

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ УСИЛИТЕЛЕМ НА ND-СТЕКЛЕ

А.В. Бахарев, Б.В. Круглов, А.А. Мацвейко,
М.В. Осипов, Г.В. Склизков, А.Н. Стародуб

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Описана система управления лазерным усилителем на Nd – стекле, построенная с использованием коммерческих микропроцессорных модулей. Система позволяет автоматически производить заряд емкостных накопителей и подавать импульс зажигания, который инициирует прохождение тока через лампы накачки. В качестве коммутирующего элемента в предложенной схеме используется силовой тиристор. Рассмотрены варианты защиты емкостных накопителей от перенапряжения. Система осуществляет контроль и индикацию уровня заряда на накопительных конденсаторах. Разработан алгоритм работы управляющего реле и представлен вид временных диаграмм. Микропроцессорные модули объединены в сеть посредством интерфейса RS-485. В качестве центрального управляющего устройства используется персональный компьютер.

1. ВВЕДЕНИЕ

В Отделении квантовой радиофизики ФИАН проводятся эксперименты по взаимодействию лазерного излучения с веществом с использованием импульсного лазера на Nd – стекле с ламповой накачкой “Канал – 2” [1]. Лазер работает по принципу последовательного усиления импульса с энергией излучения на выходе более 100 Дж, при длительности импульса $t_{\text{и}} = 2.5$ нс. Усилительные каскады выполнены на базе усилительных модулей типа ГОС – 1001, в которых используются активные элементы из Nd – стекла ГЛС – 1 длиной 680 мм. Накачка в усилителе осуществляется четырьмя лампами ИНП–16/580А.

В данной работе объектом управления является схема питания импульсных ламп лазерного усилителя. Усилительный модуль является составной ячейкой мощного лазера “Канал - 2”.

Схема питания лазерного усилителя служит для периодического накопления энергии, потребляемой от сети, и преобразования её в энергию мощных световых импульсов, предназначенных для оптической накачки активного тела.

В ранее используемой электрической схеме [2] коммутация разрядных контуров осуществлялась с помощью игнитронов, недостатком которых является присутствие ртути. В свою очередь запуск игнитронов производился дополнительными устройствами: блоком поджига игнитронов и высоковольтным генератором запуска. Заряд накопительных конденсаторов осуществлялся с использованием RC – цепочки. При такой схеме заряда неизбежны активные потери и необходим высоковольтный источник питания.

Преимуществами предложенной схемы являются: автоматическое управление, индикация, контроль времени заряда и напряжения, простота в эксплуатации (управление может осуществляться с пульта или с персонального компьютера), сбор и архивация измеренных данных. Модульный принцип построения схемы позволяет не только достаточно просто наращивать систему, но и оперативно производить ремонтные работы простой заменой неисправного элемента.

Кроме того, предлагаемая схема управления базируется не на уникальных элементах, а на элементах разработанных и производимых в достаточно массовых количествах для решения широкого круга научно – технических задач.

Система управления лазерным усилителем построена с использованием микропроцессорных модулей научно – производственной фирмы “Контрафт”.

Вместо игнитрона в данной схеме используется тиристор. Предложенная схема удвоения, используемая в качестве зарядного устройства, позволяет сократить величину активных потерь и уменьшает вдвое входное напряжение.

2. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Основными узлами электрической схемы лазерного усилителя являются: накопитель энергии, лампы накачки, устройства для управления режимом заряда накопителя и формирования разрядных импульсов. На рис. 1 представлена функциональная схема САУ. Она состоит из двух уровней: силовая часть, устройство управления.

