

## БЛОК РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА С ТРАНЗИСТОРНЫМ РЕГУЛИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ В ЛИНЕЙНОМ РЕЖИМЕ

© 2017 г. М. М. Омеляненко

Объединенный институт ядерных исследований  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6  
e-mail: [mtotelyanenko@inbox.ru](mailto:mtotelyanenko@inbox.ru)  
Поступила в редакцию 02.02.2016 г.

Описываются схема, устройство и технические характеристики блока регулирования тока с транзисторным регулирующим элементом в линейном режиме. Блок предназначен для построения быстродействующих маломощных прецизионных источников стабилизированного тока при низком напряжении на нагрузке, например, для питания обмоток магнитных систем ускорителей. Для построения источника тока необходим внешний источник питания постоянного тока. Требуемый выходной ток обеспечивается параллельным соединением соответствующего количества блоков. Для прецизионного регулирования выходного тока возможно применение внешнего контура обратной связи.

DOI: 10.7868/S0032816217010268

### ВВЕДЕНИЕ

Для получения токов в сотни и тысячи ампер при напряжениях в десятки вольт в большинстве случаев используют импульсные источники питания на IGBT-транзисторах. При этом нередко возникает непростая задача обеспечить низкие пульсации и помехи в выходном токе. Сложные выходные LC-фильтры ухудшают быстродействие источника питания, трудно полностью избавиться от остаточных колебаний в выходном токе. Поэтому в особо ответственных случаях применения незаменимыми остаются источники питания с линейным регулированием.

Источники питания с линейным регулированием при малых собственных шумах способны обеспечить высокое подавление пульсаций питающего выпрямителя, а также стабильность выходного тока при наличии быстрых изменений напряжения на нагрузке. Последнее обстоятельство было решающим в пользу выбора линейного регулирования, поскольку блоки изначально разрабатывались для применения в составе источников токоотбора и токопроводящих фокусирующих и дефокусирующих сверхпроводящих магнитов при последовательной схеме питания нуклотрона [1, 2].

Требования к источникам токоотбора и токодобавки весьма высоки: при максимальной амплитуде тока соответственно 600 и 200 А относительная погрешность величины выходного тока не должна превышать  $5 \cdot 10^{-4}$ . Относительная погрешность определяется как  $\delta = (U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}) / 2U_{\text{ср}}$ . Аналогично вычисляются коэффициенты пуль-

саций и шума. Требования к коэффициентам шума и пульсаций выходного тока источников — порядка  $10^{-4} - 10^{-5}$  [1–3].

В рамках такой концепции блок должен удовлетворять следующим основным требованиям:

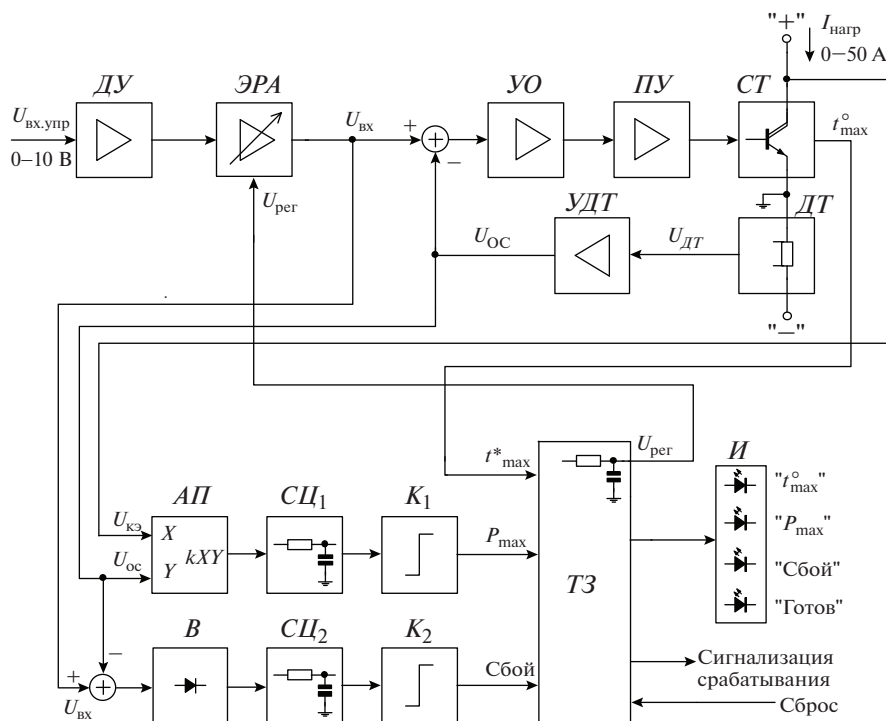
- блок должен работать в относительно широкой полосе частот (примерно от 0 до 1000 Гц), чтобы эффективно подавлять пульсации питающего выпрямителя и обеспечивать стабильность выходного тока при изменениях напряжения на питаемой нагрузке;

