсов напряжения U_V в пределах 0...10 В при токе потребления 15 мА. Цепь аналоговых сигналов регулирует величину сварочного тока. Запитывание цепи осуществляется внешним двухполярным источником питания ± 12 В.

Цепь регулирования аналоговых сигналов предназначена для усиления и регулирования сигналов напряжения в диапазоне 0...10 В, воздействующих на позиции «Нагрев 1» и «Нагрев 2» регулятора РКС-801 (двухимпульсный режим сварки). Операционные усилители позволяют осуществлять отдельную балансировку переменными резисторами R7, R8 и регулировку сигналов напряжения управления U_V переменными резисторами R5, R6 в обратной связи, изменяющей коэффициент усиления сигнала. Таким образом, регулируется амплитуда первого и второго импульсов сварочного тока.

2 Цепь усиления цифровых сигналов на базе двух транзисторов VT1, VT2 и двух электромагнитных реле К1, К2. Замыкающие контакты реле управляют включением/выключением сварочного тока. Запитывание цепи осуществляется внешним однополярным источником питания +5 В.

Цепь регулирования цифровых сигналов предназначена для усиления цифровых сигналов напряжения, воздействующих на входы регулятора цикла сварки РКС-801 «Задержка цикла на позиции СЖАТИЕ» и «Прекращение сварочного тока». При этом первый цифровой сигнал осуществляет включение сварочного тока, а второй цифровой сигнал – выключение сварочного тока в определенные моменты времени, соответствующие условиям достижения энергией, вводимой в межэлектродную зону, заданного расчетного значения.

Аппаратура автоматического управления длительностью протекания сварочного тока при его ступенчатом задании на основе активного контроля энергии, вводимой в межэлектродную зону, представлена на рисунке 3.2. Для решения проблемы визуализации параметров режима сварки в составе экспериментальной установки может использоваться регистратор сварочных процессов РКДП 0401, позволяющий с высокой точностью записывать и визуализировать различные сигналы процессов контактной сварки.



Рисунок 3.2 – Аппаратура активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону в процессе контактной точечной и рельефной сварки

Данная система автоматического управления процессом контактной сварки отличается от существующих систем тем, что в ее основе использована блок-диаграмма имитации процесса регулирования параметров режима сварки. Блок-диаграмма непосредственно в ходе сварки после регистрации аналого-цифровой платой сбора данных быстротечных сигналов сварочного напряжения и тока дает возможность рассчитывать фактические значения вводимой в межэлектродную зону электрической энергии и сравнивать их с заданными расчетными значениями, а затем вырабатывать управляющие импульсы напряжения, которые посредством аналоговой и цифровой цепей управления устройства согласования УС способны корректировать начальные настройки регулятора цикла сварки, а именно ступенчато задавать амплитуду импульсов сварочного тока и регулировать длительность их протекания в режиме реального времени путем воздействия на тиристорный контактор сварочной машины.

С целью регулирования процесса деформирования рельефов и уменьшения величины электрической энергии, вводимой в межэлектродную зону, был предложен способ рельефной сварки с заданием многоступенчатого импульса сварочного тока. Длительность его протекания τ_{CB} при задаваемых значениях тока $I_{CB1}, I_{CB2}, \dots, I_{CBn}$ на каждой из ступеней импульса находят по формуле

$$\tau_{CB} = \tau_{CB\Phi 1} + \tau_{CB\Phi 2} + \dots + \tau_{CB\Phi n},$$

где $\tau_{CB\Phi 1}, \tau_{CB\Phi 2}, \dots, \tau_{CB\Phi n}$ – фактическая длительность протекания тока на каждой из ступеней импульса, которую определяют фактическим достижением суммарной величины электрической энергии $Q_{ЭЭ}$, вводимой в межэлектродную зону, требуемого значения $Q_{ЭЭ} = Q_{TP1} + Q_{TP2} + \dots + Q_{TPn}$, где $Q_{TP1}, Q_{TP2}, \dots, Q_{TPn}$ – количество электрической энергии, необходимое для ввода в межэлектродную зону для значений тока $I_{CB1}, I_{CB2}, \dots, I_{CBn}$ на каждой из ступеней его импульса.

На рисунке 3.3 представлена циклограмма рельефной сварки с трехступенчатым импульсом тока.

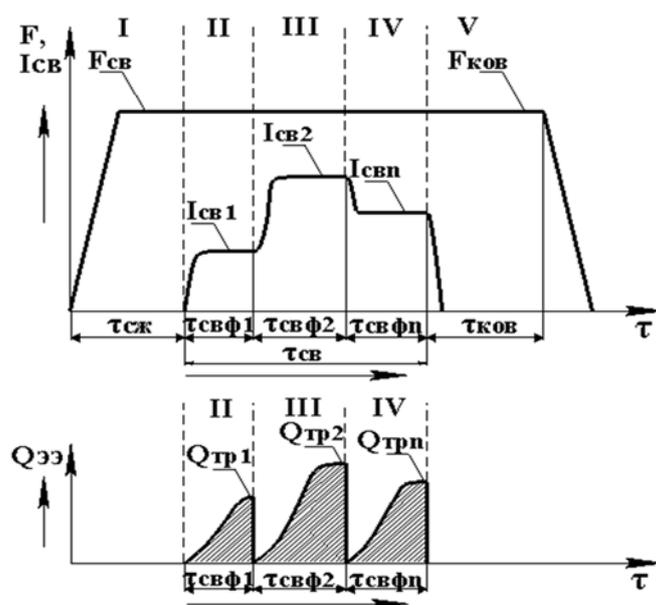


Рисунок 3.3 – Циклограмма рельефной сварки с трехступенчатым импульсом тока и расчетом значений вводимой в межэлектродную зону электрической энергии

3.3 Порядок выполнения работы

1 Собрать экспериментальную установку на базе устройства сбора данных NI USB 6251 или NI USB 6009 и программной среды LabVIEW для реализации внешнего автоматического управления работой регулятора цикла сварки РКС-801 в составе машины контактной сварки МТ-3201.

2 Построить на ЭВМ в программной среде LabVIEW имитационную модель (графический программный код) для регистрации устройством NI USB необходимых сигналов процесса сварки, их визуализации, обработки и анализа, а также выработки управляющих сигналов внешнего управления работой регулятора РКС-801.

3 Этапы создания программы.

Загружают программу LabVIEW на ЭВМ, в появившемся окне нажимают **New / Blank VI**. В появившемся окне **Untitled 1 Front Panel** нажимают на панели инструментов **Window / Show Block Diagram**.

На белом экране (рабочее поле) правой клавишей мыши вызывают меню **Functions / Express / Execution Control / Flat Sequence**. Появившийся инструмент перетаскивают левой клавишей мыши на рабочее поле. В результате создается кадровая последовательность. Это необходимо для срабатывания создаваемых циклов приема, обработки сигналов или их генерации в системе регулирования в строгой последовательности.

Нажимают правой клавишей мыши на границу блока кадровой последовательности для вызова контекстного меню, после чего выбирают **Add Frame After** левой клавишей мыши. Повторяют данную операцию еще четыре раза. В результате получается шесть последовательных кадров, в каждом из которых в дальнейшем будет располагаться свой цикл работы системы.

4 Этапы создания кадровой последовательности.

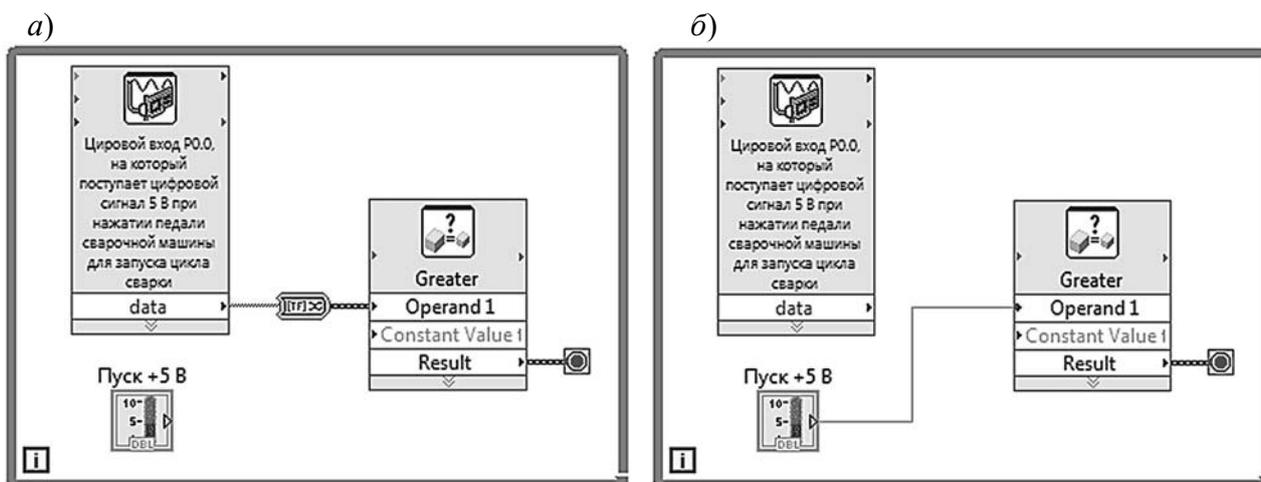
На рабочем поле правой клавишей мыши вызывают меню **Functions / Express / Input**. В появившемся окне виртуальных приборов перетаскивают левой клавишей мыши на экран прибор **DAQ Assistant Input**. После инициализации прибора появляется его меню **Create New Express Task**. Нажимают **Acquire Signals / Digital Input / Line Input / Port0/Line0 / Finish**. Появляется меню прибора **DAQ Assist Input**, в котором в опции **Acquisition Mode** выбирают опцию **1 Sample (On Demand)** и нажимают «ОК». В результате на рабочем поле конфигурируется виртуальный блок **DAQ Assist Input** для приема одного цифрового сигнала за один цикл измерения. Затем перетаскивают его мышью в **первый кадр** последовательности (рисунок 3.4, а).

