

P13-2015-100

В. Н. Карпинский, Ю. М. Ноженко, М. М. Омеляненко,  
А. Л. Осипенков

ИСТОЧНИКИ ТОКООТБОРА  
И ТОКОДОБАВКИ ФОКУСИРУЮЩИХ  
И ДЕФОКУСИРУЮЩИХ СТРУКТУРНЫХ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КВАДРУПОЛЬНЫХ  
МАГНИТОВ НУКЛОТРОНА

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Карпинский В. Н. и др.

P13-2015-100

Источники токоотбора и токодобавки фокусирующих и дефокусирующих структурных сверхпроводящих квадрупольных магнитов нуклотрона

Описывается устройство, приводятся технические характеристики и схемы основных узлов источников токоотбора и токодобавки фокусирующих и дефокусирующих линз при последовательной схеме питания нуклотрона. Высокое быстродействие, малые пульсации и низкий шум выходного тока достигнуты за счет применения транзисторных блоков регулирования тока в линейном режиме. В качестве источников питания используются тиристорные выпрямители. Особенностью источников является работа тиристорных выпрямителей в так называемом следящем режиме, позволяющем свести к минимуму потери мощности на регулирующих транзисторах и обеспечить возврат в сеть запасенной в индуктивных элементах энергии. Для прецизионного регулирования тока используется дополнительный контур обратной связи.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2015

Karpinskiy V. N. et al.

P13-2015-100

Current-Sink and Current-Source Power Supplies for Focusing and Defocusing Structural Superconducting Quadrupole Magnets of the Nuclotron

Current-sink and current-source power supplies for focusing and defocusing magnets for series feeding of the Nuclotron are described. Thyristor rectifiers and current regulation units with a pass transistor bank in linear mode are used. As a result, high ramp rate, low ripple and noise are obtained. The special feature of the described power supplies is using thyristor rectifiers in bootstrap mode with the purpose of minimizing power losses on the pass transistor bank and regeneration of stored energy to AC mains. For precision current regulation an overall current feedback is applied.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Последовательная система питания нуклотрона имеет ряд преимуществ по сравнению с применявшейся ранее независимой системой питания [1]. В том числе то, что для установки рабочей точки нуклотрона требуются так называемые источники токоотбора и токодобавки относительно небольшой мощности, которые создают необходимые токи разбаланса в фокусирующих и дефокусирующих магнитах нуклотрона. Один из первых опытов по управлению токами разбаланса описан в [2]. Источник токоотбора получил название 37ТВ, источник токодобавки — 22ТВ, главный источник питания нуклотрона называется 19,20ТВ (рис. 1).

Присутствие на фокусирующих и дефокусирующих магнитах напряжения самоиндукции, возникающего при нарастании и спаде тока главного источника, предъявляет ряд специфических требований к источникам токов разбаланса. При работе нуклотрона скорость изменения тока в магнитах может достигать 3 кА/с, а перепады напряжения на магнитах Д и Ф — до  $\pm 60$  В при фронте до 30 мс. При этом источники разбаланса должны обеспечивать ток, с высокой точностью повторяющий форму тока главного источника

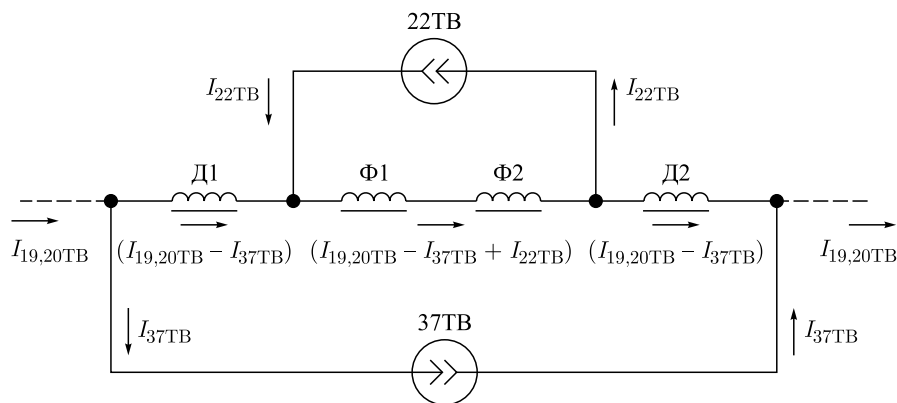


Рис. 1. Структурная схема токоотбора и токодобавки нуклотрона: Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub> — дефокусирующие магниты; Ф<sub>1</sub>, Ф<sub>2</sub> — фокусирующие магниты;  $I_{19,20ТВ}$  — ток главного источника питания;  $I_{37ТВ}$ ,  $I_{22ТВ}$  — ток источников токоотбора и токодобавки соответственно

и не зависящий от перепадов напряжения на их выходе. Это означает, что такие источники должны обладать наряду с высоким быстродействием и стабильностью выходных токов еще и высоким выходным сопротивлением в определенной полосе частот. Соотношение поля дипольных магнитов и полей магнитов Д и Ф должно выдерживаться с относительной погрешностью\* не более  $5 \cdot 10^{-4}$  во всем диапазоне поля от точки инъекции до максимального [1]. Требования к коэффициентам шума и пульсаций выходного тока источников — порядка  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  [1, 3, 4].

Рекордно низкие выходные пульсации достигнуты в источнике питания MPS854 (Danfysik, выходной ток 2000 А, напряжение 200 В) [5]. Размах пульсаций на нагрузке менее 15 мВ. Это источник питания на основе тиристорного выпрямителя, на выходе которого применен регулирующий транзисторный каскад в линейном режиме. Источник предназначен для питания неизменяющимся во времени током. Основное подавление пульсаций происходит главным силовым фильтром выпрямителя, а подавление остаточных пульсаций — электронными методами при помощи транзисторного каскада. Скорость изменения тока подобных источников — менее 1%/с, поэтому они неприменимы на быстроциклирующем сверхпроводящем ускорителе — нуклотроне.

Обеспечить одновременно быстродействие и высокое подавление пульсаций сетевой частоты и ее гармоник способны высокочастотные ключевые преобразователи. Например, источник структуры, подобной LHC600A-40V (CERN, выходной ток 600 А, напряжение 40 В) [6]. Входная часть источника — резонансный инвертор на IGBT-транзисторах, на выходе — транзисторный каскад в линейном режиме. Шум и пульсации источника LHC600A-40V до частот порядка 300 Гц удовлетворяют вышеперечисленным требованиям. На более высоких частотах источник LHC600A-40V создает значительные помехи, вызванные высокочастотным преобразованием, поэтому данный источник также не подходит для применения на нуклотроне.

В связи с этим принято следующее компромиссное решение:

- использовать на входе тиристорный выпрямитель;
- частоту среза главного силового фильтра выпрямителя выбрать достаточно высокой, чтобы обеспечить необходимую скорость изменения напряжения источника (в ущерб качеству подавления пульсаций);
- на выходе применить транзисторный каскад в линейном режиме;
- требуемое подавление пульсаций обеспечить дополнительным пассивным фильтром на выходе транзисторного каскада.

---

\*Относительная погрешность определяется как  $\delta = (U_{\max} - U_{\min})/2U_{\text{ср}}$ . Аналогично вычисляются коэффициенты шума и пульсаций.

После первых опытов применения на нуклотроне источника такой структуры [2] последовало дальнейшее развитие систем токоотбора и токодобавки [4], и в этот период были отработаны схемы основных узлов, которые описываются в данной работе. Шум и пульсации напряжения и тока на выходе источников 37ТВ и 22ТВ до частот порядка 300 Гц соизмеримы с шумом и пульсациями на выходе источника ЛНС600А-40V. Но, в отличие от последнего, 37ТВ и 22ТВ приспособлены для быстроциклирующего ускорителя, и на выходе источников отсутствуют высокочастотные помехи.