- должна быть возможность параллельного соединения блоков для получения больших токов;

- блоки должны допускать применение внешнего прецизионного контура обратной связи, который измеряет и регулирует суммарный выходной ток источника питания [4]; в этом случае к стабильности и точности блоков высоких требований не предъявляется (достаточно 2–3%);

- блок не должен содержать элементов регулировки и подстройки, что обеспечивается выбором схемных решений и элементной базы и облегчает массовый выпуск блоков и их эксплуатацию;

- каждый блок должен быть оснащен системой защит, необходимых для безотказной работы и отключающих блок при возникновении режимов, опасных для транзисторного регулирующего элемента; обязательна дистанционная сигнализация аварийного отключения, очень полезна световая индикация причины отключения;



**Рис. 1.** Структурная схема блока РТ-01. ДУ – входной дифференциальный усилитель; ЭРА – электронный регулятор амплитуды; УО – усилитель ошибки; ПУ – предусилитель; СТ – силовой составной транзистор; ДТ – датчик тока; УДТ – усилитель датчика тока; АП – аналоговый перемножитель; СЦ<sub>1</sub>, СЦ<sub>2</sub> – сглаживающие RC-цепи; К<sub>1</sub>, К<sub>2</sub> – компараторы; В – активный выпрямитель; ТЗ – триггеры защиты; И – плата индикации.

– также нужно предусмотреть возможность отключения неисправного блока без нарушения работоспособности системы питания.

На основании вышеизложенного был разработан блок РТ-01.

### ОПИСАНИЕ БЛОКА РТ-01

Основные технические характеристики блока РТ-01:

- Номинальный рабочий ток 0–50 А.
- Номинальное рабочее напряжение 5–50 В.
- Номинальная рассеиваемая мощность (при  $t_{окр}^{\circ} = +50^{\circ}\text{C}$ ) 500 Вт.
- Номинальное входное напряжение управления 0–10 В.
- Рабочий диапазон частот (по спаду –3 дБ, активная нагрузка) 0–6000 Гц.
- Выходное сопротивление при  $I_{вых} = 50$  А, не менее, на частоте:
  - 0–10 Гц – 165 Ом, 50 Гц – 140 Ом,
  - 100 Гц – 120 Ом, 300 Гц – 56 Ом,
  - 600 Гц – 24 Ом, 1200 Гц – 12 Ом.
- Начальный неуправляемый ток при  $U_{вх.упр} = 0$  не более 100 мА.

- Шум выходного тока в полосе частот 1–1000 Гц не более 0.6 мА<sub>эфф</sub>.
- Максимально допустимое напряжение при аварийном отключении 140 В.
- Максимально допустимое обратное напряжение 1000 В.
- Диапазон рабочих температур 0–50°C.
- Напряжение питания системы управления – постоянное,  $24 \pm 2$  В.
- Ток, потребляемый системой управления, не более 0.33 А.
- Охлаждение – воздушное, принудительное, нерегулируемое.
- Габаритные размеры 400 × 145 × 200 мм.
- Масса не более 9 кг.

Структурная схема блока РТ-01 представлена на рис. 1.

Входной управляющий сигнал поступает на дифференциальный усилитель ДУ, затем – на электронный регулятор амплитуды управляющего сигнала ЭРА. Регулятор амплитуды управляется системой защит ТЗ и обеспечивает плавное нарастание выходного тока при включении блока и плавный спад при аварийном отключении. Время нарастания и спада ~0.5 с. Это необходимо для предотвращения опасных перенапряжений при работе на индуктивную нагрузку. После элек-

тронного регулятора амплитуды управляющий сигнал  $U_{\text{вх}}$  поступает на усилитель ошибки УО, затем на предварительный усилитель ПУ, который управляет силовым составным транзистором СТ. Сигнал с датчика тока ДТ после усилителя УДТ служит сигналом обратной связи  $U_{\text{ос}}$  и поступает на вход усилителя ошибки УО. Так образуется контур стабилизации тока силовой цепи.

