



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2008-9
ОУ У-70, ОЛУ

А.Н. Воробьев, А.Ю. Евстифеев

**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОЩНОГО
МОДУЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА
ДЛЯ ПИТАНИЯ ВЧ-СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО
УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ**

Протвино 2008

Аннотация

А.Н. Воробьев, А.Ю. Евстифеев. Особенности построения мощного модульного импульсного модулятора для питания ВЧ-системы линейного ускорителя ионов: Препринт ИФВЭ 2008-9. – Протвино, 2008. – 19 с., 16 рис., 1 табл., библиогр.: 9.

Представлены результаты разработки электронных схем основных блоков и конструкции высоковольтных импульсных трансформаторов модулятора анодных напряжений модульного типа. На основании полученных данных построен, испытан и запущен в опытную эксплуатацию образец модулятора. В настоящее время такими модуляторами оснащена система ВЧ-питания линейного ускорителя протонов УРАЛ-30М.

Abstract

A.Yu. Evstifeev, A.N. Vorobiev. The Habits of Development Power Modular Grid for Supply RF-System Linear Accelerator of Ions: IHEP Preprint 2008-9. – Protvino, 2008. – p. 19, figs. 16, table 1, refs.: 9.

The main electronic circuit and construction of the high-voltage pulse transformer for anode modulator are presented. The modulator is designed, tested and put into operation as part of the RF-power supply system of the proton linear accelerator URAL-30M.

Содержание

1. Введение.....	2
2. Структурная схема модулятора.....	3
3. Тиристорный универсальный модуль	4
4. Блок сложения напряжений.....	9
5. Модуль источника силового питания.....	10
6. Модули электроники.....	13
6.1. Модуль формирования импульса подготовки.....	13
6.2. Модуль формирования импульса запуска.....	14
6.3. Модуль местного управления модулятором.....	15
6.4. Субмодуль запуска тиристоров.....	15
7. Измерительный делитель напряжения и эквивалент нагрузки.....	16
8. Состав аппаратуры и конструктивное исполнение модулятора.....	16
9. Заключение.....	16
Список литературы.....	19

1. Введение

Современные типы линейных ускорителей ионов, обеспечивающие ускорение интенсивных пучков (с током 100 мА и более), работают в импульсном режиме [1]. При этом для питания анодных цепей ВЧ-генераторов используют мощные импульсные модуляторы, как правило, с прямоугольной формой импульса на выходе. Необходимая форма импульса, его длительность t , частота следования импульсов F , скважность $q = (1/F-t)/t$, а также ток I_a , напряжение E_a и мощность $P_u = E_a I_a$ на выходе модулятора определяются соответствующими параметрами анодной цепи генератора. Значения указанных выше параметров (по порядку величин) в ускорителях ионов обычно заключены в следующих пределах:

$$5 \times 10^{-5} < t < 10^{-3} \text{ с}; \quad 0,2 < F < 100 \text{ Гц}; \quad 10 < q < 10^4;$$

$$I_a = 50 \div 300 \text{ А}; \quad E_a = 10 \div 100 \text{ кВ}; \quad P_u = 1 \div 20 \text{ МВт} [1].$$

В системах ВЧ-питания линейных ускорителей ионов наиболее широкое применение нашли различные варианты "классических" схем импульсных модуляторов, имеющие известные недостатки. Наряду с "классическими" схемами используется модульный принцип построения модуляторов. Принципы построения схем модулятора как "классических", так и модульных рассмотрены в [2 и 3] сравнительного анализа.

На основании рассмотренных принципов построения модуляторов был разработан модулятор анодного напряжения, предназначенный для питания ламповых ВЧ-каскадов ускорителя УРАЛ-30М. Модулятор имеет следующие технические характеристики, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики модулятора

Наименование параметра. Обозначение и единица измерения	Значение
Выходное напряжение: - максимальное U_{max} , кВ - минимальное U_{min} , кВ - регулируется дискретно с шагом, кВ	32 16 1
Максимальный ток нагрузки, А	160
Режим работы: а) импульсный, частота следования импульсов, Гц б) пакетно-импульсный, с параметрами: - частота следования импульсов в пакете, Гц - количество импульсов в пакете - частота следования пакетов, Гц	0,5; 1; 5 25 36 0,2
Длительность плоской части импульса, мкс	80
Длительность фронта и среза импульса ($t_f \approx t_c$), мкс, не более	10÷15
Стабильность напряжения на накопителе, %	0,5
Максимальная импульсная мощность, МВт	5
Напряжение питающей сети, В	380±1%
Потребляемая мощность от сети, кВт, не более	12

В основу разработки модулятора положен модульный принцип, который дает дополнительные преимущества [3], так как позволяет набором единичных однотипных модулей реализовать параметры, необходимые для конкретных условий работы аппаратуры. Модульный принцип позволяет обойтись без регулируемого источника питания, что в значительной степени упрощает и удешевляет аппаратуру.

В предлагаемой работе показаны схемные решения и приведены описания основных блоков разработанного модулятора анодных напряжений для ускорителя с ВЧК-фокусировкой УРАЛ-30М.

2. Структурная схема модулятора

Для обеспечения работы линейного ускорителя с ВЧК-фокусировкой УРАЛ-30М был разработан модулятор анодных напряжений с максимальным выходным напряжением 32 кВ. В работе [3] показана функциональная схема предлагаемого модулятора, где основным элементом схемы является тиристорный универсальный модуль (ТУМ).

Для получения у модулятора выходного напряжения 32 кВ необходимо соединить последовательно 32 ТУМ.

Конструктивно модулятор размещается в четырех типовых стойках «Вишня» С-6 (СМ1...СМ4, рис. 1), которые позволяют разместить 8 тиристорных модулей, блок электроники и источник питания.