Источники 37ТВ и 22ТВ имеют идентичную структуру и схемы управления, они отличаются только величиной выходного напряжения и тока. Поэтому далее описывается только 37ТВ.

Чтобы снизить напряжение и мощность, выделяемую на транзисторном регулирующем каскаде, выпрямители используются в так называемом следящем режиме. При этом на транзисторном каскаде поддерживается постоянное падение напряжения  $U_{PT}$ , а выходное напряжение тиристорного выпрямителя изменяется по закону  $U_{ТВ} = U_{PT} + U_{нагр}$ .

На рис. 2 представлена модель, созданная в программе FASTMEAN [7], которая иллюстрирует принцип работы источника токоотбора 37ТВ в следящем режиме при протекании в нагрузку тока главного источника 19,20ТВ. Функции тиристорного выпрямителя с системой управления выполняют ОУ1, ОУ2.  $V_1$  — транзисторный регулирующий каскад, который управляется током главного источника 19,20ТВ (источник тока  $I_1$ ) через идеальный трансформатор тока ИТУТ1. Результаты моделирования работы 37ТВ в следящем режиме приводятся на рис. 3–6.

На рис. 3 представлены результаты моделирования рабочего цикла нуклотрона: график тока от главного источника 19,20ТВ с амплитудой до 6 кА

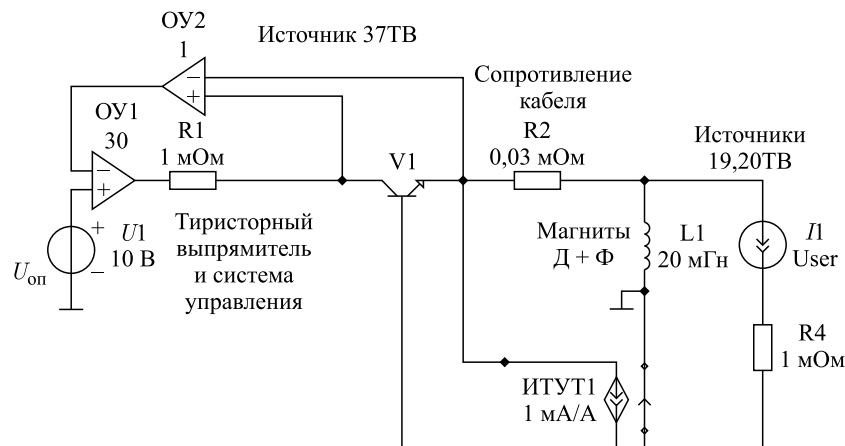


Рис. 2. Модель работы 37ТВ в следящем режиме

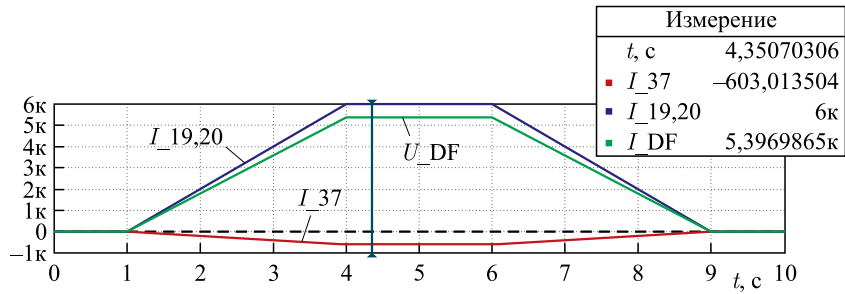


Рис. 3. Токи источников 19,20ТВ, 37ТВ, ток магнитов Д и Ф

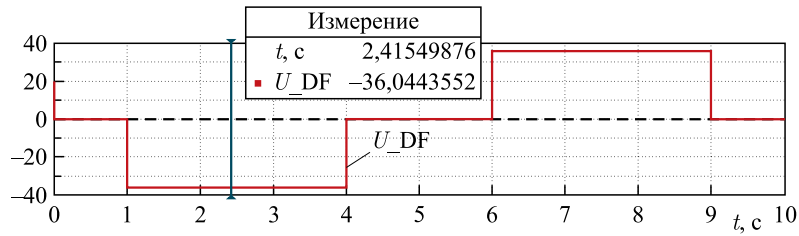


Рис. 4. Напряжение на магнитах Д и Ф

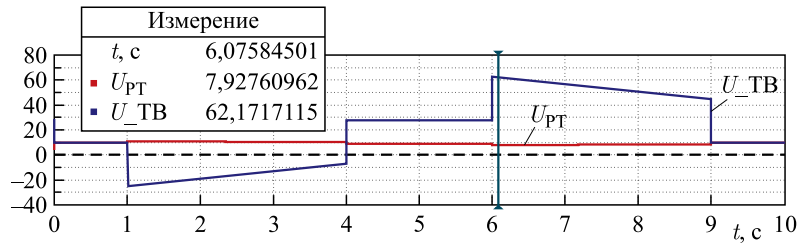


Рис. 5. Напряжение на транзисторном каскаде (РТ) и на выходе тиристорного выпрямителя (ТВ)

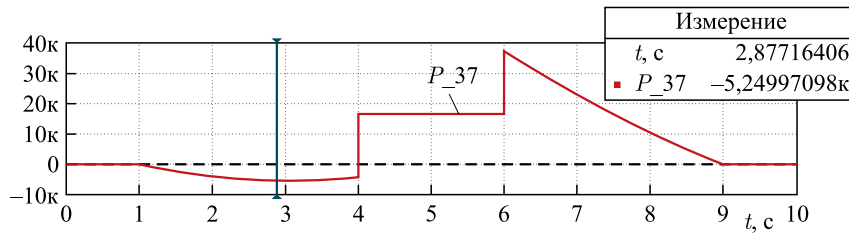


Рис. 6. Мощность, поглощаемая и отдаваемая источником 37ТВ

(кривая  $I_{L19,20}$ ), ток транзисторного регулирующего каскада  $V_1$  амплитудой до 600 А (кривая  $I_{L37}$ ) и результирующий ток через  $L_1$  амплитудой 5400 А (кривая  $I_{DF}$ ).

На рис.4 отображена наводимая результирующим током ЭДС на магнитах Д и Ф (кривая  $U_{DF}$ ). На рис.5 на транзисторном каскаде  $V_1$  поддерживается постоянное падение напряжения около 10 В ( $U_{PT}$ ), а напряжение тиристорного выпрямителя ( $U_{ТВ}$ ) при этом изменяется по закону  $U_{ТВ} = U_{L1} + U_{V1} + I_{V1} R_2$ , где  $R_2$  — сопротивление силового кабеля. На рис. 6 представлена зависимость мощности, проходящей через источник токоотбора, от времени. Отрицательные значения мощности на графике соответствуют отрицательной полярности напряжения на выходе источника при неизменном направлении тока. Это означает, что в это время мощность поступает из нагрузки в источник. Тиристорный выпрямитель при соответствующей схеме и настройке способен возвращать электроэнергию в сеть — автоматически переходить в так называемый инверторный режим, сохраняя при этом способность стабилизировать напряжение на транзисторном каскаде.

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ИСТОЧНИКА 37ТВ

На рис. 7 представлена структурная схема источника 37ТВ. В качестве источника питания установки использован тиристорный выпрямитель комплектного электропривода КТЭ 800/220-112-1-УХЛ4 с собственной системой импульсно-фазового управления (СИФУ) и системой защит. Остальные силовые цепи, а также блоки управления и защит разработаны и изготовлены в ЛФВЭ ОИЯИ.