Система защит срабатывает в следующих случаях:

- при превышении допустимой температуры радиатора силовых транзисторов;
- при превышении допустимой рассеиваемой силовым транзистором мощности;
- при срыве стабилизации тока.

При возникновении недопустимого режима срабатывает определенный триггер системы защит ТЗ, снижается до нуля входной сигнал контура регулирования тока и загорается светодиод с соответствующей надписью (плата индикации И).

При нагреве радиатора силовых транзисторов свыше  $+85^{\circ}\text{C}$  срабатывает термоконтактный датчик, установленный на радиаторе. Контакты датчика размыкаются, срабатывает триггер защиты и загорается светодиод “ $t_{\text{max}}^{\circ}$ ”.

Срыв стабилизации тока определяется по возрастанию модуля сигнала ошибки контура регулирования тока. Модуль сигнала ошибки получается выпрямлением разности  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{ос}}$  активным выпрямителем В и после сглаживания RC-цепью СЦ<sub>2</sub> поступает на компаратор К<sub>2</sub>. Несоответствие тока в силовой цепи входному напряжению управления, наличие напряжения управления при отсутствии тока, наличие тока при отсутствии напряжения управления – в любом случае срабатывает триггер защиты и загорается светодиод “Сбой”.

Для определения мощности, рассеиваемой силовым транзистором, используется аналоговый перемножитель АП, на который подаются напряжение коллектор–эмиттер  $U_{\text{кэ}}$  силового транзистора СТ и напряжение  $U_{\text{ос}}$ . С выхода перемножителя АП сигнал поступает на RC-цепь СЦ<sub>1</sub> и далее на компаратор К<sub>1</sub>. При выходе режима транзистора за пределы области безопасной работы [5] компаратор запускает триггер защиты, и загорается светодиод “ $P_{\text{max}}$ ”.

Принципиальная схема контура регулирования тока представлена на рис. 2. Контур регулирования тока содержит усилитель ошибки ДА<sub>1</sub>, предусилитель Т<sub>1</sub>, Т<sub>2</sub>, силовой составной транзистор Т<sub>3</sub>–Т<sub>12</sub>, датчик тока R<sub>30</sub>, усилитель датчика тока ДА<sub>2</sub>. Варистор VR<sub>1</sub> служит для защиты силового транзистора от кратковременных перенапряжений, D<sub>5</sub> – для защиты силового транзистора от обратного напряжения. Автоматический вы-

ключатель SF<sub>1</sub> с отключающей способностью 6 кА предназначен для отключения силовой цепи в случае возникновения аварийного тока и одновременно служит рабочим выключателем блока РТ-01.

На выбор конструкции (рис. 3) и номинального тока блока повлияли уже имеющиеся в наличии транзисторы и ребристые радиаторы воздушного охлаждения, использовавшиеся в предыдущих экспериментах [6].