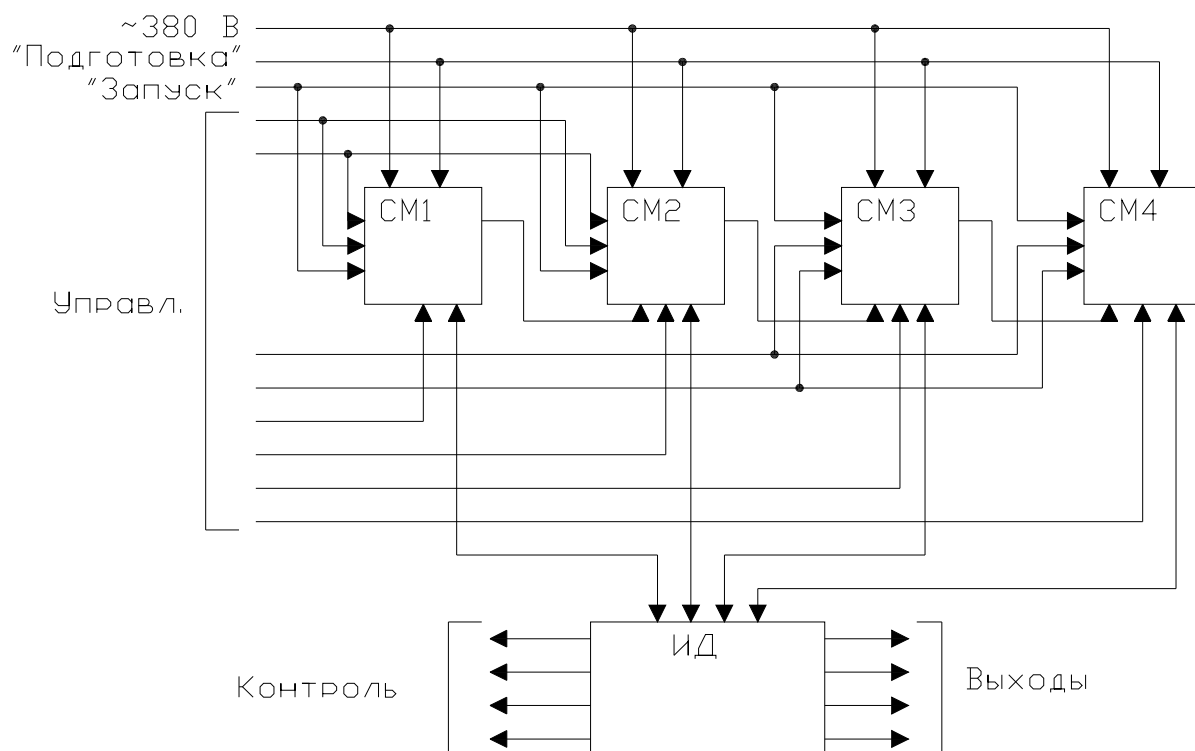


Рис. 1. Структурная схема модулятора.

Каждая стойка модулятора является функционально законченным узлом с регулируемым выходным напряжением. Выходное напряжение определяется количеством работающих модулей в стойке. Последовательное соединение 4 стоек позволяет получить необходимые напряжения для питания анодов ламп ВЧ-генераторов.

Модулятор может работать в режиме местного или дистанционного управления. При местном управлении величина выходного напряжения каждой стойки устанавливается переключателем, расположенным на соответствующей стойке, а при дистанционном – переключателем на модуле дистанционного управления.

Для получения необходимого выходного напряжения модулятора выходы стоек соединены последовательно. Имеется возможность получать различные выходные напряжения, используя дополнительные выходы с каждой стойки. Для контроля анодного напряжения генератора используется измерительный делитель (ИД, рис. 1).

В состав стойки (рис. 2) входят 8 тиристорных универсальных модулей (ТУМ), блок сложения напряжений (БСН), модуль формирования импульсов подготовки (МФИП), модуль формирования импульсов запуска (МФИЗ), модуль местного управления модулятором (ММУМ), модуль источника силового питания (МИСП) и 2 модуля источника оперативного питания (МИОП1 и МИОП2).

Из таймера для управления ТУМ поступают импульсы «Подготовка», «Запуск» и «Отсечка». Необходимая для работы ТУМ амплитуда и длительность данных импульсов формируется в модулях МФИП и МФИЗ.

Сигнал «Запуск» поступает непосредственно только на 4 модуля, которые формируют минимальное напряжение стойки. Регулировка выходного напряжения стойки модулятора осуществляется изменением количества работающих модулей в стойке. Включение в работу управляемых ТУМ осуществляется воздействием на прохождение импульсов «Запуск» через МФИЗ на ТУМ. Импульс «Запуск» может проходить на управляемые модули (с 5-го по 8-й), что позволяет получить выходное напряжение стойки модулятора от 4 до 8 кВ с дискретностью 1 кВ.

При дистанционном управлении выходным напряжением модулятора количество работающих модулей в стойке задается модулем дистанционного управления (МДУМ).

Питание стойки модулятора осуществляется переменным 3-фазным напряжением, которое подается на стойку модулятора по команде из УБС.

Модуль источника силового питания (МИСП) вырабатывает постоянное напряжение, которое поступает в ТУМ на заряд конденсаторов накопительной емкости.

Для питания электронных блоков стойки имеются два источника оперативного питания (МИОП1 и МИОП2).

3. Тиристорный универсальный модуль

Для реализации модульных принципов построения модулятора разработан тиристорный универсальный модуль (ТУМ), формирующий импульс с параметрами:

длительность плоской части – 80 мкс;

ток вторичной обмотки выходного трансформатора – 160 А;

выходное напряжение – 1000 В.

На момент разработки элементная база позволяла создать модуль с необходимыми характеристиками, где в качестве ключей использовались тиристоры. Модуль представляет собой источник импульсного напряжения в виде последовательно включенных накопительной емкости и формирующей линии (рис. 3). Схема формирующей линии приведена в работе [4], где и описаны все происходящие там процессы. Схема с формирующей линией позволяет получить на согласованной нагрузке импульс напряжения равным половине напряжения источника питания. Для того чтобы повысить амплитуду импульса, было предложено включить последова-

тельно с формирующей линией накопительную емкость C_n (рис. 3). При этом полярность напряжения на линии необходимо поменять на обратную. В результате чего накопительную емкость C_n и перезаряженную линию $\Phi Л$ можно представить в качестве двух источников напряжения, включенных последовательно.