На рабочем поле правой клавишей мыши вызывают меню и нажимают **Express / Arithmetic & Comparison / Comparison** и левой клавишей мыши перетаскивают блок **Comparison** в первый кадр последовательности, после чего в появившемся на экране меню настраивают условие **>Greater Value 1** и нажимают «ОК». В результате создается блок сравнения, основная функция которого – распознавание логического цифрового сигнала напряжения +5 В. Соединяют между собой выход **Data** виртуального прибора **DAQ Assistant Input** со входом **Operand 1** прибора **Comparison**.

Правой клавишей мыши вызывают меню **Express / Execution Control / While Loop** и обводят область, в которой находятся соединенные между собой приборы **DAQ Assistant Input** и **Comparison**. В результате создается круговой цикл. Далее удаляют в цикле контрольную кнопку **Stop – True or False** и соединяют выход **Result** прибора **Comparison** с красным индикатором **Stop**.

В результате вышеописанных действий создается **первый цикл** алгоритма автоматического регулирования параметров процесса сварки (см. рисунок 3.4, а). Его работа описывается следующим образом: при нажатии кнопки **RUN** программа ожидает момента нажатия сварщиком педали контактной машины и поступления на цифровой вход **P0.0** данного цикла цифрового сигнала величиной **+5 В**, после чего начинается следующий цикл.

Для альтернативного запуска системы в режиме симуляции создают подвижный регулятор **Fill Slide**, для этого на панели инструментов нажимают **Window / Show Front Panel**. В появившемся клеточном поле правой клавишей мыши вызывают **Controls / Express / Numeric Controls / Fill Slide**. Затем перетаскивают элемент **Fill Slide** на клеточное поле и подписывают «Пуск +5 В». На панели инструментов нажимают **Window / Show Block Diagram** и соединяют появившийся на белом поле символ со входом **Operand 1** прибора **Comparison** (рисунок 3.4, б).



а – при нажатии педали контактной машины; б – в режиме симуляции

Рисунок 3.4 – Цикл запуска системы автоматического регулирования

Во **втором цикле** алгоритма формируется сигнал напряжения, пропорциональный величине сварочного тока позиции «Нагрев 1» на первом участке циклограммы (см. рисунки 3.1 и 3.3), и выводится на аналоговый выход **ao0** платы NI USB 6251. Для этого необходимо создать виртуальный прибор генерирования аналогового сигнала управления. На рабочем поле во втором кадре в меню правой клавиши мыши нажимают **Functions / Express**. В появившемся окне виртуальных приборов перетаскивают левой клавишей мыши на рабочее поле прибор **DAQ Assistant**. После инициализации прибора появляется его меню **Create New Express Task**. Нажимают **Generate Signals / Analog Output / Voltage / ao0 / Finish**. В результате настраивается первый аналоговый вы-

ход a_0 устройства NI USB и появляется меню прибора **DAQ Assistant Output**, в котором в опции **Generation Mode** выбирают **N Samples** и нажимают «ОК». В результате на рабочем поле конфигурируется виртуальный блок **DAQ Assist Output** для генерации аналогового сигнала напряжения, пропорционального величине сварочного тока (рисунок 3.5).

Аналоговый сигнал управления задают координатно, т. е. в меню правой клавиши мыши нажимают **Express/ Input** и перетягивают левой клавишей мыши блок **Simulate Arbitrary Signal** на рабочее поле. После инициализации данного блока появляется его меню, в котором по координатам времени задают уровень напряжения управления, например, постоянное напряжение амплитудой 0,065 В, соответствующее величине сварочного тока $I_{CB} = 0,41I_{CB\max}$. Затем соединяют выход **Signal** виртуального прибора **Simulate Arbitrary Signal** с входом **Data** прибора **DAQ Assist Output**.

Правой клавишей мыши вызывают меню **Express / Execution Control / While Loop** и обводят мышью область, в которой находятся соединенные между собой приборы **DAQ Assist Output** и **Simulate Arbitrary Signal**. В результате создается круговой цикл. Далее удаляют в цикле контрольную кнопку **Stop – True or False**, нажимают в меню правой клавиши мыши **Express / Execution Control**, перетаскивают на рабочее поле блок **Elapsed Time** и после его инициализации задают в опции **Time Target** задержку до начала следующего цикла, равную длительности предварительного сжатия электродов согласно циклограмме процесса сварки, а выход **Time has Elapsed** соединяют с красным индикатором **Stop**.

В результате вышеописанных действий создается **второй цикл** координатного задания величины напряжения, пропорционального сварочному току на первом участке импульса при его ступенчатом задании (см. рисунок 3.5).

Для создания **третьего цикла**, который должен управлять питанием катушек электромагнитных реле К1 и К2, отвечающих соответственно за включение и выключение сварочного тока (см. рисунок 3.1), необходимо в третьем кадре последовательности создать виртуальный прибор генерации двух цифровых сигналов на цифровых выходах платы NI USB. Для этого на рабочем поле в меню правой клавиши мыши нажимают **Functions / Express**. В появившемся окне виртуальных приборов перетаскивают левой клавишей мыши на рабочее поле прибор **DAQ Assistant**. После инициализации прибора появляется его меню **Create New Express Task**. Нажимают **Generate Signals / Digital Output / Line Output / Port0 / Line 6, Port0 / Line 7 / Finish**. В результате настраиваются два цифровых выхода устройства NI USB и появляется меню прибора **DAQ Assistant Output**, в котором в опции **Generation Mode** выбирают опцию **1 Sample (On Demand)** и нажимают «ОК». В результате на рабочем поле конфигурируется виртуальный блок **DAQ Assistant Output** для генерации двух цифровых сигналов (рисунок 3.6).

Правой клавишей мыши вызывают меню **Programming / Array** и перетаскивают блок **Build array** на рабочее поле. Затем нажимают **Express / Arithmetic / Comparison / Boolean** и перетаскивают на это же поле блоки **True Constant** и **False Constant**. Затем соединяют выводы блоков **True Constant**

и **False Constant** с входами блока **Build array**, а вывод блока **Build array** – со входом виртуального прибора **DAQ Assistant Output**. В результате создается вариативная область для логических условий: **True** – подача цифрового сигнала высокого уровня на первый цифровой выход платы NI USB и включение электромагнитного реле K1, а значит и сварочного тока; **False** – подача цифрового сигнала низкого уровня на второй цифровой выход платы NI USB и отключение электромагнитного реле K2, ответственного за выключение сварочного тока (сварочный ток выключается при включенном реле K2).

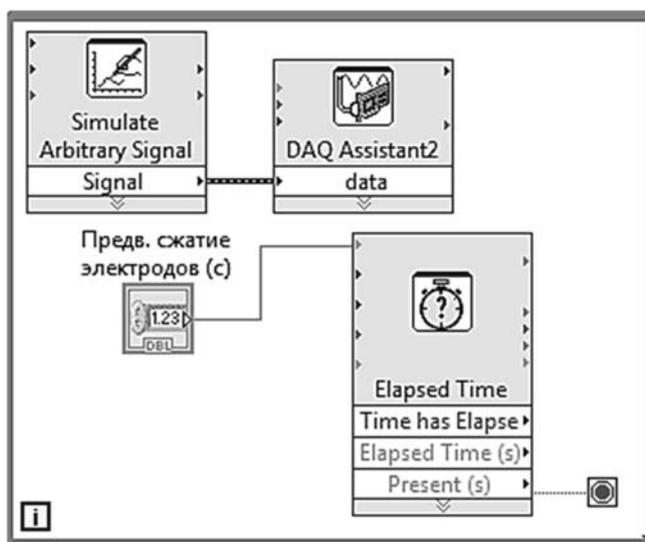


Рисунок 3.5 – Цикл задания времени предварительного сжатия электродов и величины напряжения, пропорционального сварочному току

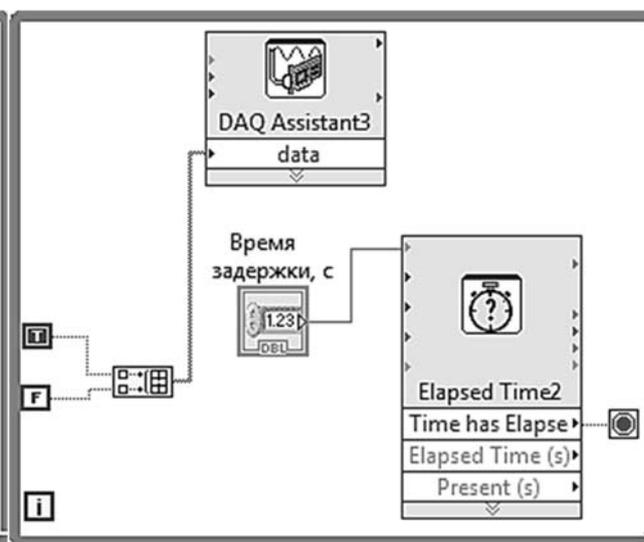


Рисунок 3.6 – Цикл включения электромагнитного реле K1 и сварочного тока

Правой клавишей мыши вызывают меню **Express / Execution Control / While Loop** и обводят область, в которой находятся соединенные между собой приборы **DAQ Assist Output** и **Build array**. В результате создается круговой цикл. Далее удаляют в цикле контрольную кнопку **Stop – True or False**, нажимают в меню правой клавиши мыши **Express / Execution Control** и перетаскивают на рабочее поле блок **Elapsed Time** и после его инициализации задают в опции **Time Target** задержку до начала следующего цикла, равную 0,0001 с, а выход **Time has Elapsed** соединяют с красным индикатором **Stop**.