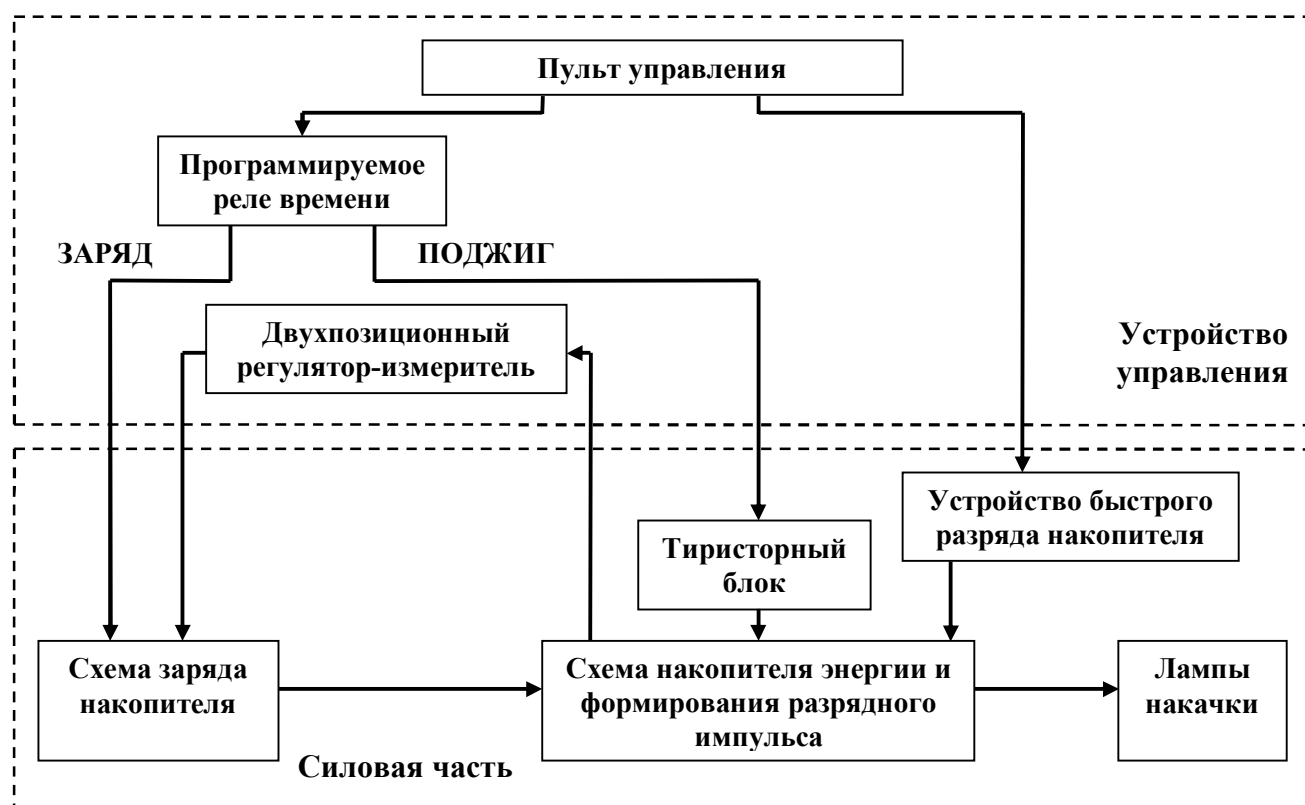


Рис. 1. Функциональная схема системы управления.

Схема заряда осуществляет передачу энергии из питающей сети 220 В в емкостной накопитель. Схема формирования разрядного импульса обеспечивает

получение, протекающих через лампы накачки, импульсов тока определенной амплитуды и формы. Устройство быстрого разряда накопителя осуществляет сброс напряжения с накопительных конденсаторов по команде с пульта. Тиристорный блок формирует импульсы управления для тириستоров, которые после отпирания осуществляют коммутацию разрядных цепей.

Автоматическое управление зарядом накопителей и поджигом ламп, контроль времени заряда осуществляется при помощи микропроцессорного программируемого реле времени ЭРКОН-224. В контур системы управления питанием входит схема обратной связи, построенная на базе двухпозиционного регулятора - измерителя МЕТАКОН-532. Позиционный регулятор осуществляет преобразование измеряемого напряжения накопителя в сигналы управления режимом заряда.

3. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

Принципиальная схема управления лазерным усилителем представлена на рис. 2.

3.1. СХЕМА ЗАРЯДА НАКОПИТЕЛЕЙ

Для заряда накопительных конденсаторов С2 применяется схема с емкостным ограничителем С1 и удвоением напряжения [3]. Чтобы зарядить накопители до напряжения 5000 В, на вторичной обмотке трансформатора Т1 должно быть переменное напряжение $U \approx 2500/\sqrt{2} \approx 1800$ В. Зависимость напряжения на накопительной емкости С2 от времени заряда имеет вид:

$$U \approx 2U_m \frac{C_2}{C_1 + C_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

где t – время заряда, $T=1/f_{\text{сети}}$.