Напряжение питания  $3 \times 380$  В, 50 Гц через автоматический выключатель подается на трансформатор, понижается до  $3 \times 70$  В и далее поступает на тиристорный выпрямитель электропривода. На выходе выпрямителя установлено устройство защиты от перенапряжения (УЗПН-150), которое замыкает выход выпрямителя накоротко при возникновении напряжения обратной полярности свыше 150 В. Обратное перенапряжение может возникнуть, например, в случае пропадания сети или сбоя инверторного режима при наличии запасенной в индуктивных элементах энергии. Напряжение выпрямителя сглаживается главным силовым фильтром (ГСФ) и поступает на транзисторный каскад, в котором используются параллельно соединенные блоки линейного регулирования тока РТ-01 [8]. Для защиты блоков РТ-01 от перенапряжения используется УЗПН-50, срабатывающее при превышении 50 В. Напряжение на блоках РТ-01 служит сигналом обратной связи для выпрямителя и через плату регулирования напряжения (РН) подается на СИФУ. Таким образом на блоках поддерживается постоянное падение напряжения около 10 В. Каждый блок РТ-01 имеет свой собственный контур обратной связи по току.

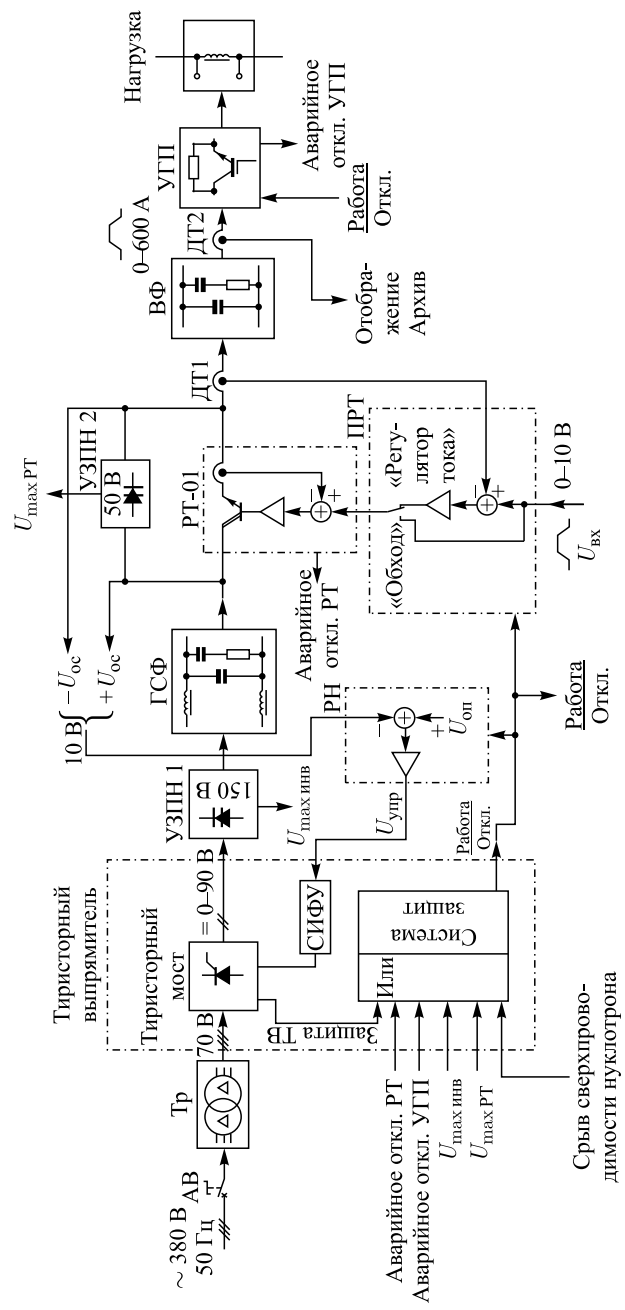


Рис. 7. Структурная схема источника 37ТВ



Для повышения точности и стабильности регулирования тока служит внешний дополнительный контур, в состав которого входят датчик тока ДТ<sub>1</sub> и плата прецизионного регулирования тока (ПРТ). Возможна работа источника 37ТВ как с контуром ПРТ, так и без него — в режиме «Обход». На выходе транзисторного каскада установлен выходной фильтр (ВФ) для ослабления пульсаций выпрямителя и собственного шума блоков РТ-01. Сигнал с датчика тока ДТ<sub>2</sub> поступает на циклозадающую аппаратуру в качестве контрольного сигнала и как информация для архива.

После выходного фильтра ток через ключи устройства гашения поля (УГП) поступает в магниты Д и Ф нуклотрона. Ключи замкнуты при нормальной работе нуклотрона и размыкаются по сигналу датчиков срыва сверхпроводимости, а также при срабатывании защитных устройств 37ТВ. При размыкании ключей в цепь тока вводятся последовательные резисторы, на которых выделяется большая часть запасенной в индуктивности цепи энергии.

## СИСТЕМА ЗАЩИТ

Стойка управления тиристорного электропривода имеет встроенную систему защит. Свободные сигнальные входы использованы для организации защит 37ТВ. Система защит срабатывает по сигналам:

— «Срыв сверхпроводимости нуклотрона» (при поступлении сигнала с датчиков срыва сверхпроводимости);

— « $U_{\text{max выпр}}$ » (превышение напряжения на выходе выпрямителя);

— « $I_{\text{max выпр}}$ » (превышение выходного тока выпрямителя);

— « $U_{\text{max инв}}$ » (сработало УЗПН-150);

— « $U_{\text{max РТ}}$ » (сработало УЗПН-50);

— «Аварийное отключение РТ» (при аварийном отключении одного или нескольких блоков РТ-01);

— «Аварийное отключение УГП» (при аварийном отключении IGBT-модулей устройства гашения поля).

При поступлении одного или нескольких аварийных сигналов выдается сигнал отключения «Работа/Откл.», по которому выключаются регуляторы РН и ПТР, выпрямитель переводится в инверторный режим, и размыкаются ключи УГП.

## ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА ТОКООТБОРА 37ТВ

Основные технические характеристики источника токоотбора 37ТВ приведены в таблице.

### Основные технические характеристики источника токоотбора 37ТВ

Характеристика	Значение	Примечание
Номинальное входное напряжение питания, В с частотой, Гц	$3 \times 380$ 50	
Номинальный выходной ток, А	0–600	
Номинальное выходное напряжение, В в выпрямительном режиме в инверторном режиме	+65 –75	Ведомый инвертор
Номинальное входное напряжение управления, В	$0 \div +10$	
Номинальный коэффициент передачи $I_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ , А/В	60	Контур ПРТ включен
Температурный дрейф коэффициента передачи, $1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ , не более	$\pm 25$	Контур ПРТ включен. Расчетное значение
Температурный дрейф выходного тока, мА/ $^\circ\text{C}$ , не более	$\pm 10$	
Размах напряжения шума и пульсаций на выходе в полосе частот 1–1000 Гц, В, не более при отключенном выходном фильтре с выходным фильтром	0,7 0,1	Нагрузка: сверхпроводящие магниты 20 мГн, кабель 30 мОм

### ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ И СОЕДИНЕНИЙ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ 37ТВ

Упрощенная принципиальная схема силовых цепей и цепей управления источника 37 ТВ приведена на рис. 8. Главный силовой фильтр (ГСФ) состоит из дросселей  $L_1$ ,  $L_2$  типа ФРОС, основной емкости  $C_1$  и демпфирующей цепи  $R_1C_2$ . Тип конденсаторов — МБГВ. Одно из главных условий при выборе параметров силового LC-фильтра — чтобы частота среза фильтра была ниже самой низкой гармоники сетевой частоты (во избежание резонансных явлений). Для лучшего подавления пульсаций выпрямленного напряжения частоту среза нужно выбирать как можно ниже, но не слишком низкую, чтобы выпрямитель имел достаточное быстродействие для работы в следящем режиме. В данном случае частота среза ГСФ выбрана 35 Гц. Подробный расчет фильтров с цепями демпфирования приведен в [9].