В результате вышеописанных действий создается **третий цикл** алгоритма автоматического регулирования (см. рисунок 3.6).

Для создания **четвертого цикла**, который должен регистрировать и обрабатывать аналоговые сигналы процесса сварки на первом участке кривой сварочного тока, а также сравнивать фактические значения выделившейся в межэлектродной зоне энергии с требуемыми, необходимо в четвертом кадре последовательности создать виртуальный прибор регистрации двух сигналов аналоговыми входами платы NI USB. Для этого на рабочем поле в четвертом кадре в меню правой клавиши мыши нажимают **Functions / Express**. В появившемся окне виртуальных приборов перетаскивают левой клавишей мыши на

рабочее поле прибор **DAQ Assistant**. После инициализации прибора появляется его меню **Create New Express Task**. Нажимают **Acquire Signals / Analog Input / Voltage / ai0, ai1 / Finish**. В результате настраиваются два аналоговых входа ($ai0$ и $ai1$) устройства NI USB и появляется меню прибора **DAQ Assistant Input**, в котором в опции **Acquisition Mode** выбирают опцию **Continuous Samples**, в опции **Samples to Read** – 10, в опции **Rate (Hz)** – 1000 и нажимают «OK». В результате на рабочем поле конфигурируется виртуальный блок **DAQ Assistant Input** для приема двух аналоговых сигналов напряжения с датчиков в непрерывном режиме (рисунок 3.7). Назначение данного оператора в том, что он является виртуальным «приемщиком» мгновенных сигналов датчика сварочного тока I_{CB} (канал $ai0$) и датчика напряжения межэлектродного промежутка $u_{ЭЭ}$ ($ai1$) с платы NI USB 6251.

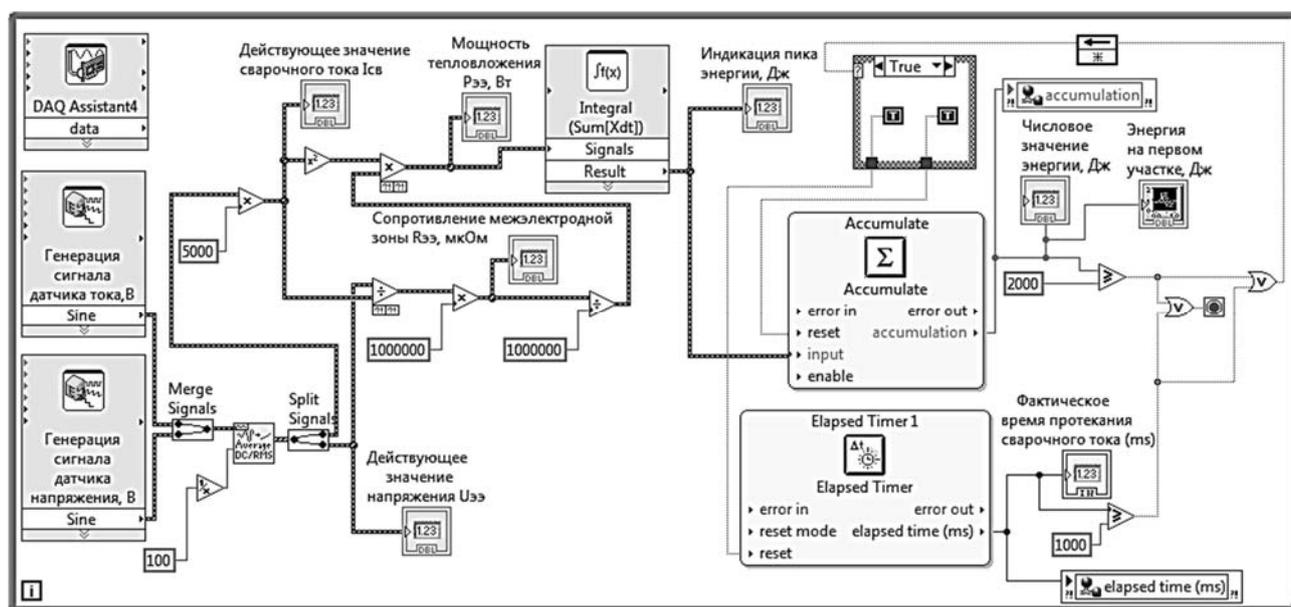


Рисунок 3.7 – Цикл расчета и сравнения энергии, выделяемой в зоне сварки, на первом участке импульса сварочного тока

Для альтернативного запуска четвертого цикла в режиме симуляции создают блок генерации сигнала датчика тока. Для этого на рабочем поле в меню правой клавиши мыши нажимают **Functions/ Express/ Signal Analysis**. В появившемся окне виртуальных приборов перетаскивают левой клавишей мыши на рабочее поле прибор **Simulate Signal**. В открывшемся меню **Configure Simulate Signal** выбирают синусоидальный сигнал **Sine** частотой 50 Гц. Амплитуда сигнала выбирается с учетом тарировочного коэффициента датчика тока $K_{ДТ} = 5000$. Например, если задается параметр **Amplitude** равным 3 В, то амплитуда сварочного тока $I_{CBmax} = 3 \cdot 5000 = 15000 \text{ А} = 15 \text{ кА}$. Частота выборки на канал в секунду **Samples per second** – 1000 Гц, количество выборок **Number of samples** – 10.

Аналогичным образом создается блок генерации сигнала датчика напряжения межэлектродной зоны. Амплитуду сигнала выбирают равной 2 В.

Все принимаемые сигналы на блок-схеме протекают через единый канал, поэтому разъемы **Sine** двух приборов **Simulate Signal** объединяются с помощью прибора **Merge Signals** из меню **Express / Signal Manipulation**.

Генерируемые мгновенные сигналы датчиков сварочного тока и напряжения необходимо преобразовать в действующие. Для этого нажимают **Functions / Signal Processing / Waveform Measurements** и перетаскивают блок **Average DC / RMS**. Для задания интервала расчета к выводу **averaging time** подключают блок «**1/x**», который находится в меню **Functions / Mathematics / Numeric**. Затем на блоке «**1/x**» выбирают **Create/ Constant/ 100**. Делают это, чтобы задать период усреднения (**averaging time = 0,001 c**) – интервал времени, для которого получают один результат измерения.

После расчета действующих значений для разделения мгновенных сигналов сварочного тока I_{CB} и напряжения межэлектродной зоны $U_{ЭЭ}$ необходимо использовать делитель сигнала **Split Signals**, который находится в меню **Express / Signal Manipulation**.

Для тарировки сигнал датчика тока умножают на 5000. Для этого нажимают **Functions / Mathematics / Numeric / ×/ Create / Constant / 5000**.

Полученную блок-диаграмму дополняют оператором деления значений действующих напряжений на значения действующих сварочных токов, чтобы получить график изменения сопротивления межэлектродной зоны во времени. Умножают на 10^6 , чтобы перевести ом в микроом.

В блок-диаграмму включают оператор возведения сигнала в квадрат «**X²**» и оператор умножения «**×**», который перемножает квадратичный сигнал тока на сигнал сопротивления по формуле $P_{ЭЭ}(\tau_{CB}) = I_{CB}(\tau_{CB})^2 \cdot R_{ЭЭ}(\tau_{CB})$, в результате чего рассчитывается мощность тепловложения в зону сварки $P_{ЭЭ}$. Сигнал сопротивления делят на 10^6 , чтобы перевести микроом в ом.

В диаграмму добавляют оператор интегрирования **Time Domain**, в открывшемся меню которого **Configure Time Domain Math** выбирают математическую операцию **INTEGRAL (Sum[Xdt])**, а в разделе **Calculation Mode** (режим расчета) – **Per segment calculation** (расчет по сегментам).

Для того чтобы цикл просчитывал полную выделившуюся в зоне сварки энергию за конкретное время, необходимо добавить в алгоритм расчета блок аккумуляции значений энергии, но этот блок относится к категории **Real Time**, поэтому для его добавления необходимо создать проект и добавить в проект всю кадровую последовательность циклов.

Для создания проекта в меню **LabVIEW** нажимают **File/ New Project/ Add**, после чего проект создан. После этого сохраняют файл кадровой последовательности и проект, выходят из **LabVIEW** и перезапускают проект. Затем в проекте открывают файл кадровой последовательности, и только тогда в него можно добавить любой из модулей категории **Real Time**.