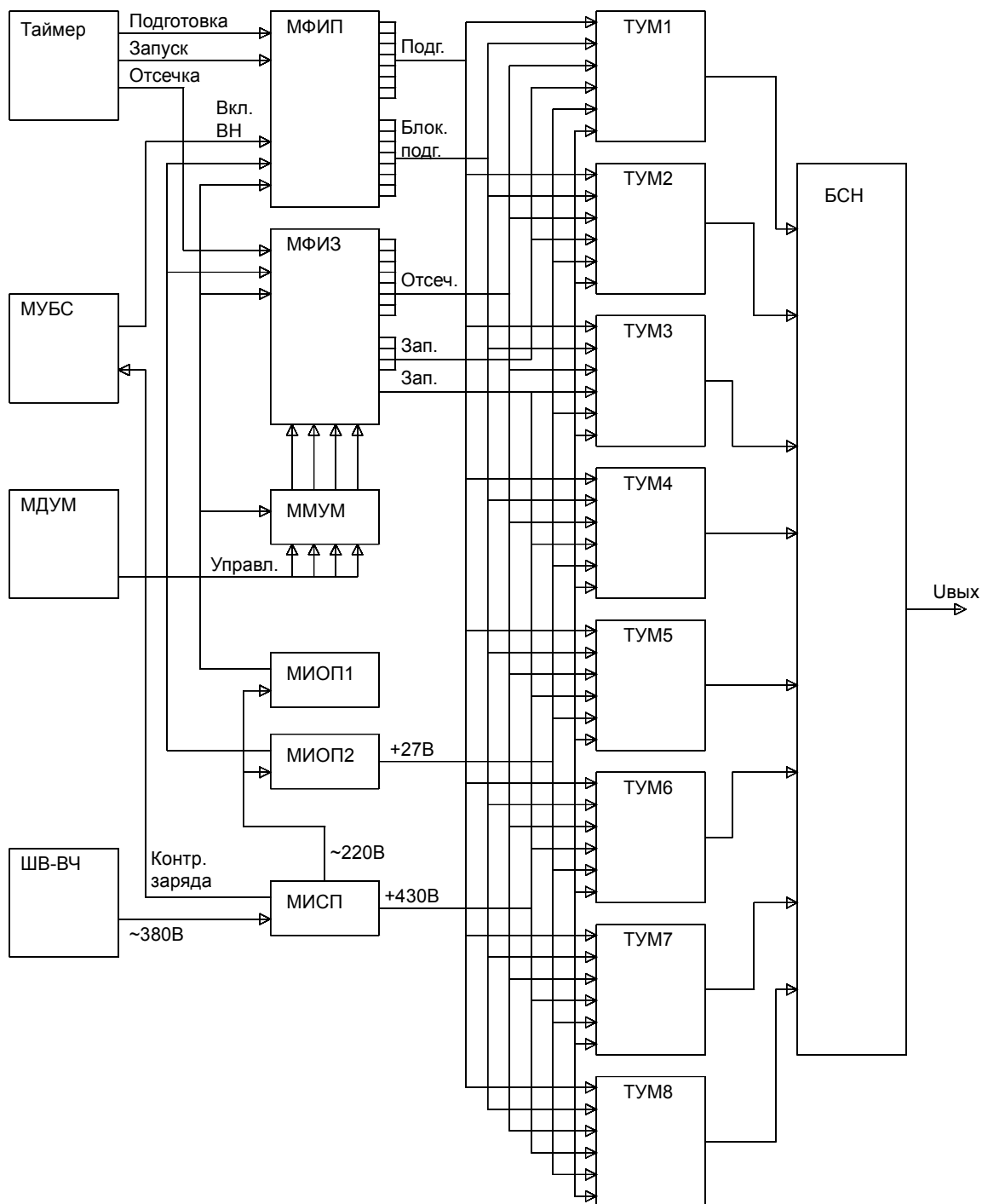


Рис. 2. Структурная схема стойки модулятора.

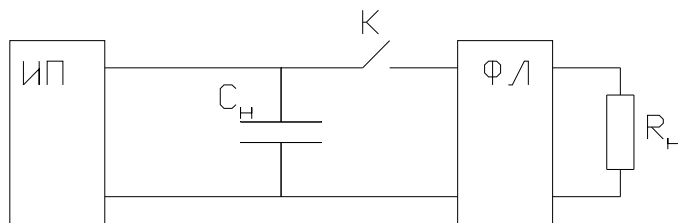


Рис. 3. Структурная схема тиристорного модуля.

Энергия, запасенная в накопительной емкости и формирующей линии, расходуется на формирование импульса, передаваемого в нагрузку. В результате чего во время формирования импульса напряжение на накопительной емкости C_n падает на величину ΔU . Спад напряжения на C_n влияет на амплитуду выходного импульса ТУМ, поэтому величину емкости C_n желательно выбирать как можно больше для уменьшения ΔU . Заряд емкости C_n происходит в паузе между импульсами от источника питания через сопротивление R , R – внутреннее сопротивление источника питания. Постоянная времени заряда накопительной емкости: $\tau = C_n R$. За время паузы между импульсами необходимо, чтобы емкость C_n заряжалась до напряжения источника питания. Но высокие требования к стабильности выходного импульса определяют довольно большую величину C_n , а внутреннее сопротивление источника питания R накладывает ограничение на время паузы между импульсами.

При относительно высокой частоте формирования импульсов на нагрузке накопительная емкость за время паузы между импульсами не успевает зарядиться до напряжения источника питания. Поэтому амплитуда выходного напряжения на нагрузке начинает снижаться и стабилизируется через несколько импульсов. При работе тиристорного универсального модуля в пакетно-импульсном режиме в начальный момент времени при формировании пакета первый импульс имеет максимальную амплитуду, а все последующие меньшую. На рис. 4 показаны графики зависимости изменения амплитуды напряжения импульса на нагрузке и напряжения на накопительной емкости во времени.

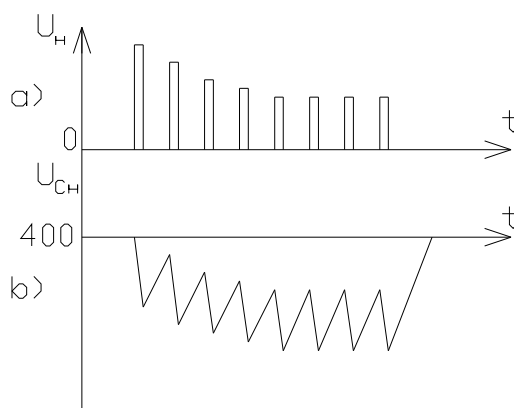


Рис. 4. Зависимость импульсного напряжения: а) на нагрузке; б) на накопительной емкости.

Для стабилизации напряжения на накопительной емкости, а, следовательно, и на нагрузке, необходимо использовать зарядное устройство (ЗУ), которое позволяет стабилизировать амплитуду выходных импульсов.

Зарядное устройство (ЗУ) представляет собой зарядно-дозировочную цепь, работающую в режиме дискретного стабилизатора. На рис. 5 представлена принципиальная схема зарядного устройства. В качестве ключа в ЗУ используется тиристор VS.

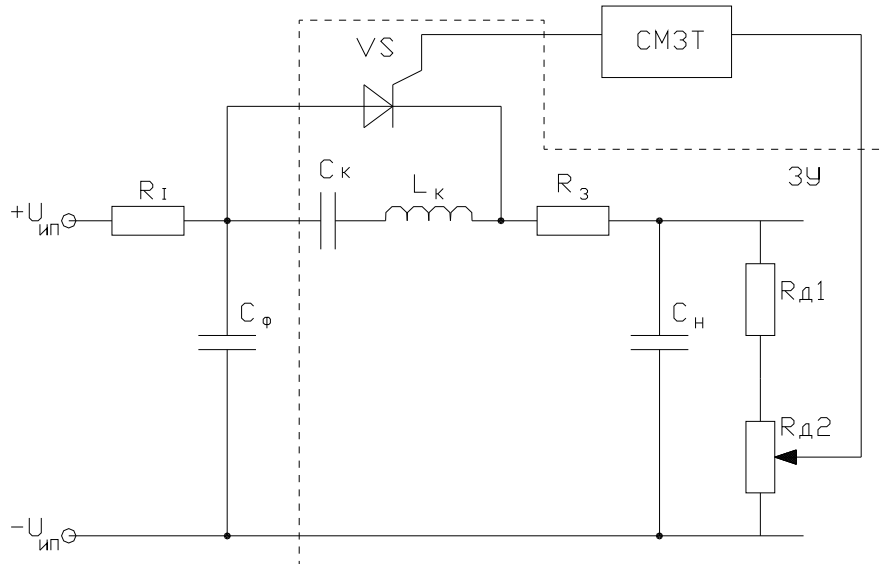


Рис. 5. Схема зарядного устройства.

Параллельно тиристорному ключу включен колебательный контур, настроенный на частоту большую, чем частота следования управляющих импульсов на тиристор. Колебательный контур необходим для запирающего действия, чтобы обеспечить заряд накопительной емкости порциями. Величина порции определяется соотношением емкостей $C_н$ и $C_к$, а постоянная времени заряда порции $\tau = CR_з$ (где C – емкость последовательно соединенных конденсаторов $C_н$ и $C_к$ и приблизительно равна $C_к$).

Частота управляющих импульсов VS определяется количеством порций, необходимых для компенсации спада напряжения на $C_н$ в течение импульса (ΔU).