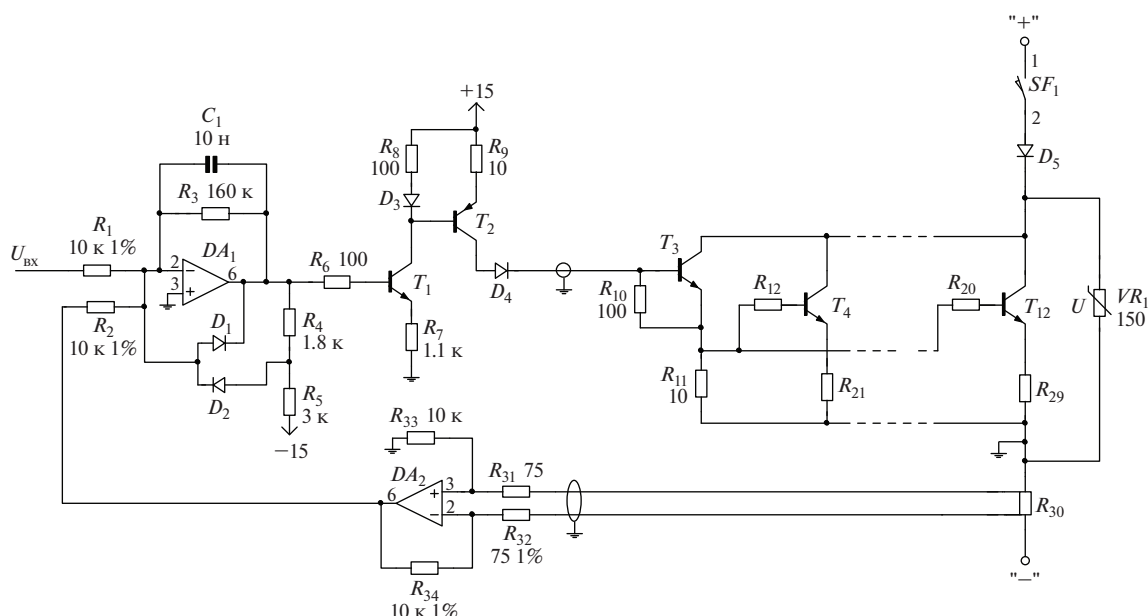
По результатам расчетов и измерений было решено установить на радиаторе 10 биполярных транзисторов MJ15003 [5] и соединить их по схеме Дарлингтона. Охлаждение радиатора выбрано принудительным, воздушным, нерегулируемым и обеспечивается двумя вентиляторами осевого типа. При использовании осевых вентиляторов и при большом количестве соединяемых идентичных блоков наиболее рациональное расположение блоков в шкафах – в ряд в несколько этажей. При этом охлаждающий воздух поступает спереди, а теплый воздух выходит сзади. Примером такой компоновки является шкаф с РТ-01 источника токоотбора нуклотрона 37ТВ [1, 2] (рис. 4).

Силовые выводы блока выполнены гибкими многожильными проводами длиной ~0.5 м. Цепь входного управляющего сигнала блока РТ-01 гальванически связана с силовой цепью. Для изоляции системы управления от силовой цепи в источниках [1, 2] используется один общий блок гальванической развязки управляющего сигнала для всей группы параллельно работающих блоков РТ-01.

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОКА РТ-01 ДЛЯ ПИТАНИЯ ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКИ

При использовании блока РТ-01 в составе источника питания индуктивной нагрузки в первую очередь следует предусмотреть внешние цепи защиты силовых транзисторов блока от перенапряжений. В простейшем случае это может быть цепь из диода и резистора. В источниках питания, описанных в [1, 2], применены тиристорные короткозамыкатели. Тиристорный ключ, способный выдерживать аварийный ток системы питания, подключен параллельно группе блоков РТ-01 и срабатывает в случае, если напряжение на блоках превысит 50 В.

Устойчивость контура регулирования тока при работе на активную нагрузку вплоть до нулевого сопротивления обеспечивается цепью коррекции R<sub>3</sub>, С<sub>1</sub> (рис. 2). Амплитудно-частотная характеристика (а.ч.х.) петлевого усиления имеет при этом спад 6 дБ/октаву. Сдвиг фазы сигнала обратной связи относительно входного сигнала не превышает 90°, и система устойчива.



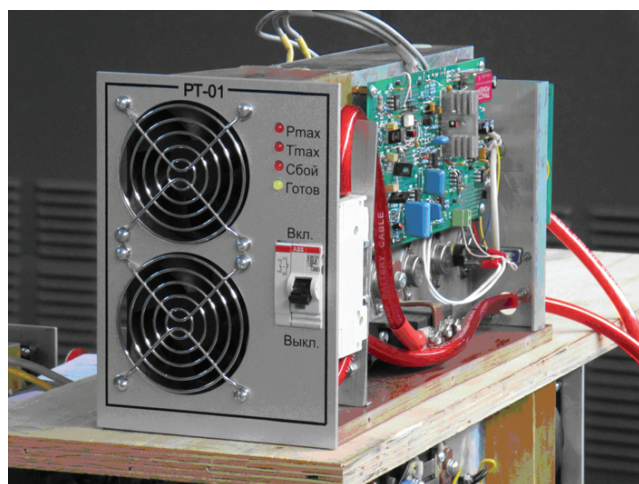
**Рис. 2.** Принципиальная схема контура регулирования тока.  $DA_1$  – LF411С,  $DA_2$  – OP177P;  $T_1$  – KT503A,  $T_2$  – KT816A,  $T_3$ – $T_{12}$  – MJ15003;  $D_1, D_2$  – BAV199,  $D_3$  – КД522А,  $D_4$  – 1N4007,  $D_5$  – МДД80-10;  $SF_1$  – АВВ-63А-DC;  $R_{12}$ – $R_{20}$  – 2 Ом,  $R_{21}$ – $R_{29}$  – 0.05 Ом,  $R_{30}$  – 75ШСУ-50-0.5,  $VR_1$  – S14K95.