Транзисторный регулирующий каскад состоит из 12 параллельно соединенных блоков РТ-01 [8]. Напряжение на блоках РТ-01 служит сигналом обратной связи и поступает на плату регулятора напряжения. Цепь компенсации  $R_4C_4$  необходима для устойчивой работы блоков РТ-01 на индук-

тивную нагрузку. Расчет компенсирующей цепи описан в [8]. На выходе транзисторного каскада для уменьшения пульсаций выпрямителя и собственных шумов каскада установлен выходной фильтр (ВФ), состоящий из  $C_5$  и демпфирующей цепи  $R_5C_6$ . Демпфирование необходимо, поскольку индуктивность магнитов Д и Ф с емкостью  $C_5$  образуют колебательный контур (частота около 40 Гц). Поскольку цепи ВФ оказывают некоторое влияние на величину и форму тока в магнитах Д и Ф, предусмотрено отключение ВФ с помощью реле  $K_1$ .

Устройство гашения поля (УГП) состоит из ключей гашения поля  $KП_1$ ,  $KП_2$  и гасящих резисторов  $R_6$ ,  $R_7$ . При поступлении сигнала на отключение ключи размыкаются одновременно, ток нагрузки замыкается через  $R_6$ ,  $R_7$ , на которых выделяется запасенная в магнитах Д и Ф энергия. Время гашения — порядка 40 мс. Напряжение на каждом резисторе не превышает 500 В. Конденсаторы  $C_7$ ,  $C_8$  (пленочные, фирмы Vishay) устраняют высокочастотные резонансные процессы при выключении. В качестве ключей используются интеллектуальные IGBT-модули фирмы Mitsubishi ( $U_{max} = 1200$  В,  $I_{max} = 800$  А). Платы управления модулей (разработаны в ЛФВЭ ОИЯИ) обеспечивают гальваническую изоляцию управляющего сигнала и сигнала аварийного отключения модулей (превышение тока, перегрев).

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПЛАТЫ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Упрощенная электрическая принципиальная схема платы регулятора напряжения (РН) тиристорного выпрямителя приведена на рис. 9. При поступлении сигнала «Работа» аналоговыми ключами  $DA_3$  схема переводится в режим регулятора напряжения. На вход усилителя ошибки  $DA_2$  от потенциометра  $R_9$  (« $U_{стаб}$ ») поступает опорный сигнал. Цепь  $R_5C_1$  обеспечивает плавное нарастание напряжения выпрямителя при включении (порядка 0,3 с). На «+Вх.», «-Вх.» поступает сигнал отрицательной обратной связи (напряжение на блоках РТ-01), далее через изолирующий усилитель  $DA_1$  — на усилитель ошибки. Сигнал с выхода усилителя ошибки через повторитель  $DA_5$  поступает на СИФУ выпрямителя (сигнал «Вых.»). В результате на блоках РТ-01 поддерживается постоянное падение напряжения (обычно 10 В).

При поступлении сигнала «Откл.» (или при размыкании тумблера «Работа/Откл.») выключается опорное напряжение, отключается усилитель ошибки, на СИФУ поступает напряжение смещения от потенциометра  $R_{10}$  (« $U_{инв}$ »), которое определяет выходное напряжение выпрямителя в инверторном режиме. Номинальное входное напряжение СИФУ электропривода КТЭ 800/220-112-1-УХЛ4 находится в пределах  $\pm 4,5$  В.