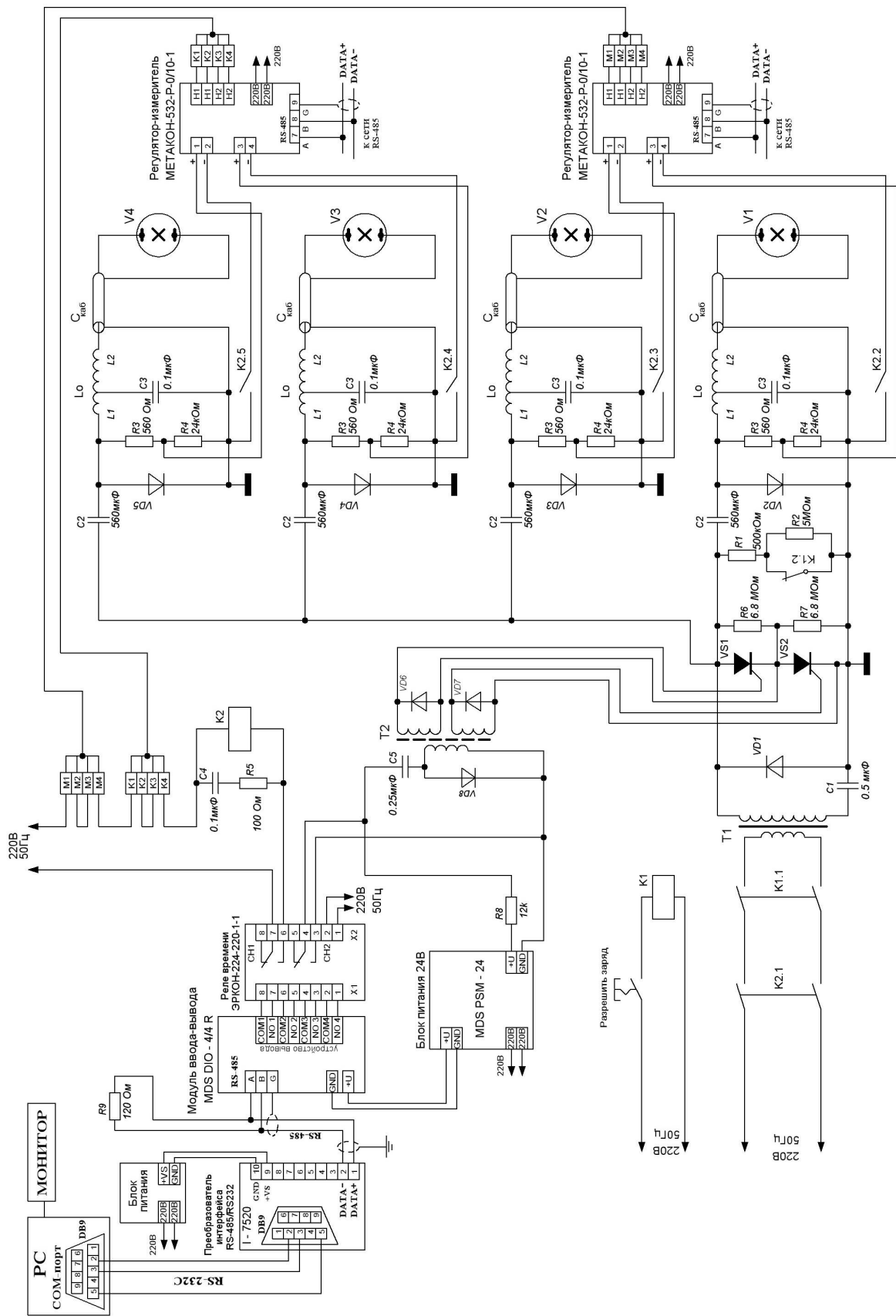


Рис. 2. Принципиальная схема управления лазерным усилителем.

На рис. 3 приведен график зависимости напряжения на накопителе от времени, а на рис. 4 построена диаграмма, поясняющая принцип работы схемы удвоения.

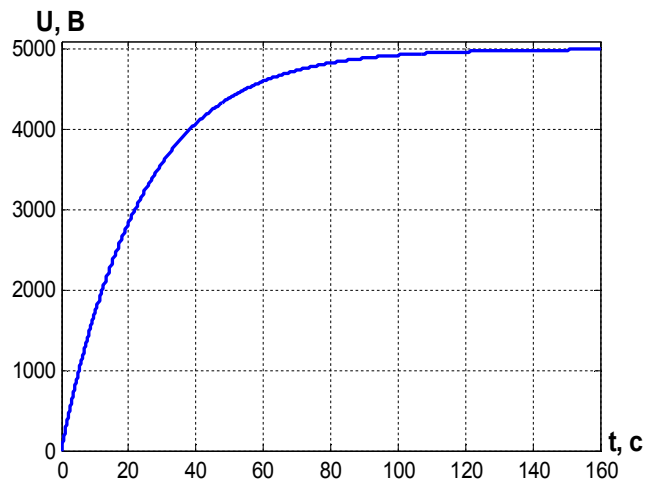


Рис. 3. График зависимости напряжения на накопителе от времени заряда.

Из графика видно, что накопительные конденсаторы $C2$ будут заряжены до заданного напряжения 5000 В примерно за 150 секунд.