Во время паузы между импульсами происходит заряд емкости $C_н$. Энергия, накопленная в $C_φ$ – емкости источника питания, переходит в накопительную емкость $C_н$. При этом происходит разряд $C_φ$ за один импульс на величину $\Delta U_φ$, которая определяется:

$$\Delta U_φ = \Delta U \cdot \sqrt{\frac{C_н}{C_φ}}$$

Заряд $C_φ$ происходит от источника питания через R_I с постоянной времени $R_I \cdot C_φ$. При работе в пакетно-импульсном режиме емкость $C_φ$ к следующему импульсу не успевает зарядиться до напряжения источника питания, и напряжение на емкости $C_φ$ будет уменьшаться от импульса к импульсу, пока не установится на величине $U_{уст}$ меньше напряжения источника питания (рис. 6).

Для того чтобы напряжение на емкости $C_н$ было стабильно и не зависело от уменьшения напряжения на емкости $C_φ$, необходимо, чтобы напряжение $U_{ипр}$ на емкости $C_φ$ источника питания в рабочем режиме было больше напряжения на накопительной емкости $C_н$, то есть выполнялось условие: $U_{ипр} > U_{сн}$.

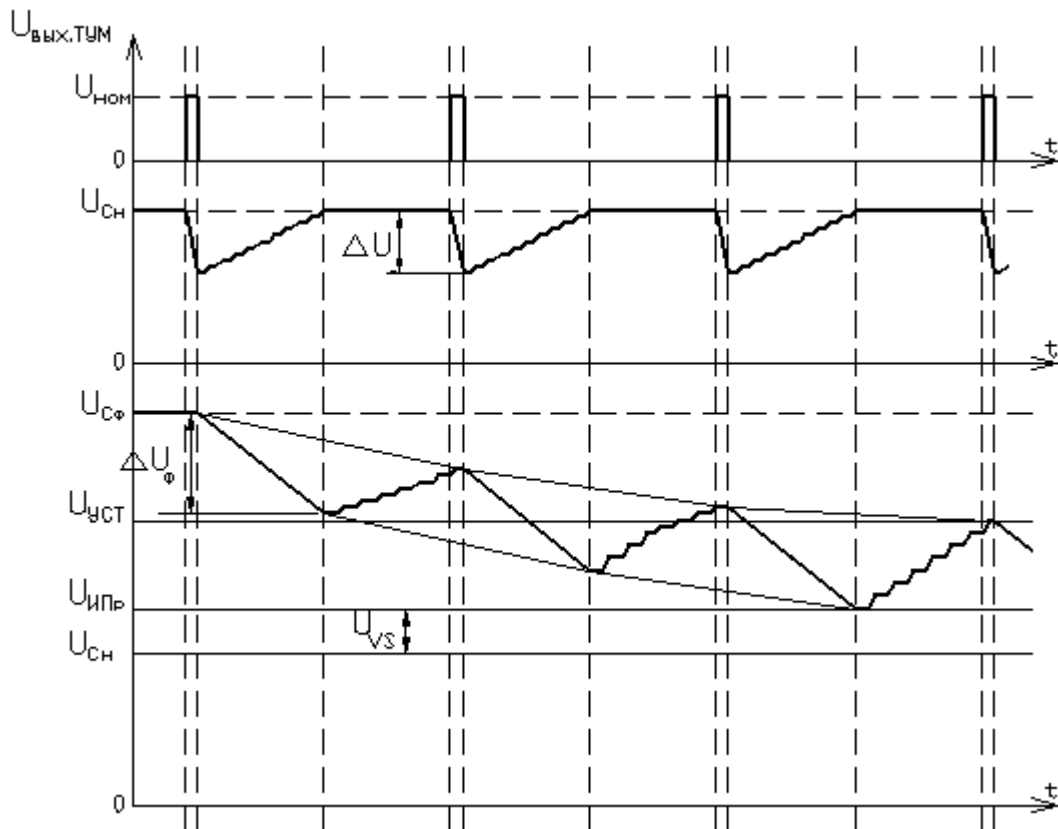


Рис. 6. Эпюры напряжений зарядного устройства.

Параллельно накопительной емкости включен измерительный делитель $R_{д1}$ $R_{д2}$, сигнал с которого поступает в submodule запуска тиристоров (СМЗТ) и сравнивается с опорным. Если напряжение на измерительном делителе меньше опорного, то из СМЗТ поступает сигнал на управляющий вывод тиристора.

На рис. 7 представлена более подробная схема ТУМ.

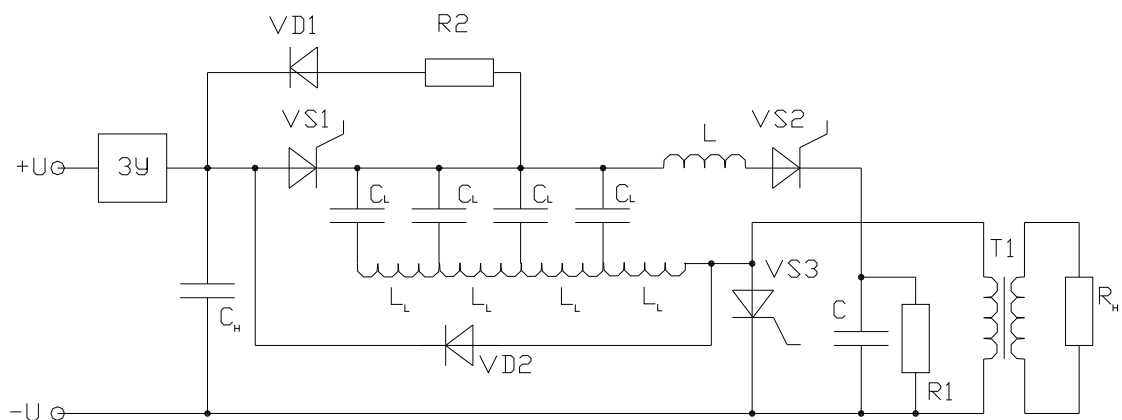


Рис. 7. Схема тиристорного универсального модуля.

Схема представляет собой источник импульсного напряжения с перезарядом формирующей линии. Такая схема позволяет получить на согласованной нагрузке напряжение, равное напряжению источника питания, и при использовании подключения нагрузки к модулю через импульсный трансформатор позволяет осуществить размагничивание без применения дополнительного источника.

Субмодуль запуска тиристоров СМЗТ вырабатывает три импульса управления. Первым импульсом запускается тиристор перезарядной цепи **VS2**. Через дроссель **L** и импульсный трансформатор **T1** протекает полуволна тока, которая меняет знак напряжения на линии. При этом перемагничивается магнитопровод, а к первичной обмотке импульсного трансформатора **T1** прикладывается напряжение, обратное рабочему. К концу перезаряда линии напряжение на тиристоре **VS1** поднимается почти до $2U_n$ (U_n – напряжение на накопителе), складываясь из напряжений на накопительной емкости C_n и на перезаряженной линии. Вторым импульсом, задержанным относительно первого на время, необходимое для завершения процесса перезаряда, запускается тиристор **VS1**. Последовательно включенные накопители C_n и C_L разряжаются на нагрузку через импульсный трансформатор **T1**. В процессе разряда на нагрузке формируется прямоугольный импульс. При этом происходит частичный разряд емкости C_n на величину не более 2% и изменение знака напряжения на линии. Вершина импульса может иметь неравномерность, связанную с изменением нагрузки в течение длительности импульса и неоднородности формирующей линии. Для уменьшения указанной неравномерности вершины импульса в модуле имеется ограничитель амплитуды импульса, включающий в себя ограничительный диод **VD2** и накопительную емкость C_n как источник опорного напряжения. Для обеспечения работы ограничителя соотношение между минимальным сопротивлением нагрузки и волновым сопротивлением линии выбрано так, чтобы амплитуда импульса на первичной обмотке **T1** превышала напряжение на накопительной емкости на 10-20%.