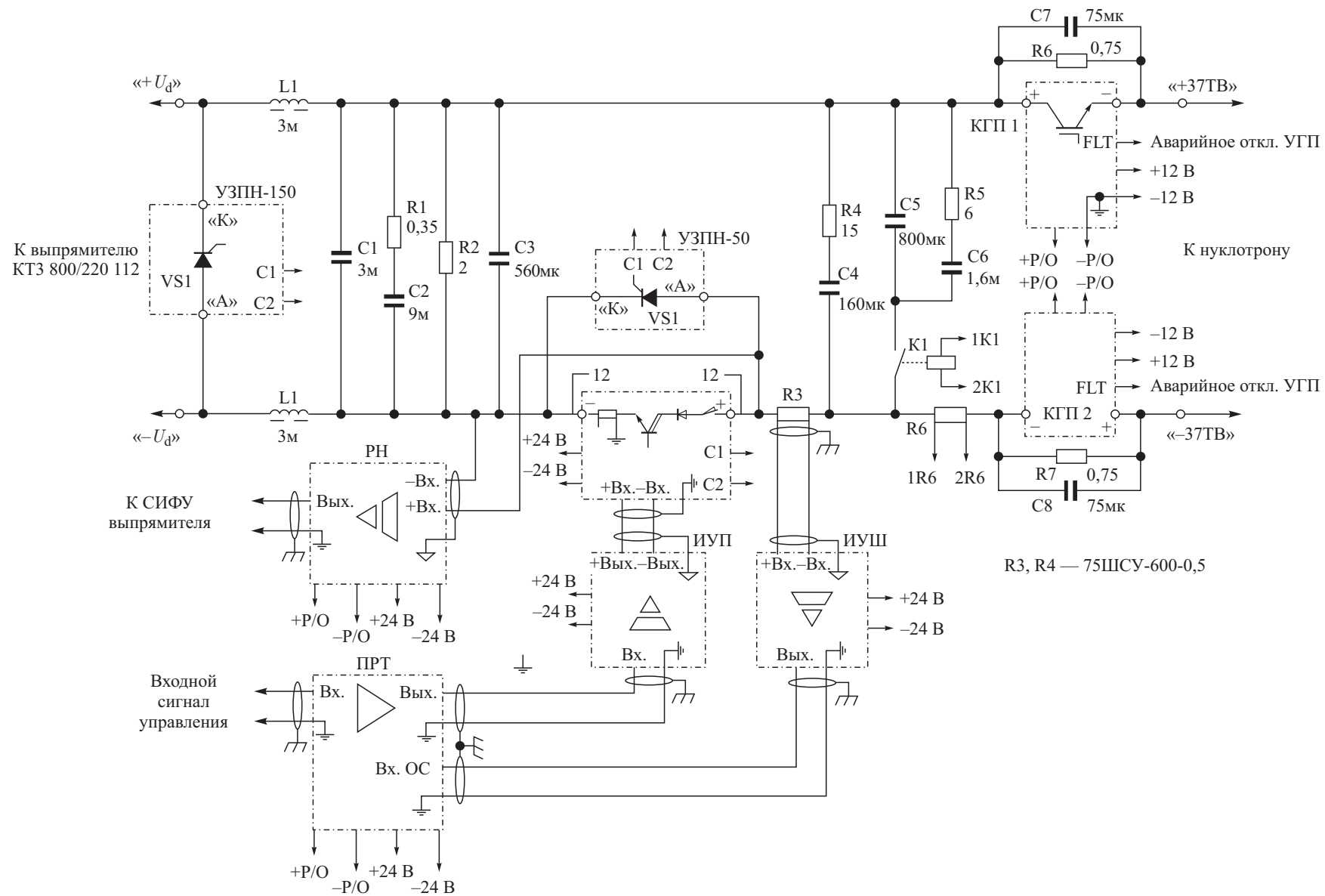


Рис. 8. Электрическая принципиальная схема силовых цепей и соединений 37ТВ

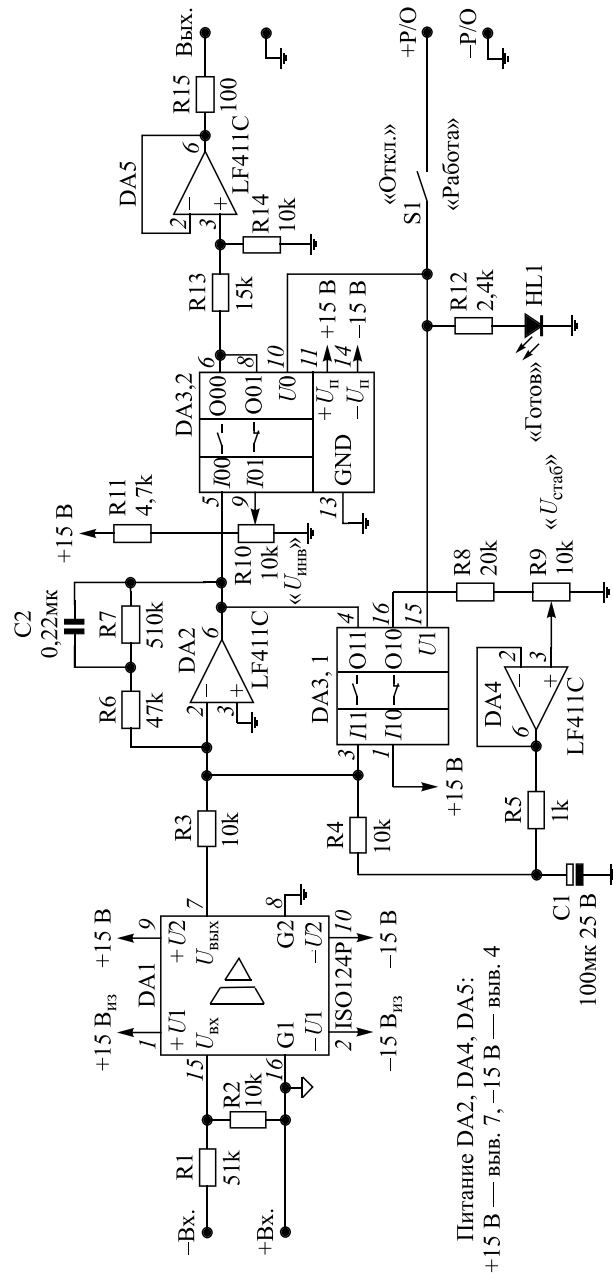


Рис. 9. Электрическая принципиальная схема регулятора напряжения тиристорного выпрямителя

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПЛАТЫ ПРЕЦИЗИОННОГО РЕГУЛЯТОРА ТОКА**

Упрощенная электрическая принципиальная схема платы прецизионного регулятора тока (ПРТ) приведена на рис. 10. На вход «Вх.» поступает управляющий сигнал от циклозадающей аппаратуры ( $0 \div +10$  В). На вход «Вх. ОС» подается сигнал обратной связи ( $0 \div +10$  В) с изолирующего усилителя (ИУШ) датчика тока  $R_3$  силовой цепи (рис. 8). С выхода ПРТ («Вых.») сигнал поступает на изолирующий усилитель-повторитель (ИУП) и далее — на блоки РТ-01. Выходной сигнал — также в пределах  $0 \div +10$  В.

Плата содержит входной каскад  $DA_1$ , усилитель ошибки  $DA_3$ , выходной повторитель  $DA_5$ , аналоговые ключи  $DA_4$  и реле времени на  $DA_2$ . Ключи служат для включения и выключения регулятора тока. Реле времени формирует задержку включения ПРТ порядка 1 с. Задержка необходима для того, чтобы ПРТ вступал в работу после того как установится напряжение тиристорного выпрямителя. Включение и выключение ПРТ производится по сигналу «Работа/Откл.» или тумблером «Вкл. ПРТ/Обход». В режиме «Обход» ПРТ выключен, и сигнал управления поступает через изолирующий усилитель-повторитель на вход РТ-01.

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ИЗОЛИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ-ПОВТОРИТЕЛЯ**

Схема изолирующего усилителя-повторителя приведена на рис. 11. Устройство обеспечивает гальваническую развязку управляющего сигнала от цепей управления блоков РТ-01 (в блоках РТ-01 цепи управления гальванически связаны с силовой цепью). В основе схемы — изолирующий прецизионный малошумящий усилитель AD210 ( $DA_1$ ). Установка нуля производится резистором  $R_3$  «Установка нуля». На выходе  $DA_1$  для дополнительной фильтрации частоты преобразования AD210 на выходе установлен ФНЧ 2-го порядка с частотой среза 10 кГц. Коэффициент усиления устройства по напряжению равен единице. Номинальное входное и выходное напряжение составляет  $0 \div +10$  В.

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ИЗОЛИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ СИГНАЛА ШУНТА**

Схема изолирующего усилителя сигнала шунта (ИУШ) приведена на рис. 12. Сигнал с токового шунта величиной  $0 \div +75$  мВ поступает на прецизионный малошумящий каскад  $DA_1$  с коэффициентом усиления по напряжению 67. Микросхема  $DA_2$  — AD210 описана выше. Коэффициент усиления AD210 в данной схеме около 2. Коэффициент усиления всего устройства устанавливается 10 В/75 мВ резистором  $R_4$  («Установка  $K_{yc}$ »). Ноль на выходе корректируется  $R_7$  («Установка нуля»).