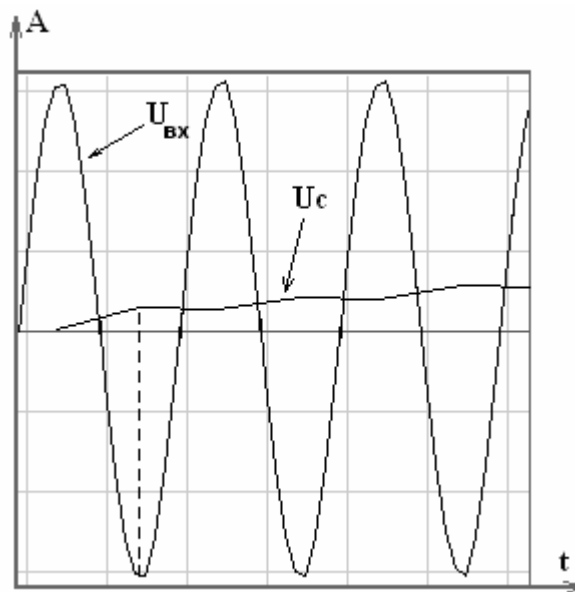


Рис. 4. Диаграмма напряжений в цепи зарядки. $U_{вх}$ – напряжение на вторичной обмотке трансформатора $T1$; U_c – напряжение на $C2$.

3.2. СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЯДНОГО ИМПУЛЬСА

Схема формирования разрядных импульсов содержит: накопитель C2, емкость поджига C3, катушку индуктивности L₀ (связанные контуры L₁ и L₂), импульсную лампу V1, тиристоры VS1 и VS2. Так как усилитель состоит из нескольких ламп, то схема формирования разделяется на отдельные секции, каждая из которых образует разрядный контур одной лампы.

В предложенной схеме поджига ламп ИМП-16/580А используется принцип возникновения колебаний в резонансном контуре при подключении к нему постоянной э.д.с., роль которой выполняет начальная разность потенциалов на накопителе C2.

Для осуществления вспышки ламп необходимо подать управляющий сигнал на тиристоры VS1 и VS2. После отпирания тиристоров емкость C2 окажется подключенной к колебательному контуру, образованному частью формирующей катушки L1 и емкостью C3. В контуре возникают затухающие колебания с начальной амплитудой равной $\sim 2U_{C2}$ и частотой

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{L1 * C3}}$$

Накопительные конденсаторы заряжаются до напряжений порядка 5 кВ, а для поджига ламп ИМП-16/580А требуется импульс порядка 18 кВ, следовательно, амплитуды колебаний возникающих в первом контуре L1 C3 недостаточно для зажигания лампы. Поэтому, чтобы увеличить амплитуду колебаний до уровня 18 кВ, используется формирующая индуктивность L₀, представляющая собой воздушный трансформатор.

Длина кабеля в разрядном контуре достаточно велика – 10 м. При таких длинах кабель имеет значительную погонную емкость (C_{каб} ~ 1500 пФ). Эта емкость и индуктивность L2 (часть витков катушки L₀) образуют второй колебательный контур. В этом контуре формируется импульс поджига ламп, который представляет собой колебательный процесс с начальной амплитудой 20 кВ. В это время через лампы накачки протекает разрядный ток:

$$I \approx \frac{E}{2L\sqrt{\alpha^2 \mp \omega_0^2}} \left\{ e^{p_1 t} \mp e^{p_2 t} \right\},$$

где $\delta = R/2L$, $\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $p_1 \approx \mp \alpha \mp \sqrt{\alpha^2 \mp \omega_0^2}$, $p_2 \approx \mp \alpha \mp \sqrt{\alpha^2 \mp \omega_0^2}$.

Форма импульса разрядного тока представлена на рис. 5. Процесс носит аперриодический характер, так как $\delta > \omega_0$.

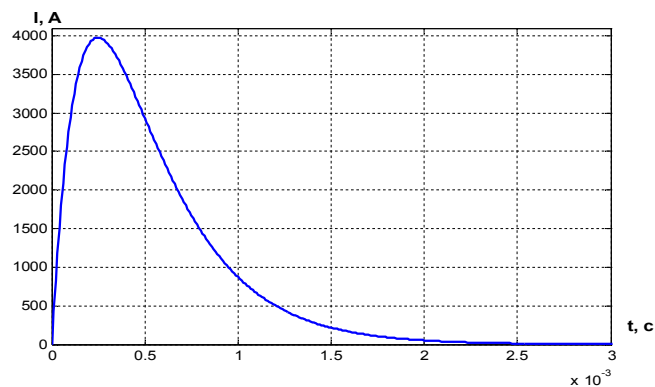


Рис. 5. Импульс тока в разрядном контуре.