В меню правой клавиши мыши нажимают **Real Time / Function Blocks / Accumulate-Collecte** и перетаскивают блок **Accumulate** на рабочее поле.

Затем соединяют выход **Result** блока **INTEGRAL (Sum[Xdt])** с входом **Input** блока **Accumulate**. Выход **Accumulation** блока **Accumulate** соединяют с оператором сравнения для выполнения условия достижения энергией,

выделяемой в зоне сварки, требуемого значения. Для вызова оператора сравнения в меню правой клавиши мыши нажимают **Express / Arithmetic / Comparison / Comparison / Greater or = ?**. В этом же операторе задают нормированное значение энергии (в джоулях), которая должна выделиться в зоне сварки на первом участке кривой сварочного тока.

Создают локальную переменную для расчета энергии. Для этого в меню правой клавиши мыши при ее нажатии на операторе сравнения выбирают **Create / Shared Variable Node / New Shared Variable / Accumulation**.

Для создания цикла в меню правой клавиши мыши нажимают **Express / Execution Control/ While Loop** и обводят область, в которой находятся соединенные между собой элементы четвертого цикла кадровой последовательности. В результате создается круговой цикл.

В процессе сварки может возникнуть ситуация, когда сварщик по ошибке настроит на регуляторе цикла сварки минимальную длительность протекания сварочного тока значительно меньшую, чем требуется для сварки. Чтобы в данной ситуации алгоритм регулирования экстренно завершился и чтобы избежать ситуации, когда после выключения сварочного тока регулятором программа продолжает регистрировать показания датчиков на уровне помех:

- дополняют цикл логическими условиями «ИЛИ» (**Express / Arithmetic / Comparison / Boolean / Or**);

- вводят таймер **Real Time** для задания фиксированного времени экстренного завершения цикла и всей программы; для этого в меню правой клавиши мыши нажимают **Real Time / Function Blocks / Timer** и перетаскивают мышью блок **Elapsed Timer** на рабочее поле; на выходе таймера создают числовой индикатор времени, оператор сравнения с числом, например, 1000 мс, и выход оператора сравнения соединяют с логическим оператором «ИЛИ»;

- создают локальную переменную для отсчета фактического времени цикла (для экстренного завершения программы); для этого в меню правой клавиши мыши при ее нажатии на операторе сравнения выбирают **Create / Shared Variable Node / New Shared Variable/ Elapsed Time**;

- удаляют в цикле контрольную кнопку **Stop – True or False** и выход логического оператора «ИЛИ» соединяют с красным индикатором **Stop**.

При завершении цикла происходит сброс таймера **Elapsed Timer** и блока **Accumulate** подачей сигналов высокого уровня на их входы **Reset**. Сигнал сброса поступает с выхода логического элемента **Or** на вход блока **Case Structure** из меню **Programming/ Structures**. Блок **Case Structure** формирует сигналы высокого уровня при входном сигнале **True** и сигналы низкого уровня при входном сигнале **False**.

В результате создается **четвертый цикл** алгоритма (см. рисунок 3.7).

Пятый цикл (рисунок 3.8) создается по аналогии с третьим (см. рисунок 3.6), но здесь срабатывает нормально замкнутое реле К2, размыканием своего контакта выключающее сварочный ток (см. рисунок 3.1). Одновременно начинается отсчет времени проковки таймером **Elapsed Time3**.

Шестой цикл (рисунок 3.9) аналогичен пятому, но он сбрасывает реле К1

и K2 в исходное состояние по логическому условию **False**. Одновременно начинается отсчет времени паузы между сварками таймером **Elapsed Time4**.

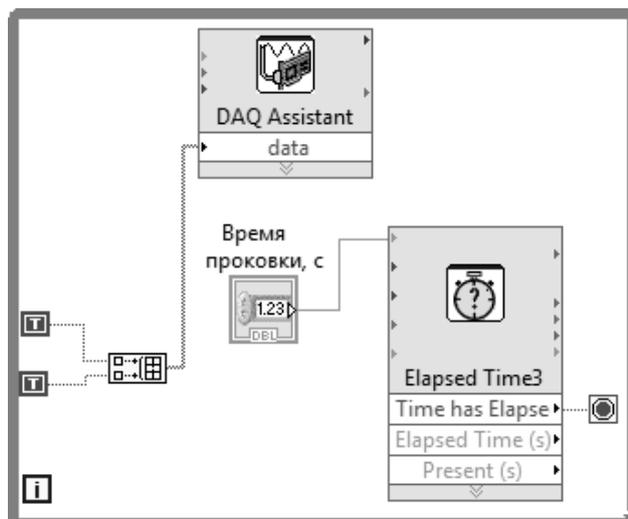


Рисунок 3.8 – Цикл выключения сварочного тока и отсчета времени проковки

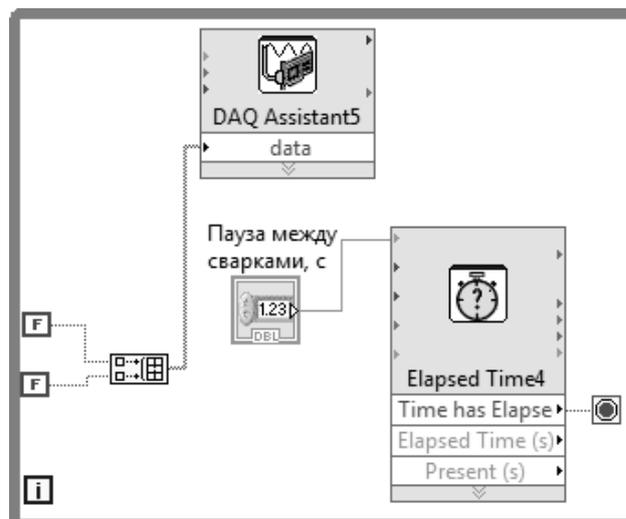


Рисунок 3.9 – Цикл сброса реле K1 и K2 и отсчета времени паузы между сварками

5 Запустить в режиме симуляции программу активного контроля энергии тепловложения в зону контактной сварки. Наблюдать рассчитанные параметры режима сварки и график аккумуляции энергии. Определить фактическое время протекания сварочного тока при изменении энергии.

3.4 Содержание отчета

- 1 Описание назначения регулятора контактной сварки.
- 2 Описание экспериментальной установки для реализации процесса сварки деталей с внешним заданием ступенчатого импульса сварочного тока.
- 3 Краткий алгоритм и сущность работы имитационной модели системы внешнего управления регулятором цикла сварки контактной машины.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите экспериментальную установку для реализации процесса внешнего управления работой регулятора цикла сварки.
- 2 Как задается ступенчатый импульс сварочного тока в системе автоматического управления?
- 3 Опишите основные блоки и операторы имитационной модели системы внешнего управления регулятором цикла сварки контактной машины.

4 Лабораторная работа № 4. Разработка программы управления процессом контактной рельефной сварки Т-образных соединений по величине и скорости перемещения подвижного электрода

Цель работы

1 Изучить особенности аппаратной реализации корректирующей системы регулирования мощности при рельефной сварке.

2 Изучить общую структуру DAQ-устройства сбора данных М серии NI USB 6251 и его функциональные возможности.

3 Изучить принцип работы преобразователя линейных перемещений ЛИР-17 для контроля перемещения подвижного электрода.

4 Разработать программу корректирующей системы регулирования мощности при рельефной сварке.

4.1 Оборудование, приборы и материалы

1 Машина контактной точечной сварки МТ-3201.

2 Датчик сварочного тока ПИ-44-1 – пояс Роговского (0,5...200 кА) и датчик напряжения типа кабеля делителя 1:1 (0,2...10 В).

3 Модульный аналого-цифровой и цифро-аналоговый измерительный преобразователь (АЦП, ЦАП) напряжений NI-USB 6251 (DAQ-устройство сбора данных серии М).

4 Однофазный тиристорный регулятор ТРМ-1М-У(30-720).

5 Блок питания и согласования напряжений (БПСН).

6 Персональная ЭВМ с программным комплексом LabVIEW 2017.

7 Оптоэлектронный преобразователь линейного перемещения подвижного электрода ЛИР-17-40-01-05ПИ.

4.2 Общие теоретические сведения

4.2.1 Структура корректирующей системы управления контактной сварочной машиной.

Рельефная сварка на машинах контактной сварки переменного тока с применением серийной аппаратуры даже при широкой вариации параметров режима не может обеспечить 100-процентный положительный результат в плане улучшения качества Т-образных сварных соединений. Наиболее перспективным направлением повышения качества сварных соединений при рельефной сварке является применение систем компьютерного программного управления (СПУ) контактными машинами.

Для реализации корректирующей СПУ рельефной сваркой была разработана экспериментальная установка (рисунок 4.1), которая состоит из следующих компонентов: 1 – машина контактной сварки МТ-3201; 2 – регулятор цикла

сварки РКС-801 для управления пневмораспределителями привода сжатия электродов; 3 – педаль запуска; 4 – однофазный тиристорный регулятор ТРМ-1М-У(30-720); 5 – оптоэлектронный преобразователь линейного перемещения подвижного электрода ЛИР-17-40-01-05ПИ; 6 – датчик напряжения (± 10 В); 7 – датчик тока «Пояс Роговского» (± 200 кА); 8 – модульный аналого-цифровой и цифроаналоговый измерительный преобразователь напряжений NI-USB 6251 (DAQ-устройство сбора данных серии М); 9 – терминал управления (персональная ЭВМ + программное обеспечение LabVIEW).