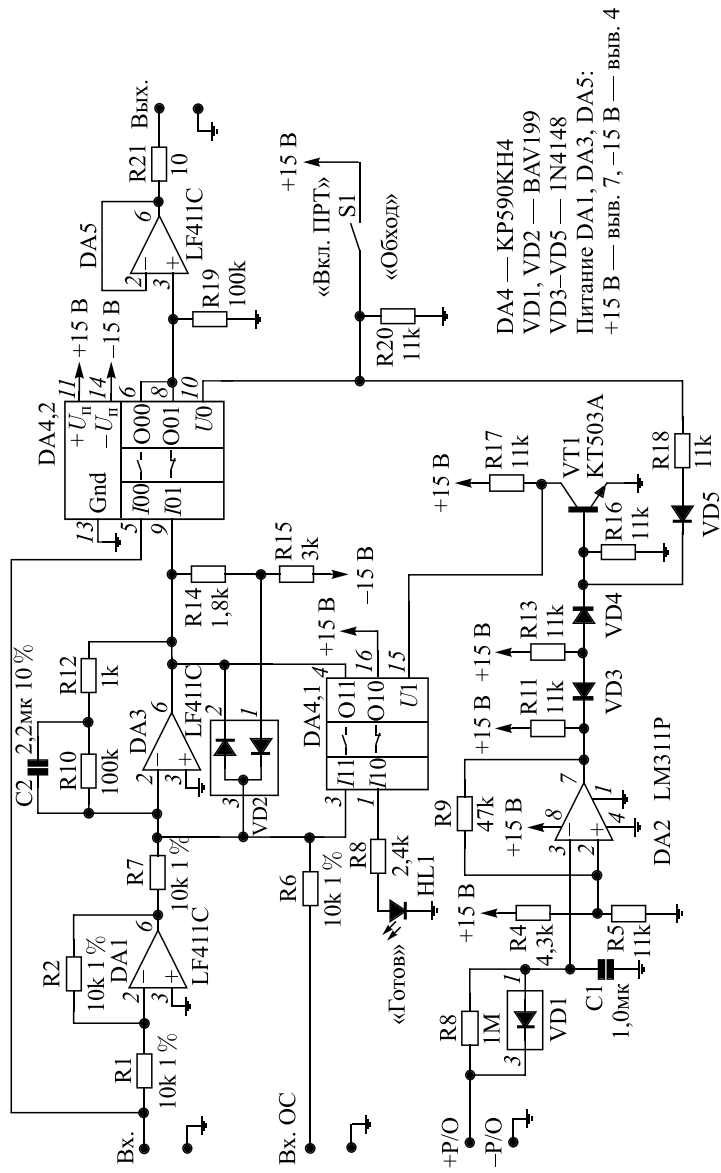


Рис. 10. Электрическая принципиальная схема прецизионного регулятора тока

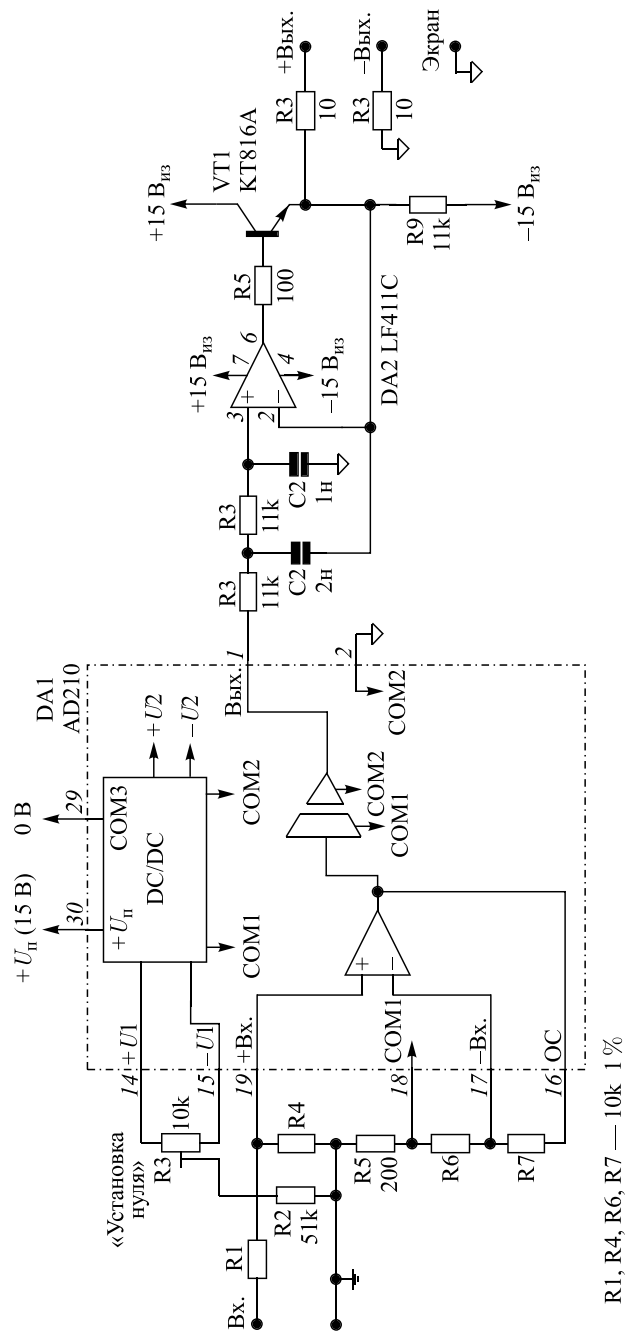


Рис. 11. Электрическая принципиальная схема изолирующего усилителя-повторителя



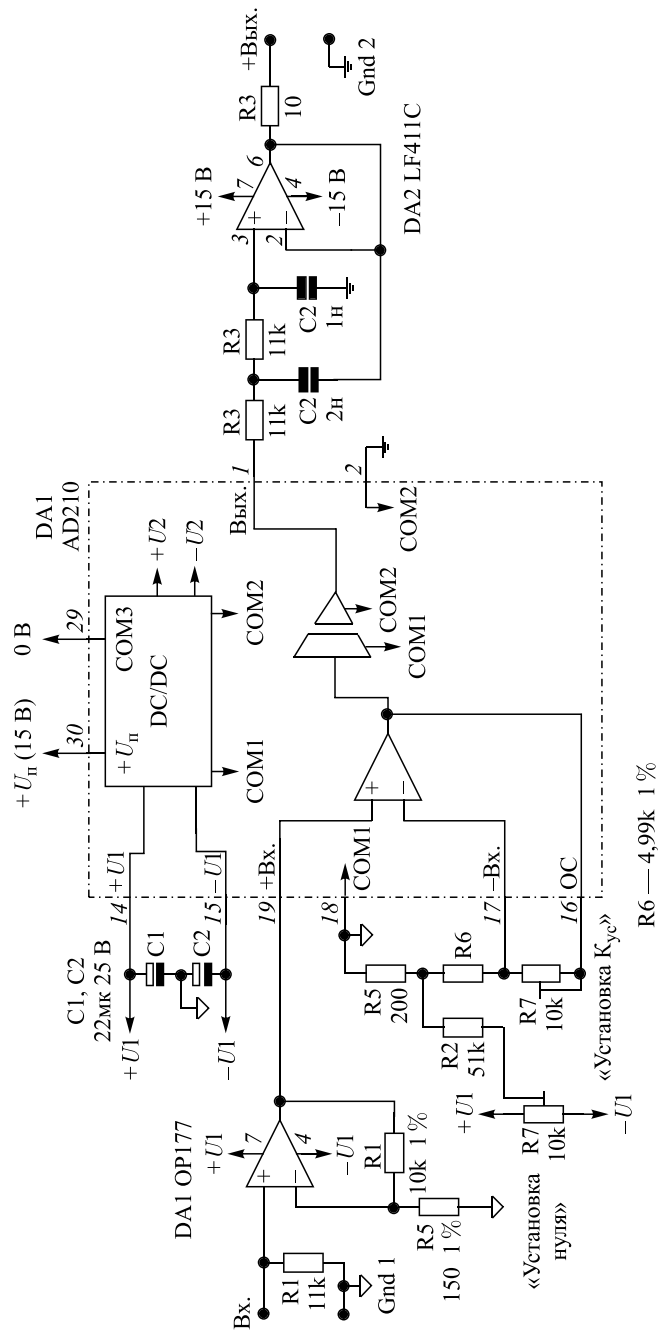
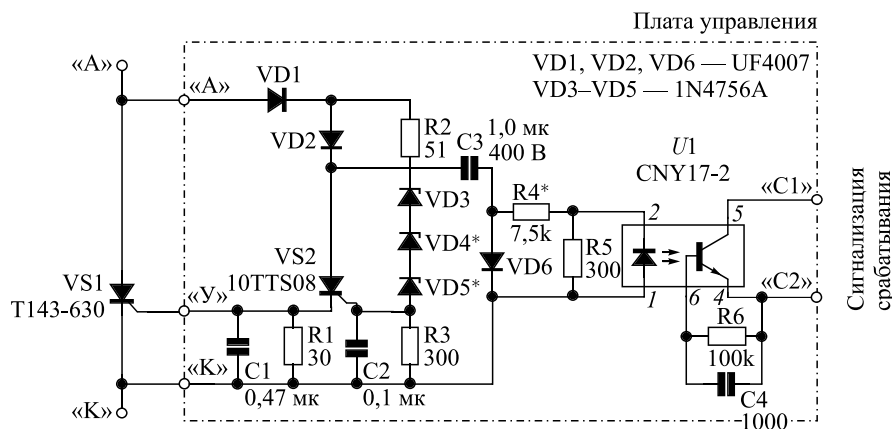


Рис. 12. Электрическая принципиальная схема изолирующего усилителя сигнала шунта

### ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ УЗПН-150 (УЗПН-50)

Электрическая принципиальная схема устройства защиты от перенапряжения УЗПН-150 приведена на рис. 13. В нормальной ситуации силовой тиристор  $VS_1$  закрыт. При превышении порогового напряжения 150 В, определяемого стабилитронами  $VD3$ – $VD5$ , открывается вспомогательный тиристор  $VS_2$  и запускает  $VS_1$ , который замыкает накоротко выводы защищаемого устройства. Согласно техническим характеристикам  $VS_1$  типа Т143-630 рассчитан на средний ток 630 А и допускает ударный однократный ток 10 кА в течение 10 мс. При срабатывании устройства конденсатор  $C_3$  разряжается через входную цепь оптрона  $U_1$ , и в систему защит поступает сигнал о срабатывании. Устройство УЗПН-50 (порог срабатывания 50 В) имеет аналогичную схему, но отличается количеством стабилитронов и номиналом резистора  $R_4$ .