3.3. ТИРИСТОРНЫЙ БЛОК

Коммутация разрядных цепей осуществляется при помощи двух тиристоров марки Т153-630-24-61. Каждый тиристор рассчитан на напряжение 2400 В. Так как накопительные конденсаторы заряжаются до напряжений порядка 5 кВ, то для коммутации разрядных цепей применяется схема с двумя последовательно включенными тиристорами (рис. 6). Сопротивления R6 и R7 ($R6=R7$) необходимы для того, чтобы напряжение на тиристорах при отпирании поделилось пополам.

Схема формирования управляющих импульсов для тиристоров работает

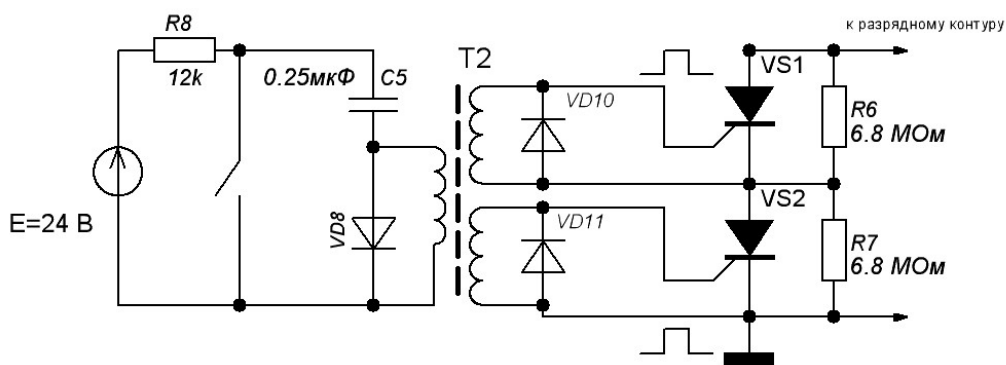


Рис. 6. Тиристорный блок.

следующим образом. В исходном состоянии конденсатор C5 заряжается от блока питания до напряжения 24 В. При замыкании ключа конденсатор начинает разряжаться через понижающий трансформатор T2 с тороидальным ферритовым

сердечником. В результате во вторичной обмотке возникают два управляющих импульса амплитудой $U=3.5$ В и длительностью $t_{\text{вкл}}=30$ мкс; происходит одновременное отпирание тиристоров VS1 и VS2.

4. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

Микропроцессорное программируемое реле времени ЭРКОН-224 имеет два канала, каждый из которых может функционировать в соответствии с одной из одиннадцати временных диаграмм, выбираемых пользователем [4]. Каналы реле могут работать в двух режимах: независимая работа и зависимая работа.

Основные функции реле:

- 1) формирование временных интервалов и замыкание/размыкание выходных реле;
- 2) индикация отсчета временных интервалов в режимах прямого или обратного счета;
- 3) задание параметров работы реле с помощью кнопок на лицевой панели с контролем по цифровому дисплею;

Для осуществления управления зарядом накопителей и поджигом ламп необходимо выбрать временные диаграммы, то есть программу работы реле, и расставить временные интервалы (уставки).

5. ДВУХПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР – ИЗМЕРИТЕЛЬ

В схеме обратной связи, построенной на базе регулятора – измерителя [4] МЕТАКОН-532, происходит сравнение напряжения с задаваемым эталонным напряжением. Задание параметров, требующих автоматической стабилизации, осуществляется с пульта управления или с персонального компьютера РС. Измерение напряжения на накопительной емкости осуществляется с использованием резистивного делителя R3, R4. Напряжение (до 10 В), снятое с резистора R4, подается на вход регулятора МЕТАКОН. Измеряемое значение входного сигнала преобразуется аналого-цифровым преобразователем в цифровой код, поступающий на микроконтроллер регулятора - измерителя. Микроконтроллер выполняет функции компаратора, и работая по заданной программе, управляет состоянием выходных реле регулятора. Работа компаратора программируется заданием его параметров Н и h (рис. 7).



Рис. 7. Зависимость состояния выхода компаратора от измеренного значения напряжения.

Регулятор – измеритель МЕТАКОН-532 имеет функцию передачи измеренных значений входных сигналов, а также значений параметров, характеризующих работу прибора, на внешние устройства управления и/или сбора данных по интерфейсу RS-485.

6. МОДУЛЬ ВВОДА – ВЫВОДА

Модуль ввода – вывода MDS DIO-4/4R используется для формирования дискретных управляющих сигналов (4 канала) по командам управляющего компьютера. Обмен данными с управляющим компьютером осуществляется по шине RS-485. Модуль ввода – вывода подключается к исполнительному устройству, роль которого играет реле времени ЭРКОН-224.