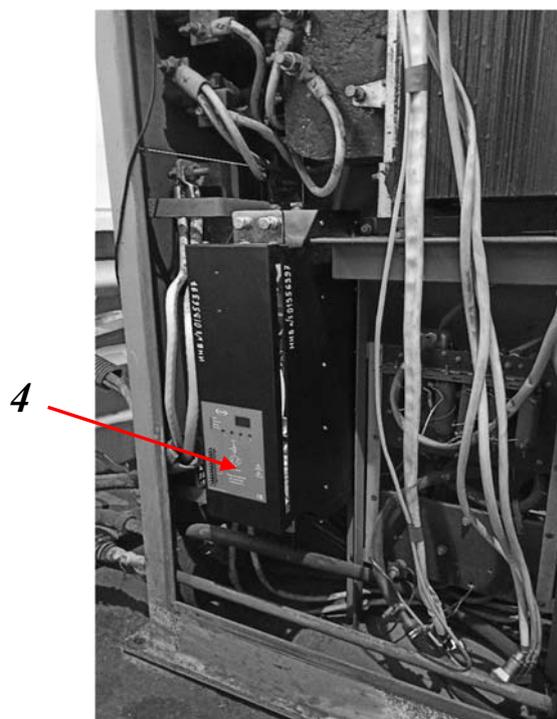
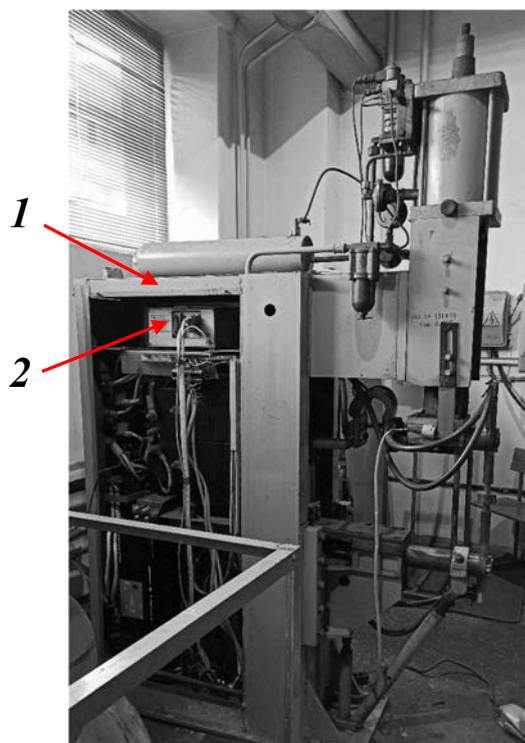


Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка для реализации корректирующей системы регулирования мощности при рельефной сварке на базе машины МТ-3201

Использование персональной ЭВМ при разработке алгоритмов управления контактными сварочными машинами и отработке оптимальных режимов контактной точечной сварки целесообразно по следующему ряду причин:

- ЭВМ в связке с микроконтроллером становится универсальным инструментом для реализации алгоритмов управления любой сложности, при этом экономятся материальные затраты на другие дорогостоящие аппаратные средства и модернизацию устройства самой сварочной машины;

- существует возможность детальной записи и последующего замедленного воспроизведения необходимого потока данных, получаемого при сварке на экспериментальной установке.

В корректирующих системах регулирования мощности длительность λ включенного состояния тиристоров может быть использована для определения коэффициента мощности $\cos\varphi$ сварочной машины. Вычисление угла α_{n+1} открытия тиристоров в следующем периоде будет определяться на основе измерения в предыдущем периоде действующих значений сварочного тока I_2 и напряжения $U_{\text{ЭЭ}}$, λ , $\cos\varphi$ и других параметров для вычисления тепловыделения на сварочном участке «электрод – электрод».

Совершенствование термодетформационного цикла контактной рельефной сварки в силу ограниченности процесса, связанной с кратковременной осадкой рельефа, неизбежно требует оптимизации ввода электрической энергии в межэлектродную зону за счет использования обратных связей по таким параметрам, как мощность сварки, перемещение подвижного электрода и усилие сжатия электродов, что предполагает применение более универсальной пускорегулирующей аппаратуры, позволяющей реализовывать адаптивное управление процессом сварки непосредственно в ходе ее протекания. Главной задачей такого управления является обеспечение стабильного высокого качества формируемых сварных соединений без прерывания технологического цикла.

Адаптивное управление процессом контактной рельефной сварки позволяет более плавно задавать параметры режима сварки. По сравнению с технологией сварки с жесткопрограммируемой системой управления мощностью способ адаптивного управления с коррекцией мощности обеспечивает точное и более быстрое задание параметров режима в реальном времени. В качестве обратной связи используется сигнал с датчика перемещений $h_{\text{ЭЛ}}$, который регистрирует перемещение верхнего подвижного электрода сварочной машины.

Иллюстрацией адаптивного управления является предложенный способ контактной рельефной сварки с коррекцией мощности P , вводимой в межэлектродную зону. На циклограмме способа (рисунок 4.2) отображается мощность P , усилие сжатия F и перемещение подвижного электрода $h_{\text{ЭЛ}}$ на разных этапах протекания процесса сварки.

В ходе протекания процесса сварки периодически измеряется перемещение верхнего электрода $h_{\text{ЭЛ}}$ и изменяется величина мощности P в текущем полупериоде сетевого напряжения на основании заданных значений и измеренных в предыдущем полупериоде сетевого напряжения.

Так как величина $h_{\text{ЭЛ}}$ сама по себе не имеет четких ориентиров, для ее кон-

кретизации в пространстве требуется выбрать начальную точку отсчета. Наиболее удобным вариантом выбора является момент касания электрода и детали при предварительном сжатии $F_{ПР.СЖ}$, при этом начальная точка определяется высотой зазора, равной высоте рельефа: $h_3 = h_P$. По истечении времени предварительного сжатия высота рельефа h_P несколько уменьшается, что определяется либо увеличением контактной площадки между рельефом и деталью под воздействием усилия сжатия, либо степенью внедрения рельефа в деталь.

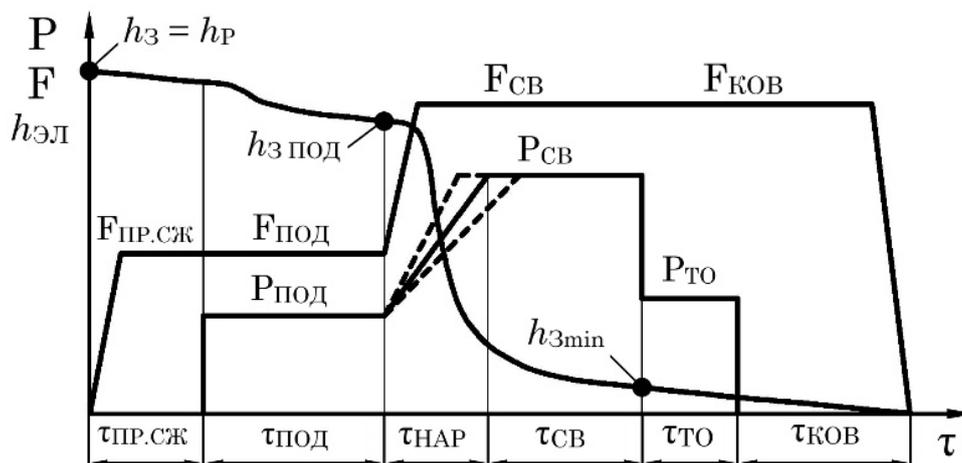


Рисунок 4.2 – Циклограмма способа контактной рельефной сварки с адаптивным управлением мощностью

При включении начального сварочного тока подогрева $I_{ПОД}$ начинает действовать корректирующая система регулирования мощности. Время измерения параметров режима рельефной сварки $\tau_{изм}$ совпадает со временем включения тиристоров λ и производится в течение каждого полупериода сетевого напряжения.

Мощность $P_{ПОД}$ и усилие $F_{ПОД}$ при подогреве оказывают решающее влияние на степень разогрева контакта деталь – деталь. Эти величины связаны между собой таким образом: уменьшение усилия $F_{ПОД}$ требует пропорционального снижения подводимой мощности $P_{ПОД}$ для регулирования степени разогрева контактов и избежания выплесков.

При подогреве происходит перемещение электрода до момента достижения высоты зазора $h_{3 ПОД}$. Эту величину можно использовать для определения момента начала нарастания мощности и усилия сжатия.

Время нарастания мощности $\tau_{НАР}$ должно согласовываться с характером перемещения верхнего электрода. Для этих целей может использоваться датчик перемещения, который с помощью преобразователя сигнала перемещения воздействует на заданное значение мощности $P_{2ЗД}$ через коэффициент $K_{ДП}$. Поэтому время нарастания мощности $\tau_{НАР}$ может изменяться в зависимости от скорости деформации рельефа. Время $\tau_{НАР}$ должно быть больше времени нарастания усилия сжатия электродов до максимального значения $F_{СВ}$, необходимого для введения в зону сварки максимальной мощности $P_{СВ}$, иначе вероятность появления выплесков значительно повысится.