\*В УЗПН-50 вместо  $VD_4$ ,  $VD_5$  установлена перемычка,  $R_4$  — 2,7 кОм

Рис. 13. Электрическая принципиальная схема устройств защиты от перенапряжения УЗПН-150

### ПИТАНИЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД 37ТВ

Для питания плат управления и автоматики используется импульсный стабилизированный источник питания Mean Well DRP-240-24 (24 В, 10 А), из напряжения которого на платах при помощи изолирующих DC/DC преобразователей TRACO получают гальванически изолированные стабилизированные напряжения  $\pm 15$  В. На входе 24 В каждой платы установлен самовосстанавливающийся полимерный предохранитель Polyswitch и обратно включенный диод для защиты от перемены полярности.

## КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА 37ТВ

Фотографии источника 37ТВ представлены на рис. 14, 15.

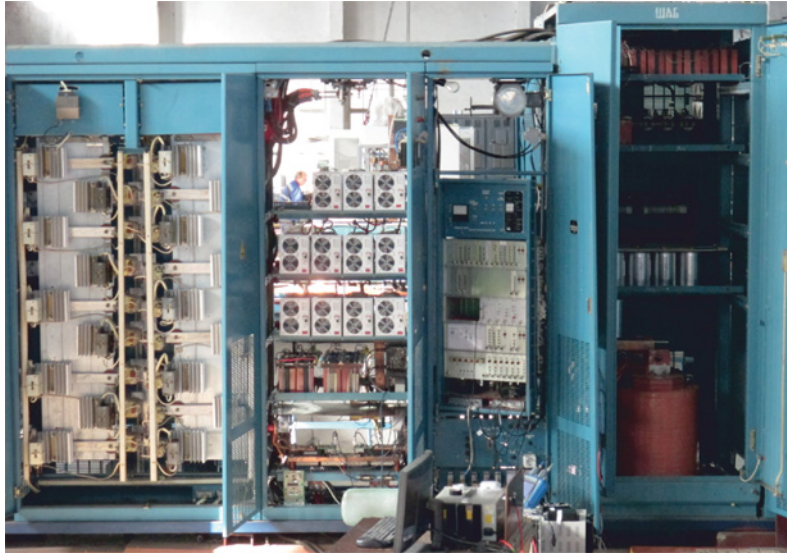


Рис. 14. Источник 37ТВ. Слева направо: шкаф выпрямителя КТЭ 800/220-112; шкаф с блоками РТ-01, выходным фильтром, ключами гашения поля; стойка СИФУ и системы защит; шкаф главного силового фильтра

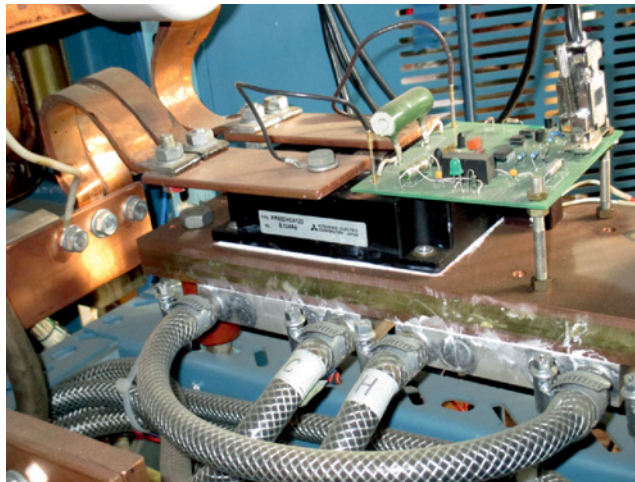


Рис. 15. Ключ гашения поля с водяным охлаждением

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ 37ТВ

На рис. 16–17 приводятся осциллограммы испытания источника 37ТВ в режиме короткого замыкания выхода. На рис. 16, *а* отображена осциллограмма испытания 37ТВ при скачкообразном изменении напряжения выпрямителя. Испытание весьма информативно, поскольку можно одновременно наблюдать качество настройки регулятора РН и качество стабилизации тока блоками РТ-01. Выходной ток транзисторного каскада установлен 240 А (нижний луч). На вход опорного напряжения платы РН подается прямоугольное напряжение от генератора (фронт  $\sim 50$  нс) в сумме с постоянным смещением. Напряжения на блоках РТ-01 изменяется от 10 до 18 В.

На рис. 16, *б* видно, что влияние скачков напряжения на выходной ток пренебрежимо мало. На верхнем луче видны пульсации частоты выпрямления 300 Гц.

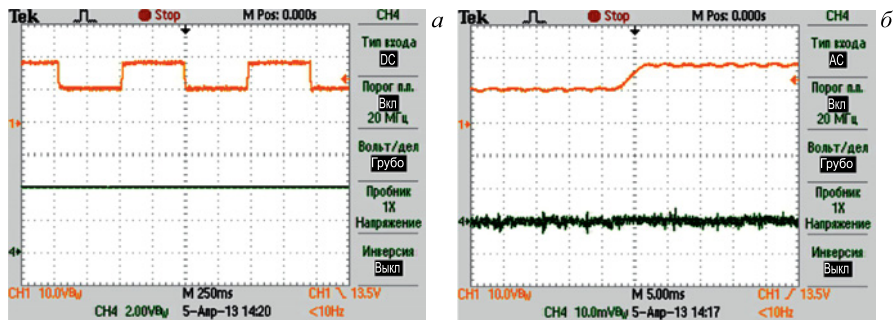


Рис. 16. Осциллограммы испытания источника 37ТВ в режиме короткого замыкания выхода при скачкообразном изменении напряжения выпрямителя: *а*) верхний луч — скачкообразные изменения напряжения тиристорного выпрямителя, размах 8 В; нижний луч — выходной ток 240 А (масштаб по горизонтали: 0,25 с в клетке); *б*) скачкообразное нарастание напряжения выпрямителя величиной 8 В, нижний луч — пульсации тока, 0,6 А в клетке (масштаб по горизонтали: 0,25 мс в клетке)

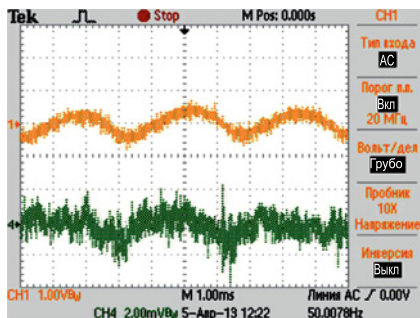


Рис. 17. Осциллограмма пульсаций выходного тока: верхний луч — пульсации напряжения выпрямителя (1 В в клетке); нижний луч — пульсации тока на выходе РТ (0,24 А в клетке) при выходном токе 600 А

На рис. 17 представлена осциллограмма, иллюстрирующая влияние пульсаций выпрямителя частотой 300 Гц на выходной ток 37ТВ. Если принять размах пульсаций выпрямителя 1 В, размах пульсаций тока 0,24 А, то выходное сопротивление группы из 12 параллельно соединенных блоков РТ-01 составит 4,2 Ом, а выходное сопротивление одного блока РТ-01 на частоте 300 Гц при токе 50 А — около 50 Ом, что хорошо согласуется с измерениями в [8].