При коротком замыкании нагрузки положительное напряжение на формирующей линии может превысить напряжение источника питания. Для ограничения указанного перенапряжения на линии параллельно тиристору **VS1** включены возвратный диод **VD1** с сопротивлением **R2**. Для регулировки длительности рабочего импульса используется тиристор **VS3**, включенный параллельно первичной обмотке импульсного трансформатора. При его включении осуществляется срез импульса на нагрузке с высокой крутизной спада. Регулируя задержку запуска тиристора **VS3**, можно изменять длительность выходного импульса модуля в широких пределах.

4. Блок сложения напряжений

Нагрузкой каждого модуля является импульсный трансформатор. Для получения суммарного выходного напряжения работающих модулей необходимо все вторичные обмотки трансформаторов соединить последовательно. Конструктивно импульсные трансформаторы расположены в стойке позади тиристорных модулей и все объединены в блок сложения напряжений (БСН) (рис. 8). Для обеспечения перемагничивания импульсных трансформаторов необходимы диоды **VD1**÷**VD8**.

Для того чтобы ток нагрузки не протекал по вторичной обмотке импульсного трансформатора выключенного модуля, необходимы диоды **VD9**÷**VD16**.

Варистор, включенный параллельно вторичной обмотке, защищает модулятор от перенапряжений при работе на холостой ход.

Электрическая прочность изоляции между первичной и вторичной обмотками рассчитаны на максимальное рабочее напряжение 32 кВ. Расчет импульсного трансформатора на заданную мощность и его паразитные параметры производился с использованием программного обеспечения DELPHI 5.0 [6], с использованием литературы [7, 8]. Для обеспечения данной

электрической прочности использовалась вакуумная заливка эпоксидной смолой с наполнителем для придания эластичности.

Для уменьшения паразитной емкости первичная и вторичная обмотки импульсного трансформатора разделены заземленным экраном. Это позволило увеличить крутизну фронта передаваемого импульса.

При использовании экрана, конструктивно представляющего собой медную обойму, возникла неоднородность диэлектрика в виде воздушного зазора между экраном и эпоксидным компаундом. В этом воздушном зазоре возникало электрическое перенапряжение. Для устранения этого недостатка производилось напыление медного порошка на поверхность эпоксидного компаунда, что устраняло неоднородность диэлектрика и увеличило электрическую прочность изоляции импульсного трансформатора.

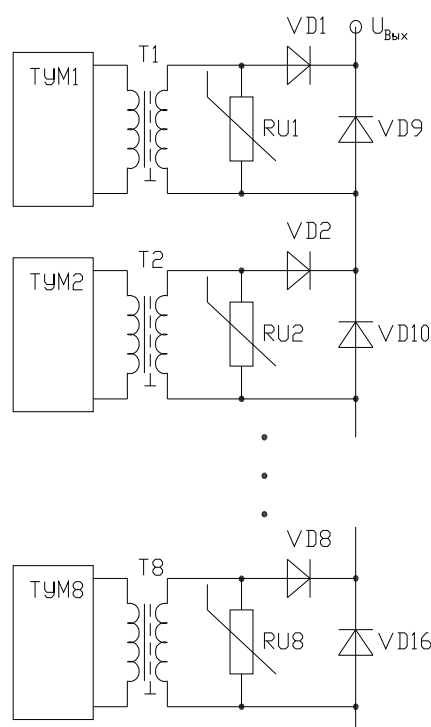


Рис. 8. Схема блока сложения напряжений.

5. Модуль источника силового питания

Модуль источника силового питания (МИСП) необходим для питания силовой части тиристорных универсальных модулей (ТУМ) одной стойки модулятора постоянным напряжением. За основу взята известная схема мостового выпрямителя, приведенного в работе [5]. МИСП состоит из силовой части и схемы ограничения тока заряда (рис. 9).

Схема ограничения тока предназначена для защиты МИСП от перегрузок по току в момент включения стойки модулятора. Так как в начальный момент все емкости C_n и C_f разряжены (рис. 5, 9) и зарядный ток определяется внутренним сопротивлением трансформатора, то возникает перегрузка по току. Чтобы этого не происходило, последовательно с емкостями включается сопротивление, которое ограничивает зарядный ток. Как только емкости C_n и C_f зарядятся на 80%, эта схема отключает зарядное сопротивление и заряд осуществляется непосредственно от силовой части МИСП.

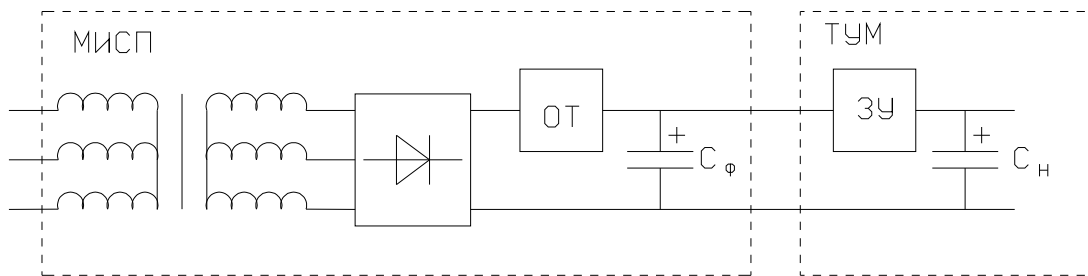


Рис. 9. Структурная схема МИСП: ОТ – схема ограничения тока.

При выборе схемы источника питания были рассмотрены однофазный и трехфазный выпрямители. Временные диаграммы работы МИСП как однофазной, так и трехфазной сети показаны на рис. 10 и 11.

За время формирования рабочего импульса напряжение на накопительной емкости C_n снижается на величину $\Delta U_{имп}$ (рис.10b), определяемую мощностью рабочего импульса. В паузе между импульсами происходит дозаряд накопительной емкости C_n в основном за счет энергии, накопленной в емкости фильтра C_ϕ . Как только накопительная емкость зарядится до напряжения U_{Cn} , начинается заряд емкости фильтра C_ϕ . Однако при работе модулятора с частотами превышающими 10 Гц время дозаряда C_ϕ составляет несколько мс, и за такое короткое время фильтрующая емкость не успевает зарядиться до номинального напряжения $U_{C\phi}$. Через некоторое время напряжение на фильтрующей емкости C_ϕ достигает установившегося значения $U_{уст}$ (рис.10с), которое практически приравнивается к напряжению U_{Cn} на накопительной емкости C_n . В результате чего напряжение на зарядном тиристоре становится близко к 0, и тиристор VS (рис.5) не закрывается, а, следовательно, накопительная емкость C_n в паузе между пачками заряжается не до напряжения U_{Cn} , а до напряжения $U_{C\phi}$, и, соответственно, амплитуда рабочего импульса возрастет. Чтобы избежать этого, необходимо уменьшать $U_{C\phi}$ на величину, необходимую для надежного запирания тиристора ЗУ. Это приводит к уменьшению амплитуд импульсов в пачке. Либо увеличивать $U_{уст}$, которое определяется скоростью заряда C_ϕ .