В ходе проведенных исследований определено, что плавное нарастание мощности от подогрева $P_{\text{Под}}$ к максимальной мощности при сварке $P_{\text{СВ}}$ позволяет снизить появление выплеска расплавленного металла. Плавное нарастание мощности без паузы полностью исключает бросок намагничивающего тока. Использование циклограмм с паузой между импульсами тока подогрева и сварки не позволяет исключать динамический бросок мощности.

4.2.2 Однофазный тиристорный регулятор ТРМ-1М-У (30-720).

Регулятор ТРМ-1М предназначен для плавной регулировки мощности нагрузки. Он может управляться от любого устройства управления: постоянным напряжением $0 \dots 10 \text{ В}$ ($0 \dots 5 \text{ В}$) или током $0 \dots 20 \text{ мА}$ ($4 \dots 20 \text{ мА}$).

На лицевой панели регулятора ТРМ-1М (рисунок 4.3, а) расположены:

- трёхразрядный семисегментный индикатор 1;
- четыре кнопки управления 2;
- четыре светодиодных индикатора состояния регулятора 3;
- разъём для подключения питания и внешних цепей управления 4.

Схема подключения ТРМ-1М без использования дополнительных входов управления и сигнализации приведена на рисунке 4.3, б.

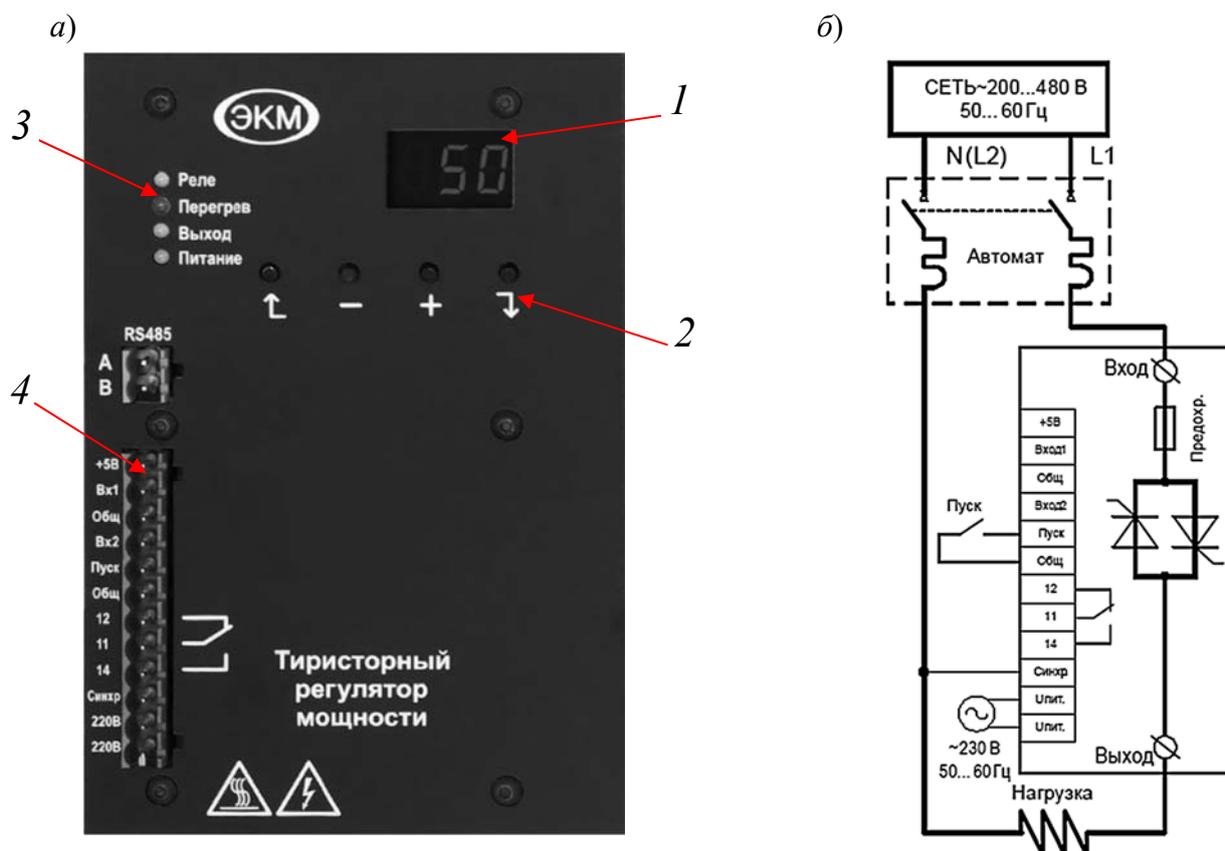


Рисунок 4.3 – Однофазный тиристорный регулятор ТРМ-1М-У (30-720)

4.2.3 Блок питания и согласования напряжений БПЧН.

Блок обеспечивает гальваническую развязку и согласование уровней логической единицы NI USB «+5 В» и напряжения питания катушек пневмораспре-

делителей «+24 В», а также измерение сетевого напряжения с помощью согласующего трансформатора TV2, который снижает напряжение питания с 380 до 5 В, доступного для измерения преобразователем NI USB.

4.2.4 DAQ-устройства сбора данных M серии NI USB 6251.

Устройство сбора данных NI USB 6251 – это универсальный аналого-цифровой преобразователь напряжений, представляющий собой цифровую портативную микросхемную плату, которая позволяет регистрировать различные электрические сигналы, поступающие на ее входы, и формировать выходные аналоговые и цифровые сигналы управления.

Преобразователи напряжения измерительные аналого-цифровые и цифро-аналоговые модульные NI USB 6251 (DAQ-устройства сбора данных серии M) работают под управлением драйверов NI-DAQmx. DAQ-устройства NI USB 6251 с винтовыми клеммами имеют 16 каналов аналогового ввода (AI), два канала аналогового вывода (AO), 24 линии цифрового ввода-вывода (DIO) и два счетчика.

В состав типовой системы сбора данных входят датчики и измерительные преобразователи, нормирующие устройства, соединительные кабели, устройство M серии, программное обеспечение и персональный компьютер. DAQ-устройство дискретизирует сигналы, выполняет цифроаналоговые преобразования для генерации сигналов аналогового вывода, а также воспринимает сигналы цифрового ввода и формирует сигналы цифрового вывода. На рисунке 4.4 показаны компоненты, которые являются общими для всех устройств серии M.

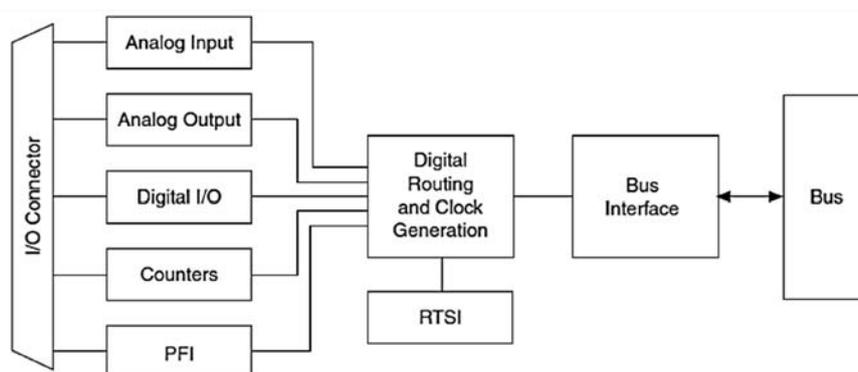


Рисунок 4.4 – Обобщенная блок-схема DAQ-устройства серии M

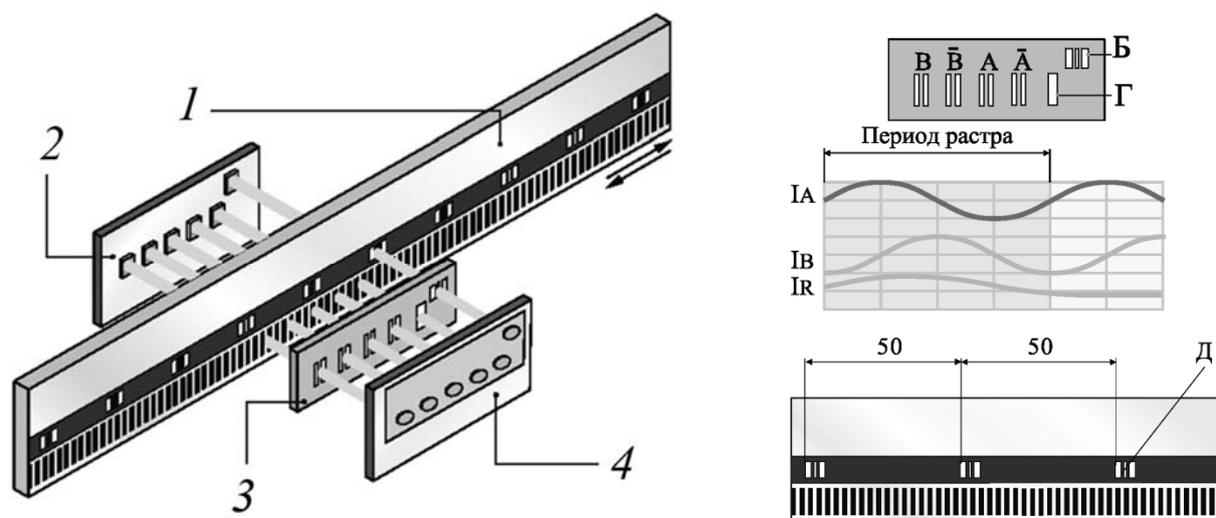
Состав DAQ-устройства: **I/O Connector** – разъем ввода-вывода, **Analog Input** – аналоговый ввод, **Analog Output** – аналоговый вывод, **Digital I/O** – цифровой ввод-вывод, **Counters** – счетчики, **PFI** – программируемый функциональный интерфейс, **Digital Routing and Clock Generation** – маршрутизация цифровых сигналов и генерация тактовых импульсов, **RTSI** – шина интеграции системы реального времени, **Bus Interface** – шинный интерфейс, **Bus** – шина.