В случае подключения индуктивной нагрузки индуктивность совместно с активным сопротивлением всей силовой цепи образуют на пути тока фильтр нижних частот первого порядка, который изменяет а.ч.х. петлевого усиления – вносится дополнительный сдвиг фазы [7], и в контуре регулирования возникают автоколебания. Этот режим опасен для силовых транзисторов, и попытки подобрать номиналы компенсирующих цепей экспериментально могут закончиться повреждением дорогостоящего оборудования.

Задача удобно и безопасно решается с помощью программ моделирования электрических цепей. На рис. 5 представлена упрощенная модель контура регулирования тока блока РТ-01, созданная в программе FASTMEAN [8].

Структура и а.ч.х. петлевого усиления модели в интересующем нас диапазоне частот соответствуют схеме на рис. 2. Схема замещения силового составного транзистора с предусилителем состоит из преобразователя напряжения в ток  $ИТУН_1$  и резистора  $R_4$ , который выполняет функцию выходного сопротивления транзистора. Нагрузка представлена эквивалентной схемой  $L_1, R_7$ . Выходное сопротивление транзистора снижается при увеличении тока. Таким образом, снижается и частота среза, определяемая как  $f_B = (R_4 + R_7)/(2\pi L_1)$ . Очевидно, что компенсацию нужно рассчитывать для самой низкой возможной частоты среза – при максимальном токе. Согласно измерениям выходное сопротивление силового составного транзистора при токе 50 А составляет 2.3 Ом. На рис. 6 приведены результаты моделирования а.ч.х. и фазочастотной характеристики (ф.ч.х.) разомкнутого контура регулирования тока.

Кривые 1 – а.ч.х. и ф.ч.х. при активной нагрузке. Спад 6 дБ/октаву на а.ч.х. выше 100 Гц сформирован внутренней цепью коррекции модели  $R_3, C_1$  (рис. 5). При подключении индуктивной нагрузки (кривые 2) на а.ч.х. добавляется перегиб в области 30 Гц. Результирующий наклон а.ч.х. 2 при пересечении линии 0 дБ составляет 12 дБ/ок-



**Рис. 3.** Внешний вид блока РТ-01.



Рис. 4. Расположение блоков РТ-01 в источнике 37ТВ [1, 2].

таву, что говорит о сдвиге фазы в контуре  $180^\circ$  (ф.ч.х. 2), и замкнутая система будет неустойчива. Для компенсации сдвига фазы используется цепь  $R_6, C_2$ . При подключении параллельно нагрузке резистора  $R_6$  сдвиг фазы возвращается к  $90^\circ$

(ф.ч.х. 3), спад а.ч.х. выше 200 Гц возвращается к величине 6 дБ/октаву (а.ч.х. 3). Чтобы свести к минимуму потери мощности на резисторе  $R_6$ , последовательно с ним включается разделительный конденсатор  $C_2$ .

### ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОДИНОЧНОГО БЛОКА

На рис. 7 представлена осциллограмма выходного тока РТ-01 в режиме короткого замыкания при подаче на вход прямоугольного напряжения управления с крутым фронтом ( $\approx 50$  нс). Гладкая переходная характеристика свидетельствует о равномерной а.ч.х. и большом запасе устойчивости блока РТ-01.

На рис. 8 представлена осциллограмма синусоидального выходного тока частотой 16 Гц (размах 50 А), а на рис. 9 — его амплитудно-частотный спектр. Данные испытания позволяют без прецизионных измерений предварительно оценить нелинейность вольт-амперной характеристики блока РТ-01. Амплитуда 2-й гармоники в выходном токе не превышает  $-46$  дБ ( $K_{Г2} \leq 0.5\%$ ). Следовательно, несимметрия верхней и нижней половины синусоиды не превышает 0.24 А.