Заряд фильтрующей емкости C_ϕ при работе МИСП в однофазной сети идет порциями (рис. 10b). При этом напряжение растет не синусоидально, а экспоненциально с постоянной времени, определяемой внутренним сопротивлением трансформатора. Для того чтобы уменьшить постоянную времени заряда фильтрующей емкости C_ϕ , необходимо увеличивать мощность трансформатора, но с увеличением мощности несоизмеримо растут масса и размеры МИСП. Для сохранения массогабаритных параметров была применена трехфазная сеть.

Здесь также есть подсадка напряжения на C_ϕ (рис. 10d), но, так как в сети сдвиг напряжения между фазами составляет треть периода относительно друг друга, это обеспечивает, при выпрямленном напряжении $U_{выпр}$, более частую подзарядку фильтрующей емкости C_ϕ . Из графика напряжений видно (рис. 11с), что заряд фильтрующей емкости идет также, как и в однофазной сети, порциями, однако количество порций значительно больше, нежели в однофазной сети, и, соответственно, за то же время емкость C_ϕ зарядится на большее напряжение. Разница напряжений между установившимся $U_{уст}$ и напряжением на накопительной емкости U_{Cn} достаточна для надежного запирания зарядного тиристора VS (рис.5), что обеспечивает стабильную амплитуду рабочего импульса в течение всей пачки импульсов. Данное преимущество и обеспечило выбор питающей сети.

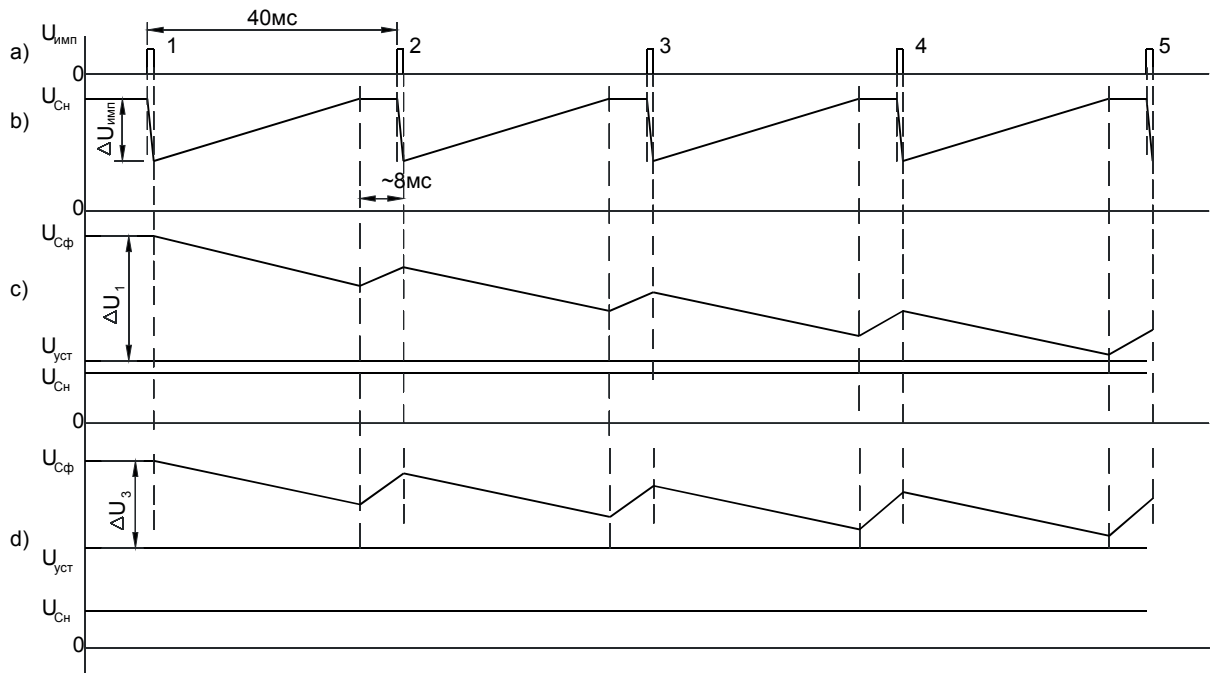


Рис. 10. Эпюры напряжений на емкостях C_n и C_f во время формирования рабочего импульса.

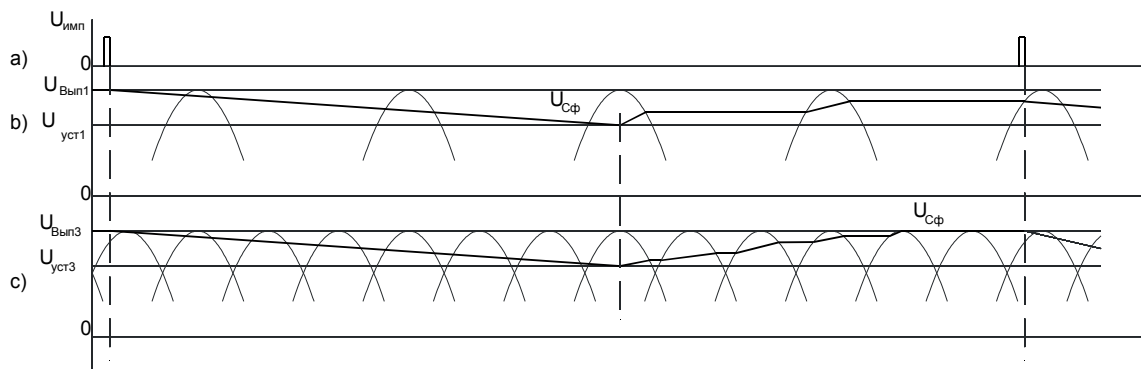


Рис. 11. Эпюры напряжений на емкости C_f : б) заряд емкости C_f при работе в однофазной сети; в) заряд емкости C_f при работе в трехфазной сети.

Так как величина падения ΔU_3 (рис.10d) сильно зависит от величины фильтрующей емкости C_f , то при сильном увеличении емкости C_f снижение напряжения $U_{Cф}$ за время заряда C_n уменьшается, но из-за большой постоянной времени заряда емкости C_f величина ΔU_3 также увеличивается. При слишком малом значении емкости C_f постоянная времени уменьшается, но начальное снижение напряжения $U_{Cф} - \Delta U_3$ может стать меньше величины $U_{Cн}$, что приведет к нестабильной работе зарядного устройства. Расчет оптимальной емкости C_f производился с использованием программного обеспечения DELPHI 5.0 [6].

Три силовых трансформатора, включенные в звезду, позволили более компактно расположить элементы в модуле и улучшили охлаждение греющихся частей модулятора, нежели использование одного силового трансформатора, подключаемого к одной фазе и имеющего значительно большие габариты и массу при той же номинальной мощности

6. Модули электроники

Модули электроники предназначены для управления работой модулятора. Для формирования управляющих импульсов используются модули формирования импульсов подготовки (МФИП) и запуска (МФИЗ). Формирователи импульсов построены по известным схемам, приведенным в [9]. Для регулирования выходного напряжения модулятора предназначен модуль местного управления модулятором. Также в каждом тиристорном модуле стоит по одному submodule запуска тиристоров (СМЗТ), предназначенному для управления зарядным устройством и усиления сигналов запуска тиристоров.

6.1. Модуль формирования импульса подготовки

На рис. 12 показана структурная схема МФИП.