На рис. 8 приведена функциональная схема модуля MDS DIO-4/4R. Модуль содержит 4 канала ввода информации от дискретных датчиков и 4 дискретных канала вывода дискретных управляющих сигналов. Микроконтроллер модуля исполняет команды, посылаемые от управляющего компьютера, и реализует протокол обмена через интерфейс RS-485. Для предотвращения ситуаций “зависания” микроконтроллера используется сторожевой таймер. Все каналы входа и выхода имеют индивидуальную гальваническую развязку.

В качестве выходных исполнительных элементов модуля применены электромеханические реле. В данной системе управления используется только устройство вывода.

Взаимодействие управляющего компьютера с модулем ввода/вывода осуществляется по принципу “Запрос” - “Ответ”, модуль является ведомым. Команды управляющего компьютера адресуются набору регистров модуля, которые полностью определяют его функционирование.

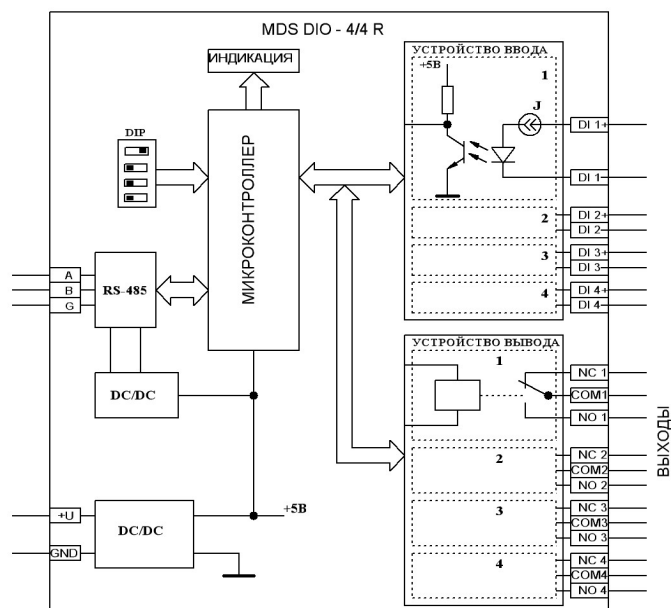


Рис. 8. Функциональная схема модуля ввода-вывода.

Пользователь (оператор), подавая соответствующие команды управления (Запись или Чтение регистров) с помощью программного обеспечения, установленного на управляющем компьютере, может считывать и устанавливать состояние каналов ввода и каналов вывода, проверять режим работы и конфигурацию модуля, а также может анализировать его состояние.

7. ИНФОРМАЦИОННАЯ СЕТЬ RS-485

Для осуществления обмена данными между приборами (модулем в/в MDS, регуляторами-измерителями МЕТАКОН) и персональным компьютером построена сеть с интерфейсом RS-485.

Сигналы интерфейса RS-485 передаются дифференциальными перепадами напряжения величиной (0,2...8) В, что обеспечивает высокую помехоустойчивость и общую длину линии связи до 1 км (и более с использованием повторителей). Кроме того, интерфейс RS-485 позволяет создать сеть путем параллельного подключения многих устройств (до 32 приемопередатчиков) к одной физической линии. Так как в обычном РС-совместимом персональном компьютере этот интерфейс отсутствует, необходимо использовать преобразователь интерфейса RS-485/RS-232. Подключение преобразователя I-7520 к порту RS-232 осуществляется модемным кабелем.

В качестве линии связи RS-485 используется экранированная витая пара. Для защиты от помех экран витой пары заземляется в любой точке (рис. 9).



Рис. 9. Экранированная витая пара.

Линия связи для исключения помех от отраженного сигнала должна быть согласована на концах. Для согласования используются резисторы сопротивлением 120 Ом – терминаторы. Преобразователь интерфейсов I-7520 имеет встроенный терминатор, поэтому между контактами витой пары А и В необходимо подключить только одно сопротивление R9. Скорость обмена данными в сети RS-485 составляет 19200 бит/с.

Настройка микропроцессорных модулей осуществляется по сети RS-485 с помощью утилиты – конфигуратора MDS Utility (рис. 10). В качестве управляющей оболочки используется программа RNet, которая поставляется вместе с модулями.