На рис. 10 приведена осциллограмма выходного тока РТ-01 при работе на описанную выше компенсированную активно-индуктивную нагрузку ( $L_1 = 12.8$  мГн,  $R_7 = 0.17$  Ом,  $R_6 = 18$  Ом,  $C_2 = 100$  мкФ на рис. 5) при подаче на вход прямоугольного сигнала с крутым фронтом ( $\approx 50$  нс) в сумме с постоянным смещением. Верхний луч — выходной ток РТ-01, средний луч — напряжение на индуктивности, нижний луч — ток в индуктивности. Амплитуда импульсов тока выбрана 1 А для того, чтобы напряжение на индуктивности не

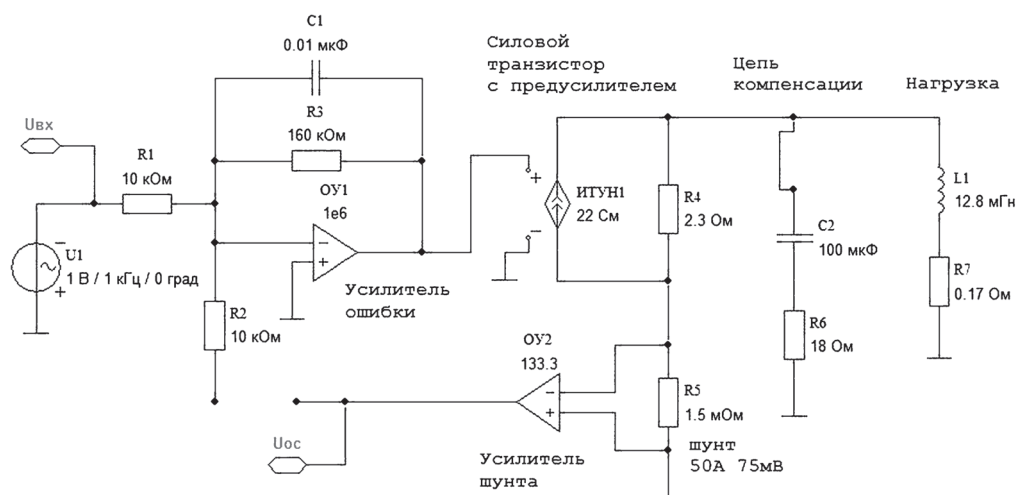
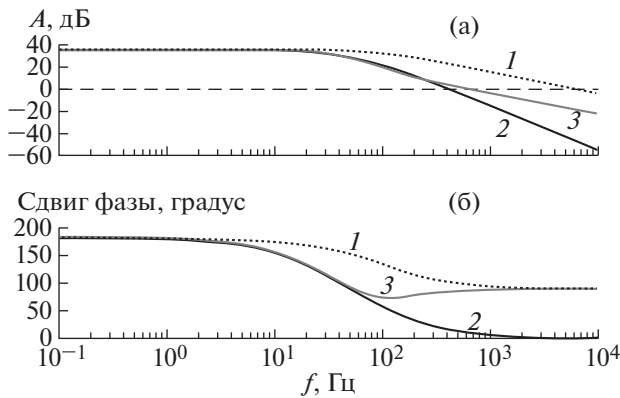
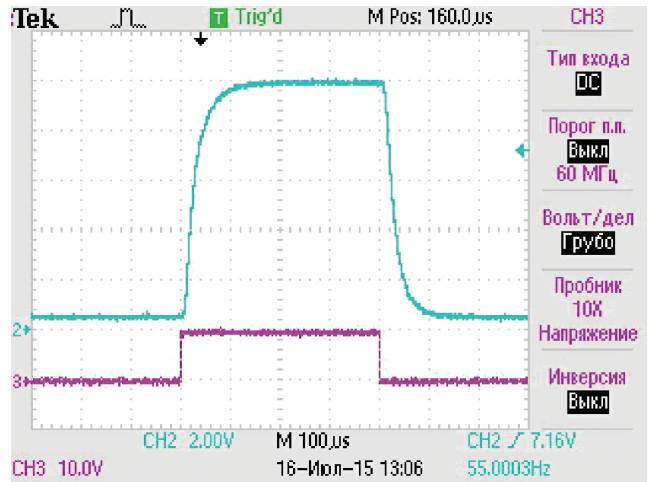


Рис. 5. Компьютерная модель контура регулирования тока.