Средством программирования NI-USB является программный комплекс LabVIEW, позволяющий писать программы в графическом коде. Среда графического программирования LabVIEW позволяет разрабатывать виртуальные

прототипы реальных систем управления, создавать терминалы управления, отлаживать созданные прототипы систем в интерактивном режиме и внедрять их в реальные устройства под управлением персональной ЭВМ. Программа LabVIEW позволяет не только имитировать электротехнические приборы, датчики, регуляторы и т. д., но и программировать ход протекающих через них электрических сигналов. Это возможно благодаря мощной инструментальной библиотеке данного программного продукта

4.2.5 Оптоэлектронный преобразователь линейных перемещений ЛИР-17.

В основу работы преобразователей линейных перемещений ЛИР-17 (рисунок 4.5) положен метод оптоэлектронного сканирования штриховых растров. Два кинематически связанных звена: шкала растровая и головка считывающая (анализатор считывающего узла) образуют растровое сопряжение. При относительном перемещении шкалы 1 и анализатора 3 сопряжения регулярного растра шкалы с растрами анализатора модулируют проходящие через них потоки излучения от платы осветителей 4, воспринимаемые соответствующими фотоприемниками 2. Шкала 1 содержит две параллельные информационные дорожки: регулярного растра и референтных меток.



1 – шкала растровая (считывающий узел); 2 – плата фотоприемников (кремниевые фотодиоды); 3 – растровый анализатор (пластина индикаторная); 4 – плата осветителей (инфракрасные излучатели)

Рисунок 4.5 – Оптоэлектронный преобразователь линейных перемещений ЛИР-17

Анализатор растровый содержит четыре окна А, \bar{A} , В, \bar{B} инкрементного считывания и окно референтной метки Б. Эти четыре окна позиционно согласованы с дорожкой регулярного растра шкалы. Периоды растров в окнах равны периодам регулярного растра шкалы (20 или 40 мкм). При этом в каждой паре окон растры смещены друг относительно друга на величину, равную половине их периода, а взаимный пространственный сдвиг растров между парами окон составляет четверть периода растров. Последовательно с

растровыми окнами расположено прозрачное окно Г. Референтная метка Б позиционно согласована с дорожкой референтных меток шкалы.

Построенный таким образом канал считывания информации позволяет сформировать два периодических сигнала токов I_A и I_B , сдвинутых по фазе, исключая из них постоянную составляющую. Взаимный характер изменения указанных сигналов дает возможность определить направление перемещения, а число их периодов при данном перемещении его величину L . Специальные методы обработки сигналов I_A и I_B позволяют обеспечить контроль перемещения с дискретностью, много меньшей периода регулярного растра.

Для координатной привязки головки считывания к шкале преобразователя используется дорожка референтных меток, содержащая как минимум одну функционирующую референтную метку, представляющую собой специальный растр, с заданной функцией расположения штрихов и их ширины.

В процессе относительного перемещения шкалы и головки считывающей при совмещении полей Д шкалы и поля Б анализатора с фотоприемника, сопряженного с полем Б, снимается аналоговый сигнал с ярко выраженным максимумом. Этот сигнал используется устройством обработки для координатной привязки считывающего узла к началу диапазона перемещения. При этом учитывается значение опорного сигнала, задаваемого фотоприемником, соответствующим окну Г анализатора.

По такой принципиальной схеме разработаны инкрементные преобразователи ЛИР-17. В преобразователях ЛИР-17 шкала жестко связана со штоком, который получает рабочее перемещение относительно анализатора неподвижного считывающего узла через контакт его наконечника с изделием пользователя.

4.3 Порядок выполнения работы

4.3.1 Изучение структуры программы корректирующей системы регулирования мощности.

Функциональная схема программы управления корректирующей системы регулирования мощности, вводимой в межэлектродную зону при рельефной сварке, представлена на рисунке 4.6.

Запуск программы осуществляется нажатием на двоящую педаль пуска SB1, SB2 машины контактной сварки. При этом срабатывает цифровой триггер PFI 0 (разъём J1_DIO) и запускает блок цикла сварки, который с помощью таймеров-счетчиков отсчитывает интервалы времени предварительного сжатия, сварки, проковки, паузы. Блок цикла управляет включением катушек электропневмоклапанов сжатия и проковки (ЭПК 1 и ЭПК 2), через блок питания и согласования напряжений БПСН, а также включением сварочного тока цифровым триггером PFI 1 (разъём J1_DIO) после отсчета предварительного сжатия, заданием напряжения управления U_V для блока ТРМ-1М и, соответственно, угла открытия тиристоров α .

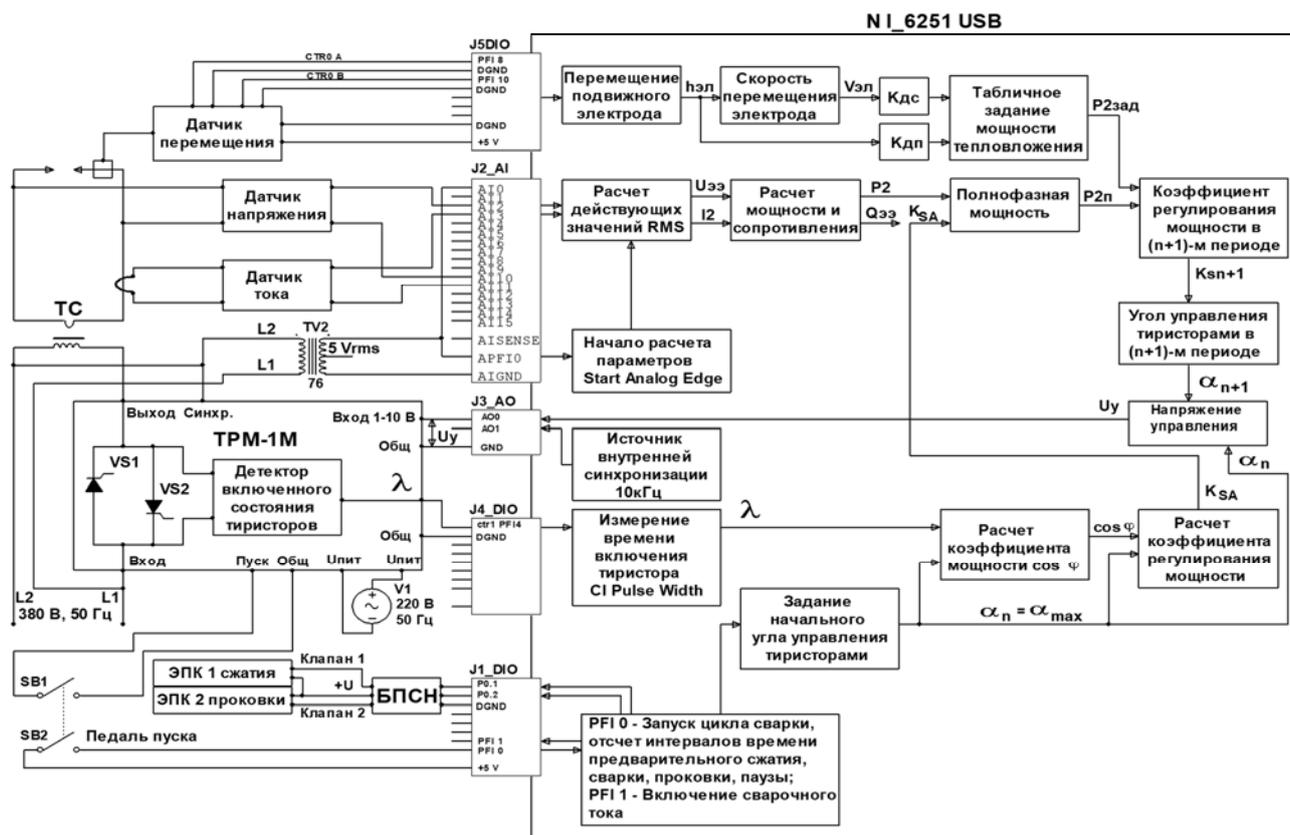


Рисунок 4.6 – Функциональная схема корректирующей системы регулирования мощности при рельефной сварке

Блок ТрМ-1М открывает тиристоры с начальным углом управления $\alpha_n = \alpha_{\max}$ и подключает сварочный трансформатор ТС к сети, во вторичной цепи начинает протекать сварочный ток. Во время сварки измеряются сетевое напряжение u_1 трансформатором TV2 (аналоговый вход AI 0 – AI GND, несимметричная заземленная схема подключения RSE, разъём J2_AI), напряжение межэлектродной зоны $u_{\text{ЭЭ}}$ (дифференциальный аналоговый вход AI 2 – AI 10 DIFF) и сварочный ток i_2 (дифференциальный аналоговый вход AI 3 – AI 11) с помощью датчиков тока и напряжений.