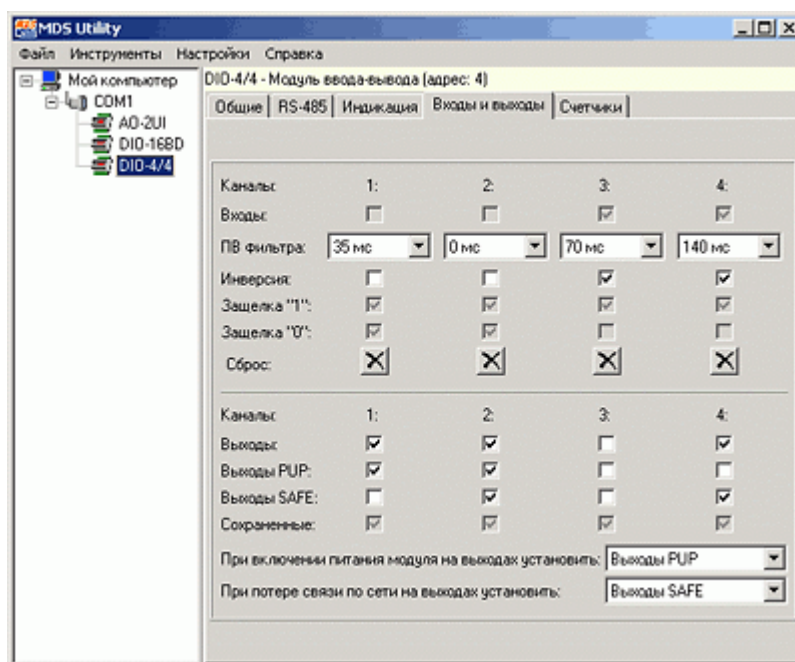


Рис. 10. Интерфейс программы-конфигуратора.

8. ПРИНЦИП РАБОТЫ ВСЕЙ СИСТЕМЫ

Чтобы подготовить систему к работе необходимо включить тумблер “Разрешить заряд”. Далее срабатывает реле К1 (размыкается контакт К1.2, замыкаются контакты К1.1). Тем самым отключилось устройство быстрого разряда накопителей, состоящее из реле К1 и сопротивлений R1, R2.

Для осуществления заряда накопительных конденсаторов С2 оператор с помощью программного обеспечения, установленного на управляющем компьютере, подает сигналы $U_{\text{разр } 1}$ (снятие реле времени ЭРКОН с блокировки) и $U_{\text{упр } 1}$ (сигнал управления канала 1). Сигнал $U_{\text{упр } 1}$ запускает временную диаграмму, заранее запрограммированную в реле времени ЭРКОН-224 (рис. 11). В работу вступает канал 1 реле времени и включает реле К2 на время T1. Контакты К2.1 подключают зарядную цепь к питающей сети 220 В. Начинает работать схема удвоения, которая заряжает накопительные конденсаторы до заданного напряжения. Одновременно контакты К2.2 - К2.5 реле К2 подключают регуляторы МЕТАКОН-532 для измерения напряжения на накопительных конденсаторах С2 во время заряда.

Регулятор-измеритель МЕТАКОН и реле времени ЭРКОН выполняют функции защиты от перенапряжения на накопительных конденсаторах. Регулятор является пороговым элементом, который отключает схему заряда от сети при достижении уставки. Реле ЭРКОН контролирует время заряда и по истечении заданного (запрограммированного) времени также производит отключение зарядного устройства от сети питания. Еще одним устройством защиты является зарядная цепь емкостного накопителя, выполненная по схеме удвоения. Если напряжение на вторичной обмотке трансформатора равно 1800 В, то максимальное значение напряжения на накопителе составит 5000 В.

По истечении времени заряда в работу вступает канал 2 реле времени. Реле ЭРКОН выдерживает некоторую паузу T1' и автоматически подает сигнал “поджиг”. Время T1' зависит от режима работы лазера и задается (программируется) оператором. При появлении сигнала “поджиг” предварительно заряженный до напряжения 24 В, конденсатор С5, начинает разряжаться через трансформатор Т2. Трансформатор с ферритовым сердечником Т2 формирует два управляющих импульса для тиристоров VS1 и VS2. Далее будем рассматривать переходные процессы, проходящие в одном из четырех разрядных контуров. После отпирания тиристоров конденсатор С2 оказывается подключенным к первому колебательному контуру схемы разряда. Во втором колеба-

тельном контуре амплитуда колебаний увеличивается до напряжений, необходимых для зажигания лампы V1. Через весь разрядный контур и через лампу V1 протекает ток I и осуществляется накачка активного тела.