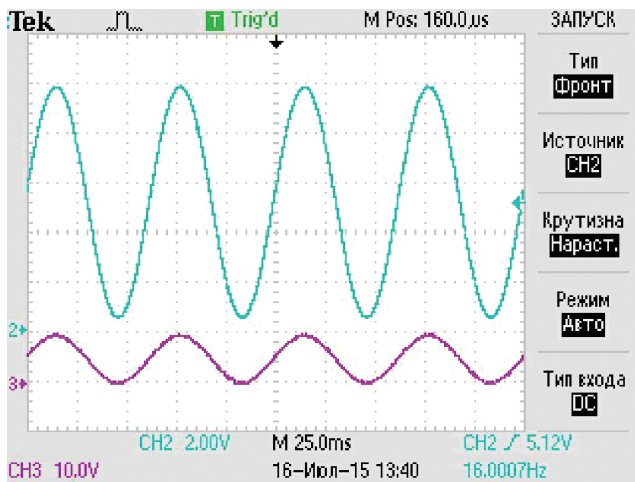




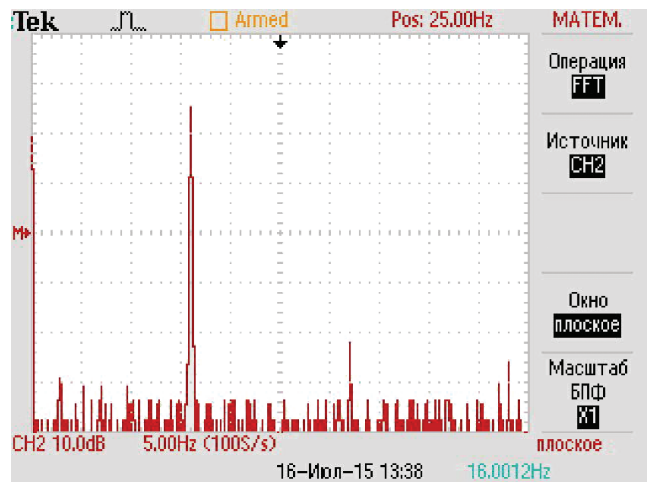
**Рис. 6.** Результаты моделирования а.ч.х. (а) и ф.ч.х. (б) разомкнутого контура регулирования тока.  $A = 20 \lg(U_{oc}/U_{вх})$  – коэффициент петлевого усиления; 1 – активная нагрузка, 2 – некомпенсированная индуктивная нагрузка, 3 – компенсированная индуктивная нагрузка.



**Рис. 7.** Осциллограмма выходного тока: нижний луч – входной сигнал, амплитуда 10 В, фронт 50 нс; верхний луч – выходной ток РТ-01, амплитуда 50 А. Масштаб по горизонтали 100 мкс/деление.



**Рис. 8.** Осциллограмма выходного тока: нижний луч – входной сигнал, частота 16 Гц, размах 10 В; верхний луч – выходной ток, размах 50 А. Масштаб по горизонтали – 25 мс/деление.



**Рис. 9.** Амплитудно-частотный спектр синусоидального выходного тока. Масштаб по вертикали 10 дБ/деление, по горизонтали – 5 Гц/деление.

выходило за пределы  $\pm 20$  В. Отсутствие колебаний свидетельствует об оптимальном выборе параметров компенсирующей цепи.

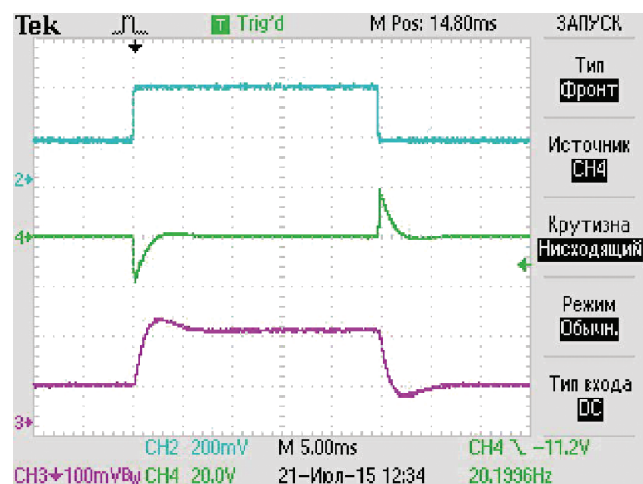
### ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА БЛОКОВ РТ-01