В модуле формирования импульса подготовки осуществлена оптоэлектронная развязка между сигналами, приходящими с таймера, и модулятором, а также усиление сигналов до амплитуды, необходимой для работы ТУМ. В модуле имеется два усилителя, с которых сигнал поступает параллельно на четыре ТУМ.

Для предотвращения одновременного срабатывания тиристоров от наводок применена схема, которая блокирует канал “запуска” при перезаряде формирующей линии и наоборот.

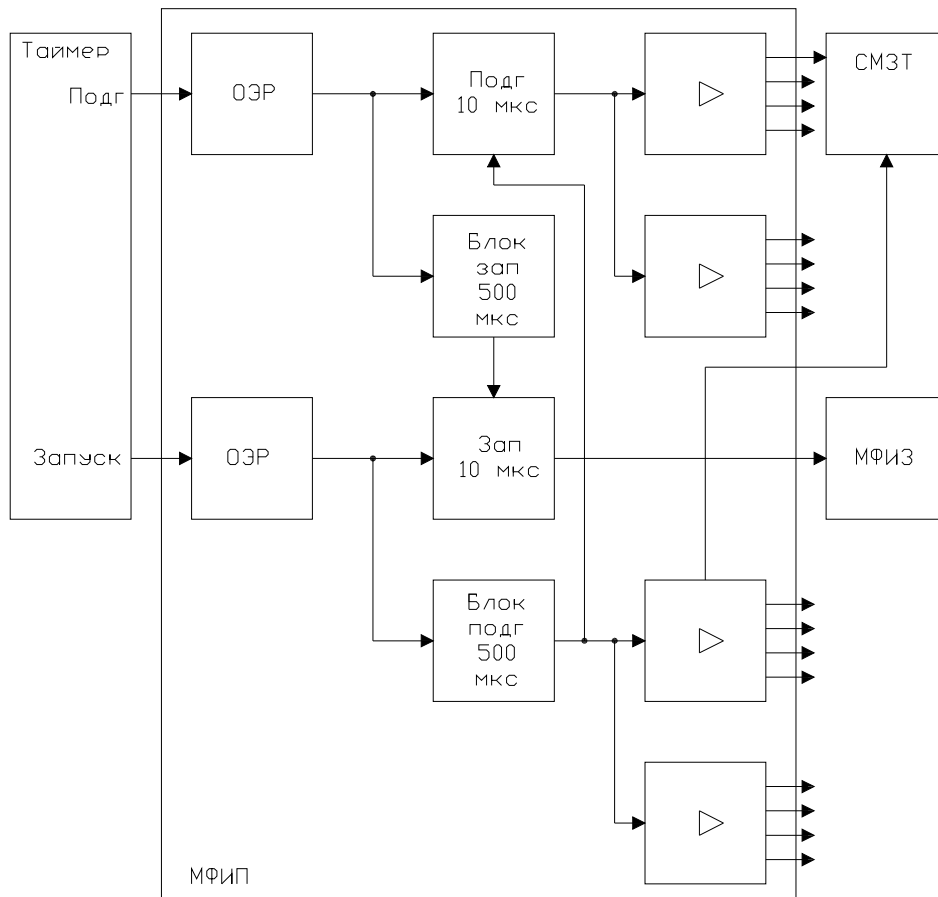


Рис. 12. Структурная схема МФИП.

6.2. Модуль формирования импульса запуска

Структурная схема модуля формирования импульса запуска приведена на рис. 13. МФИЗ содержит канал запуска и канал отсечки. Канал запуска состоит из усилителя сигнала «Запуск» управляемых ТУМ, четырех ключей и четырех усилителей, управляемых ТУМ. Сигнал «Запуск» из МФИП поступает на усилитель и четыре ключа. С выхода усилителя сигнал поступает на четыре управляемых ТУМ.

На ключи с ММУМ приходят сигналы управления, которые определяют количество работающих модулей в стойке. Эти ключи пропускают импульс запуска на усилители и далее на управляемые ТУМ.

Канал отсечки включает в себя схему оптоэлектронной развязки (ОЭР) и два усилителя. Сигнал «Отсечка» с таймера поступает на схему ОЭР, затем – на два усилителя, с каждого из которых – на четыре ТУМ.

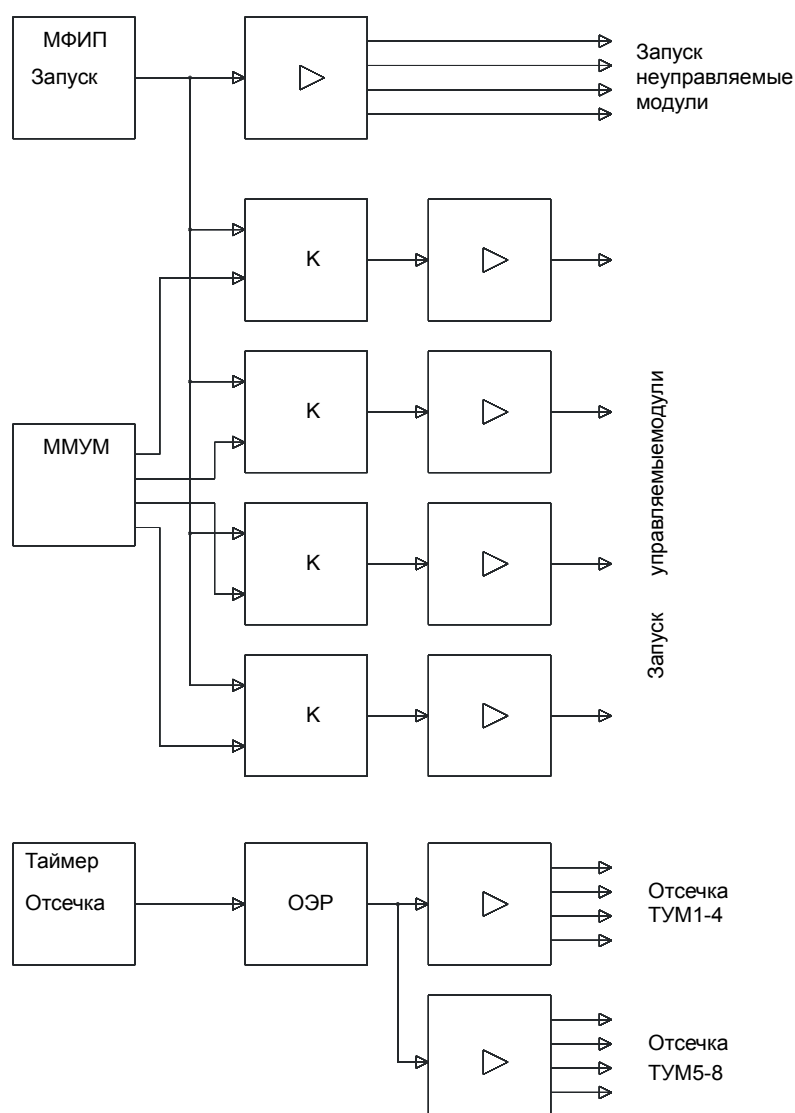


Рис. 13. Структурная схема МФИЗ.

6.3. Модуль местного управления модулятором

Для управления выходным напряжением стойки модулятора предназначен модуль местного управления модулятором (ММУМ).

Модуль может работать в двух режимах: местном и дистанционном. При местном управлении величина выходного напряжения стойки модулятора определяется позиционным переключателем на ММУМ. При дистанционном управлении выходное напряжение стойки задается аналогичным переключателем на модуле дистанционного управления МДУМ.