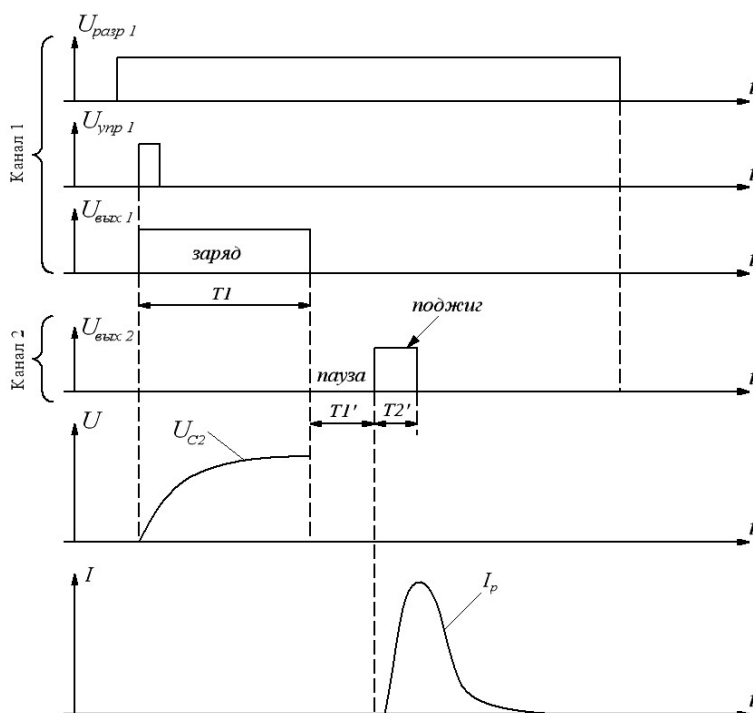


Рис. 11. Временная диаграмма программируемого реле времени ЭРКОН-224. $U_{\text{разр } 1}$ – сигнал разрешения канала 1 реле времени; $U_{\text{упр } 1}$ – сигнал управления канала 1; $U_{\text{вых } 1}$ и $U_{\text{вых } 2}$ – выходные сигналы реле времени соответственно канала 1 и канала 2. На временной диаграмме высокие и низкие уровни перечисленных выше сигналов показаны условно. Высокий уровень сигнала управления и сигнала разрешения отображает присутствие этих сигналов и замкнутое состояние соответствующих управляющих клемм реле времени. Высокий уровень сигналов выход отображает состояние включено соответствующего исполнительного устройства реле ЭРКОН-224. $T_1=150$ с – время заряда накопительных конденсаторов C2; $T_1'=(0.1\div 99.9)$ с – пауза; $T_2'=1$ с – поджиг; U_{C2} – напряжение на C2; I_p – импульс тока в разрядном контуре.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система управления лазерным усилителем, построенная с использованием микропроцессорных модулей, позволяет автоматически производить заряд емкостных накопителей и подавать импульс зажигания, который инициирует

прохождение тока через лампы накачки. В качестве коммутирующего элемента в предложенной схеме используется силовой тиристор. Рассмотрены варианты защиты емкостных накопителей от перенапряжения. Система осуществляет контроль и индикацию уровня заряда на накопительных конденсаторах. В данной работе детально рассмотрена схема формирования импульса разрядного тока, приведены расчетные формулы. Разработан алгоритм работы управляющего реле и представлен вид временных диаграмм. Микропроцессорные модули объединены в сеть посредством интерфейса RS-485. В качестве центрального управляющего устройства используется персональный компьютер.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 07-02-01407.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fedotov S.I., Feoktistov L.P., Osipov M.V., Starodub A.N. Lasers for ICF with a Controllable Function of Mutual Coherence of Radiation. Journal of Russian Laser Research. 2004. vol. 25, 1; Препринт ФИАН №35, М., 2002.
2. Кавун А.А., Круглов Б.В., Осетров В.П. Разрядный контур с внутренним синхронным поджигом. Препринт ФИАН №319. Москва, 1985.
3. Иванов Л.П., Вакуленко В.М. Зарядная цепь емкостного накопителя с удвоением напряжения. ПТЭ, 1970, №5, с. 110-114.
4. www.contravt.ru, руководства по эксплуатации для реле времени ЭРКОН, регулятора МЕТАКОН и модуля в/в MDS.
5. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. М., Энергия, 1978.
6. Белостоцкий Б.Р., Любавский Ю.В., Овчинников В.М. Основы лазерной техники. Твердотельные ОКГ. Под ред. акад. А.М. Прохорова. М., «Советское радио», 1972.
7. Маршак И.С., Дойников А.С., Жильцов В.П. Импульсные источники света. Под ред. И.С. Маршака. Москва, «Энергия», 1978.
8. Справочник по лазерам. Под ред. А.М. Прохорова. В 2-х томах. Т. I. – М.: Сов. радио, 1978.
9. Гершунский Б.С., Романовская А.В., Ващенко Н.М. Справочник по основам электронной техники. Под ред. Б.С. Гершунского. Киев, «Издательство Киевского университета», 1972.