Принципиального ограничения количества параллельно соединяемых блоков нет. При расчете цепей компенсации следует учитывать, что выходное сопротивление группы параллельно соединяемых блоков снижается пропорционально числу блоков, а а.ч.х. выходного тока без влияния индуктивности нагрузки соответствует а.ч.х. одиночного блока.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для работы в составе ускорительного комплекса ЛФВЭ ОИЯИ было изготовлено 22 блока, 12 из них используются на нуклотроне в составе источника токоотбора 37ТВ [2] (выходной ток до 600 А). Также в сеансах проводились пробные включения источника токодобавки 22ТВ, в котором используются 4 блока РТ-01 (номинальный ток 200 А). С блоками РТ-01 было проведено 6 сеансов нуклотрона.

Принцип линейного регулирования тока и рациональное конструирование установок позволили добиться низкого уровня шумов, помех и



**Рис. 10.** Испытание РТ-01 на активно-индуктивную нагрузку: верхний луч – выходной ток РТ-01, начальный ток 0.8 А, размах 1 А; средний луч – напряжение на индуктивности, размах 40 В; нижний луч – ток в индуктивности, размах 1 А в установившемся режиме. Масштаб по горизонтали 5 мс/деление.

пульсаций и, как результат, низких пульсаций полей фокусирующих и дефокусирующих магнитов нуклотрона [2]. Два блока РТ-01 используются в составе стенда для магнитных измерений, при которых допустимый уровень шумов и помех еще ниже [9]. Блоки не требуют регулировки. Отказов не было. Конструкция блоков достаточно удобна в работе.

Автор выражает благодарность В.Н. Карпинскому за постановку задачи, участие в подготовке технического задания на блоки РТ-01 и полезные обсуждения, А.А. Шурыгину за разработку печатных плат, Ю.М. Ноженко и группе электромонтеров под руководством А.Л. Осипенкова за участие в конструировании и изготовлении 22 блоков РТ-01,

А.О. Сидорину за ценные замечания при подготовке статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпинский В.Н., Кондратьев Н.Г., Осипенков А.Л., Караваев В.Г., Филиппов Н.А., Трубников Г.В., Коваленко А.Д., Сидорин А.О., Бутенко А.В., Волков В.И., Василишин Б.В., Кириченко А.Е., Романов С.В. // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7. № 7(163). С. 837.
2. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., Алфеев А.В., Андреев В.А., Базанов А.М., Батин В.И., Блинов Н.А., Бровко О.И., Бутенко А.В., Валькович А., Василишин Б.В., Вишневский А.В., Волков В.И., Галимов А.Р., Говоров А.И. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-2013-140. Дубна, 2013. С. 9.
3. Калиниченко В.В., Саванеев В.П. Сообщение ОИЯИ Р13-83-523. Дубна, 1983.
4. Богомолова Л.К., Денисов Ю.Н., Калиниченко В.В., Пережогин В.А. // Материалы III совещания по изохронному циклотрону У-120М и его использованию для решения физических проблем. Ческе Будейовице, ЧССР, 14–18 мая 1973. С. 62.
5. Motorola Semiconductor Technical Data. Complementary Silicon Power Transistors MJ15003. Motorola, Inc., 1995. <http://pdf.datasheetarchive.com/indexerfiles/Datasheets-UD8/DSARS0021899.pdf>
6. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., Алфеев А.В., Андреев В.А., Базанов А.М., Балдин А.А., Батин В.И., Блинов Н.А., Бровко О.И., Бутенко А.В., Василишин Б.В., Вишневский А.В., Волков В.И., Галимов А.Р., Говоров А.И. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-2012-108. Дубна, 2012. С. 6.
7. Power Booster Applications. AN14. Apex Microtechnology, Inc. 2012. <https://www.apexanalog.com/resources/appnotes/an14u.pdf>
8. <http://fastmean.ru>
9. Омеляненко М.М., Борисов В.В., Донягин А.М., Костромин С.А., Макаров А.А., Ходжибагиян Г.Г., Шемчук А.В. Препринт ОИЯИ Р13-2016-42. Дубна, 2016.