### РАБОТА 37ТВ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ НУКЛОТРОНА

На рис. 18 приводится осциллограмма токов типичного рабочего цикла нуклотрона. Средний луч — напряжение на магнитах Д и Ф, наводимое током источника 19,20ТВ. Напряжение меняется приблизительно от минус 21 В до плюс 38 В. Рабочий цикл 37ТВ (нижний луч) начинается с инверторного режима. На верхнем луче (напряжение на блоках РТ-01) видно, как напряжение нарастает до 20 В и режим стабилизации напряжения устанавливается с запаздыванием порядка 0,2 с (рис. 19). Это объясняется тем, что перезарядка емкостей ГСФ выпрямителя в начале инверторного режима происходит за счет тока, отбираемого из магнитов Д и Ф через транзисторный каскад, а ток

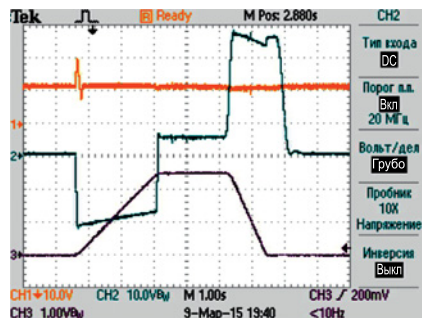


Рис. 18. Осциллограмма совместного цикла 19,20ТВ и 37ТВ: верхний луч — напряжение на РТ, 10 В в клетке; средний луч — напряжение на выходе 37ТВ (на магнитах Д и Ф), 10 В в клетке; нижний луч — выходной ток 37ТВ, 60 А в клетке

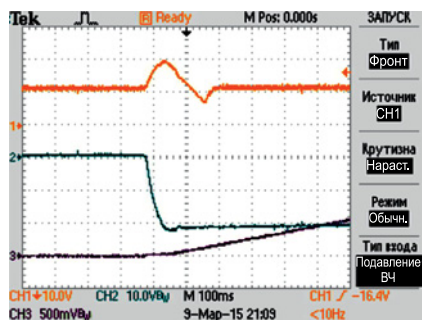


Рис. 19. Осциллограмма начала цикла. Переход выпрямителя 37ТВ в инверторный режим при малом токе: верхний луч — напряжение на РТ, 10 В в клетке; средний луч — напряжение на выходе 37ТВ, 10 В в клетке; нижний луч — ток 37ТВ, 30 А в клетке. Масштаб по горизонтали: 0,1 с в клетке

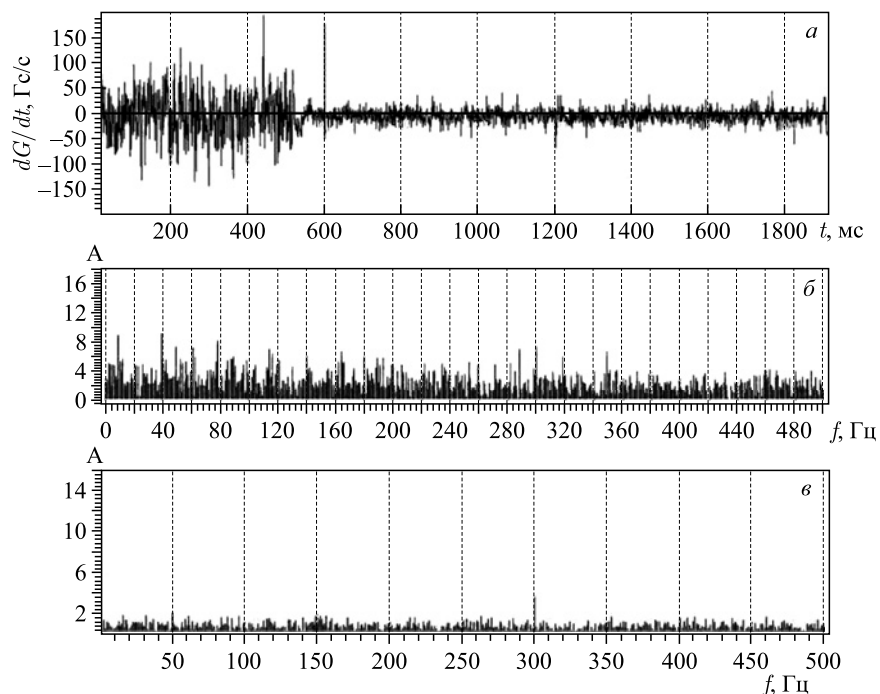


Рис. 20. Осциллограммы с анализатора пульта нуклотрона: *а*) производная индукции магнитного поля нуклотрона (напряжение шума на измерительной индукционной катушке магнита), ВФ подключается во время рабочего цикла нуклотрона; *б*) амплитудно-частотный спектр напряжения шума до подключения ВФ, по вертикальной оси — амплитуда в условных числах; *в*) амплитудно-частотный спектр напряжения шума после подключения ВФ

этот в начале цикла небольшой. При положительном перепаде напряжения на выходе 37ТВ перезарядка емкостей ГСФ происходит за счет энергии из сети, поэтому процессы протекают значительно быстрее и изменение напряжения на РТ-01 едва заметно.

На рис. 20 представлены осциллограммы с анализатора пульта нуклотрона.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена задача создания быстродействующих источников токоотбора и токодобавки с низким шумом, пульсациями и помехами для быстроциклирующего сверхпроводящего ускорителя — нуклотрона. Полных функциональных аналогов источников не существует. Источник 37ТВ без существенных

изменений в схемах и конструкции отработал в шести сеансах нуклотрона. Относительное значение пульсаций выходного тока источника 37ТВ не превышало  $4 \cdot 10^{-5}$ . Относительное значение пульсаций напряжения на магнитах Д и Ф с включенным выходным фильтром не превышало  $8 \cdot 10^{-4}$ . Отказов не было. Получена экспериментальная информация, хорошо изучены особенности совместной работы источника токоотбора 37ТВ и главного источника 19,20ТВ. Также практически проверена возможность управления токами разбаланса магнитов Д и Ф при одновременной работе трех источников: 19,20ТВ, 37ТВ и источника токодобавки 22ТВ.

Авторы выражают благодарность инженеру А. А. Шурьгину за разработку печатных плат и группе электромонтеров под руководством А. Л. Осипенкова за участие в конструировании и за изготовление источников 37ТВ и 22ТВ, кандидату физико-математических наук А. О. Сидорину за ценные замечания при подготовке статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карпинский В. Н. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 837.
2. Аверичев А. С. и др. Итоги 44-го и 45-го сеансов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2012-108. Дубна, 2012. С. 9.
3. Калиниченко В. В., Саванев В. П. Стабилизированный источник постоянного тока для питания сверхпроводящего соленоида. Сообщ. ОИЯИ Р13-83-523. Дубна, 1983.
4. Аверичев А. С. и др. Итоги 46-го и 47-го сеансов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2013-140. Дубна, 2013. С. 6.
5. <http://www.danfysik.com/854/26795>.
6. <http://te-epc-lpc.web.cern.ch/te-epc-lpc/converters/lhc600a-40v/general.stm>.
7. <http://fastmean.ru>.
8. Омеляненко М. М. Блок регулирования тока РТ-01 с транзисторным регулирующим элементом в линейном режиме. Препринт ОИЯИ Р13-2015-95. Дубна, 2015. 12 с.
9. [http://www.ieee.li/pdf/introduction\\_to\\_power\\_electronics/chapter\\_10.pdf](http://www.ieee.li/pdf/introduction_to_power_electronics/chapter_10.pdf).

Получено 24 ноября 2015 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 11.02.2016.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,56. Уч.-изд. л. 1,85. Тираж 215 экз. Заказ № 58749.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)