Структурная схема модуля приведена на рис. 14.

Модуль состоит из позиционного переключателя ПП, дешифратора ДШ, схемы оптоэлектронной развязки ОЭР и источника питания.

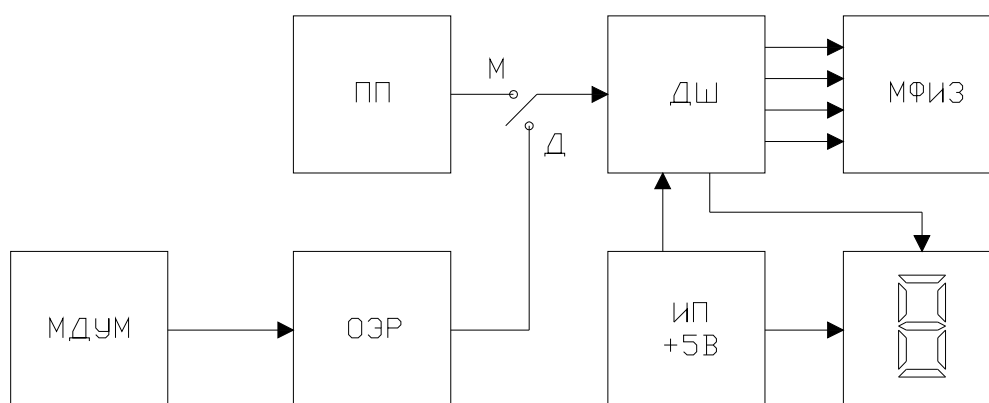


Рис. 14. Структурная схема ММУМ.

Позиционный код, вырабатываемый переключателем, поступает на дешифратор и преобразуется в цифровой, который подается в МФИЗ на 4 ключа. При дистанционном управлении выходным напряжением позиционный переключатель отключается от дешифратора и подключается схема оптоэлектронной развязки, на которую поступает аналогичный позиционный код с переключателя на модуле дистанционного управления модулятором (МДУМ). Схема ОЭР необходима для гальванической развязки стойки модулятора с пультовой стойкой, на которой расположен МДУМ.

6.4. Субмодуль запуска тиристоров

Блок управления ЗУ состоит из компаратора, мультивибратора и усилителя. Мультивибратор вырабатывает импульсы для управления тиристором ЗУ.

Усилители импульсов «Подготовка», «Запуск» и «Отсечка» выполнены по схеме эмиттерного повторителя. Сигнал «Блокировка подготовки» исключает прохождение сигнала «Подготовка» на время формирования рабочего импульса. Данная защита исключает одновременную работу тиристоров запуска и подготовки и исключает возможность короткого замыкания в ТУМ.

7. Измерительный делитель напряжения и эквивалент нагрузки

Для контроля выходного напряжения модулятора предназначен измерительный делитель, представляющий собой отдельную конструктивную единицу, входящую в состав аппаратуры модулятора.

Импульсный делитель содержит четыре измерительные цепи, представляющие собой резистивные делители напряжения. Каждая измерительная цепь подключается параллельно нагрузке модулятора. Измеряемое напряжение снимается с нижнего плеча делителя. Коэффициенты деления каждой цепи – 5000. Резисторы в нижних плечах делителя низкоомные, высокоточные, термостабильные.

Для предотвращения аварийного попадания высокого напряжения в измерительные цепи включены разрядники.

Для улучшения термостабильности и электропрочности все элементы делителя помещены в масло.

Эквивалент нагрузки предназначен для подключения к выходам модулятора вместо ВЧ-генераторов при проведении наладочных работ на модуляторе. При работе на эквивалент нагрузки с номинальной мощностью 5 МВт при длительности импульса 80 мкс частота следования импульса не должна превышать 5 Гц.

8. Состав аппаратуры и конструктивное исполнение модулятора

Модулятор состоит из четырех одинаковых стоек С-6 конструктива «Вишня» и импульсного делителя напряжения. Для настройки и проверки работоспособности модулятора в состав аппаратуры входит эквивалент нагрузки.

Тиристорные универсальные модули размещаются в комплектном вставном блоке БК-1В. В каждой стойке размещено 8 ТУМ. Под тиристорными модулями установлен блочный каркас КБ-1, в котором размещены источники оперативного питания МИОП1 (стандартный источник типа 591-90) и МИОП2 (591-94), ММУМ (частичный вставной блок БЧ-13), МФИП и МФИЗ (блоки БЧ-19). В нижней части стойки располагается МИСП, который размещен в комплектном вставном блоке БК-11В. Внешний вид готового работающего модулятора представлен на рис. 15.

Блок сложения напряжений располагается в стойке позади ТУМ (рис. 16). Высоковольтные разъемы расположены в верхней части стойки, а разъемы силового питания и управления – внизу.

Измерительный делитель напряжения конструктивно представляет собой маслonaполненный короб, в верхней части которого на изолированной от корпуса панели размещены 4 входных высоковольтных и 4 контрольных разъема.

Эквивалент нагрузки конструктивно выполнен так же, как и измерительный делитель.

9. Заключение

В работе представлены результаты разработки электронных схем основных блоков и конструкции высоковольтных импульсных трансформаторов модулятора анодных напряжений модульного типа. На основании полученных данных построен, испытан и запущен в опытную эксплуатацию образец модулятора. В настоящее время такими модуляторами оснащена система ВЧ-питания линейного ускорителя протонов УРАЛ-30М. Испытания в режимах короткого замыкания в нагрузке и при холостом ходе опытной эксплуатации в составе ускорителя УРАЛ-30М показали надежную работу модулятора. Аварий или произвольных отключений за время работы модулятора порядка 1500 часов не было.



Рис. 15. Внешний вид рабочего модулятора.



Рис. 16. Размещение силовых трансформаторов в стойках (обратная сторона).

Список литературы

- [1] Линейные ускорители ионов, т. 2. / Под. ред. Б.П. Мурина. – М.: Атомиздат, 1978.
- [2] Мальцев И.Г. Система высокочастотного питания линейного ускорителя протонов УРАЛ-30 – инжектора в бустер протонного синхротрона ИФВЭ. – Серпухов, 1980.
- [3] Мальцев И.Г., Седых В.М., Тепляков В.А. Модульная структура мощного импульсного модулятора для питания ВЧ-системы линейного ускорителя ионов. – Протвино, 1994.
- [4] Евтянов С.И., Редькин Г.Е. Импульсные модуляторы с искусственной линией. – М.: Сов. радио, 1973.
- [5] Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М.: Высш. школа, 1982.
- [6] Бобровский С. DELPHI 5.0. Учебный курс. – СПб., Питер, 2000.
- [7] Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. – Л., Энергия, 1971.
- [8] Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. – Л., Энергоатомиздат, 1991.
- [9] Коломбет Е.А. Таймеры. – М.: Радио и связь, 1983.

Рукопись поступила 26 июня 2008 г.

А.Н. Воробьев, А.Ю. Евстифеев

Особенности построения мощного модульного импульсного модулятора для питания ВЧ-системы линейного ускорителя ионов.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати	30.06.2008.	Формат 60 × 84/8.	Офсетная печать.
Печ.л. 2,625.	Уч.–изд.л. 2,1.	Тираж 80.	Заказ 51.
			Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2008-9, ИФВЭ, 2008