Начало расчета действующих значений RMS параметров U_1 , $U_{\text{ЭЭ}}$, I_2 задается с помощью аналогового триггера на входе APFI 0 (Start Analog Edge).

Начало расчета действующих значений RMS совпадает с переходом через ноль установившегося однофазного (принужденного) тока $i_{\text{ПР}}$, определяемого формулой

$$i_{\text{ПР}} = I_{2M} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi). \quad (4.1)$$

Мощность сварки $P_{\text{ЭЭ}}$ в текущем полупериоде рассчитывается по формуле $P_{\text{ЭЭ}} = U_{\text{ЭЭ}} \cdot I_{\text{СВ}}$, энергия $Q_{\text{ЭЭ}}$ определяется интегрированием мощности $P_{\text{ЭЭ}}$.

Во время протекания тока детектор включенного состояния тиристоров формирует прямоугольный импульс, равный по времени длительности включенного состояния тиристоров λ . Этот сигнал поступает на вход счетчика ctr1 PF14 (разъем J4_DIO), с помощью которого осуществляется измерение ширины импульса λ (CI Pulse Width).

Далее на основании начального угла управления тиристорами $\alpha_n = \alpha_{\max}$ и длительности включенного состояния тиристоров λ по аппроксимирующей зависимости определяется коэффициент мощности $\cos\varphi = f(\alpha_n, \lambda)$ сварочной машины:

$$\begin{cases} \cos\varphi = f(\lambda, \alpha) = A_2 \cdot \lambda^2 + A_1 \cdot \lambda + A_0; \\ A_0 = f_0(\alpha) = -2,4199\alpha^4 + 13,4102\alpha^3 - 28,306\alpha^2 + 25,0677\alpha - 3,9166; \\ A_1 = f_1(\alpha) = 3,0552\alpha^4 - 15,988\alpha^3 + 31,9418\alpha^2 - 28,0098\alpha + 7,6002; \\ A_2 = f_2(\alpha) = -1,7121\alpha^4 + 9,3009\alpha^3 - 19,142\alpha^2 + 17,4411\alpha - 5,7881. \end{cases} \quad (4.2)$$

Расчет коэффициента регулирования мощности происходит по аппроксимирующей зависимости $k_{SA} = f(\alpha_n, \cos\varphi)$.

$$\begin{cases} k_{S,A} = f(\alpha, \cos\varphi) = A_3 \cdot \alpha^3 + A_2 \cdot \alpha^2 + A_1 \cdot \alpha + A_0; \\ A_0 = f_0(\cos\varphi) = -10,842\cos^4\varphi + 20,631\cos^3\varphi - 11,149\cos^2\varphi - 1,322\cos\varphi + 2,889; \\ A_1 = f_1(\cos\varphi) = 21,885\cos^4\varphi - 46,53\cos^3\varphi + 33,79\cos^2\varphi - 8,801\cos\varphi + 0,811; \\ A_2 = f_2(\cos\varphi) = -15,402\cos^4\varphi + 34,185\cos^3\varphi - 27,444\cos^2\varphi + 9,8\cos\varphi - 2,339; \\ A_3 = f_3(\cos\varphi) = 3,521\cos^4\varphi - 8,013\cos^3\varphi + 6,685\cos^2\varphi - 2,577\cos\varphi + 0,648. \end{cases} \quad (4.3)$$

Зная коэффициент регулирования мощности k_{SA} и мощность тепловложения P_2 в текущем полупериоде, можно найти полнофазную мощность $P_{2П} = P_2 / k_{SA}$.

Задание мощности тепловложения $P_{23АД}$ осуществляется в табличном виде с интервалом 10 мс, равным полупериоду сетевого напряжения.

Таким образом, коэффициент регулирования мощности $k_{S_{n+1}}$ в следующем $(n + 1)$ -м периоде определяется из соотношения $k_{S_{n+1}} = P_{23АД} / P_{2П}$. Зная коэффициент $k_{S_{n+1}}$, можно определить угол управления тиристорами в $(n+1)$ -м периоде α_{n+1} и сформировать напряжение управления U_V для блока ТРМ-1М на аналоговом выходе АО 0–GND (разъем J3_AO). Далее процесс пересчета повторяется в соответствии с заданной мощностью $P_{23АД}$. Выключение тока происходит при задании нулевой мощности, при этом начинается отчет времени проковки сварного соединения. После выдержки паузы между сварками циклограмма процесса запускается сначала.

В схеме программного управления происходит коррекция заданной мощности $P_{23АД}$ в зависимости от измеренных в текущем полупериоде характеристик перемещений подвижного электрода.

Мощность при подогреве $P_{\text{ПОД}}$ зависит от усилия $F_{\text{ПОД}}$ таким образом: уменьшение усилия $F_{\text{ПОД}}$ требует пропорционального снижения подводимой мощности $P_{\text{ПОД}}$ для регулирования степени разогрева контактов. Усилие $F_{\text{ПОД}}$ определяется по графикам, приведенным в инструкции по эксплуатации сварочной машины, в зависимости от давления в пневмоцилиндре.

Поэтому в системе на основании измеренного усилия $F_{\text{ПОД}}$ корректируется заданная мощность $P_{23\text{АД}}$ введением коэффициента датчика перемещения $K_{\text{ДП}}$, т. е. $P_{\text{ПОД}} = K_{\text{ДП}} \cdot P_{23\text{АД}}$. При этом величины перемещений за время подогрева $\tau_{\text{ПОД}}$ должны соответствовать среднему значению диапазона 80...260 мкОм при оптимальном токе подогрева $I_{\text{ПОД}}$.

Для корректировки времени нарастания мощности $\tau_{\text{НАР}}$ от подогрева к сварке может использоваться коэффициент датчика скорости $K_{\text{ДС}}$ перемещения электрода, который воздействует на заданное значение мощности $P_{23\text{АД}}$. Поэтому время нарастания мощности $\tau_{\text{НАР}}$ может изменяться в зависимости от измеренной скорости перемещения электрода.

Таким образом, разработанная программа управления корректирующей системой позволяет производить задание параметров режима сварки для осуществления коррекции без прерывания технологического процесса сварки и осуществлять разработанный ранее способ адаптивного управления.

4.3.2 Запуск корректирующей системы регулирования мощности.

Задать параметры режима сварки и циклограмму процесса. Задать эталонную мощность сварки для конкретного изделия. Наблюдать коррекцию параметров режима в процессе сварки. Оценить точность введения заданной энергии в зону сварки.

4.4 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, структуру корректирующей системы управления контактной сварочной машиной, постановку задачи, распечатку исходных данных и результатов расчета программы, оценку точности введения заданной энергии в зону сварки и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 Опишите особенности аппаратной реализации корректирующей системы регулирования мощности при рельефной сварке.

2 Опишите структуру DAQ-устройства сбора данных М-серии NI USB 6251 и его функциональные возможности.

3 Поясните принцип работы оптоэлектронного преобразователя линейных перемещений ЛИР-17 для контроля перемещения подвижного электрода.

4 Поясните принцип работы тиристорного регулятора ТРМ-1М-У(30-720).

5 Поясните последовательность действия программы корректирующей системы регулирования мощности при рельефной сварке с контролем линейного перемещения подвижного электрода.

Список литературы

- 1 **Фурманов, С. М.** Пути совершенствования термодетформационных циклов контактной точечной и рельефной сварки: монография / С. М. Фурманов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – 267 с.
- 2 Сварочные процессы и оборудование: учебное пособие / В. А. Ленивкин [и др.]; под ред. В. А. Ленивкина. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 308 с.
- 3 **Евстифеев, А. В.** Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя / А. В. Евстифеев. – Москва: Додэка-XXI, 2007. – 592 с.
- 4 **Баранов, В. Н.** Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы / В. Н. Баранов. – Москва: Додэка-XXI, 2004. – 288 с.
- 5 **Шпак, Ю. А.** Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров / Ю. А. Шпак. – Киев: МК-Пресс, 2006. – 400 с.
- 6 **Ревич, Ю. В.** Практическое программирование микроконтроллеров Atmel AVR на языке ассемблера / Ю. В. Ревич. – 2-е изд. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. – 352 с.
- 7 **Голубцов, М. С.** Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному / М. С. Голубцов. – Москва: СОЛОН-Пресс, 2003. – 288 с.
- 8 **Березиенко, В. П.** Технология сварки давлением / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
- 9 **Гладков, Э. А.** Управление процессами и оборудованием при сварке / Э. А. Гладков. – Москва: Академия, 2006. – 432 с.
- 10 **Тревис, Дж.** LabVIEW для всех: пер. с англ. / Дж. Тревис. – Москва: ДМК Пресс; Приборкомплект, 2005. – 544 с.
- 11 **Климов, А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
- 12 **Моравский, В. Э.** Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки / В. Э. Моравский, Д. С. Ворона. – Киев: Наукова думка, 1985. – 272 с.