

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 681.513.6 + 621.3.078

### УПРАВЛЯЮЩИЙ КОНТРОЛЛЕР ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГОБЛОКА УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Д. В. Сеньков<sup>1,2</sup>, А. С. Медведко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2  
E-mail: D.V.Senkov@inp.nsk.su*

Рассматриваются структура и алгоритмы управления контроллера высоковольтного источника с выходными напряжением до 60 кВ и мощностью до 30 кВт. Источник разработан для применения в составе созданного в Институте ядерной физики СО РАН энергоблока установок электронно-лучевой сварки. Для получения качественных сварных соединений требуется высокая стабильность энергии электронного пучка. При этом стандартным режимом работы является быстрая и глубокая модуляция электронного тока. Решена задача достижения высокого качества регулирования и ограничения переходных искажений выходного напряжения источника. Ошибка установки и стабилизации выходного напряжения составляет 0,1 %, что позволяет получать высокое качество сварки. Переходные искажения при 100 %-ной модуляции тока нагрузки не превышают величины  $\pm 1$  %, что вместе с высокой скоростью реакции источника на пробой в нагрузке (энергия, выделяющаяся при пробое, менее 15 Дж) защищает свариваемые детали и элементы пушки от повреждения электронным лучом.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, источник высокого напряжения, переходной процесс, стабилизация напряжения, адаптивная обратная связь.

**Введение.** В последнее десятилетие наблюдается существенный прогресс в развитии цифровой обработки сигналов, появились производительные сигнальные процессоры, предназначенные для применения в преобразователях энергии. Эти микросхемы, построенные по принципу «система на кристалле», имеют в своём составе процессорное ядро, быстрый многоканальный аналого-цифровой преобразователь, многоканальный генератор сигналов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) (часто с дроблением минимального шага), что обеспечивает дискретность широтно-импульсной модуляции сигнала более 16 бит при частоте до 100 кГц. Вычислительная мощность ядра в сумме с аналого-цифровыми преобразователями с высокой частотой сэмплирования выборок позволяет реализовать достаточно сложные алгоритмы управления источником. Становится возможным организовать быстродействующую цифровую стабилизацию и сложные фильтры и, как результат, достичь высокого качества регулирования, снижая погрешность поддержания выходных параметров до десятков ppm. Кроме того, данные кристаллы оснащены богатым набором последовательных и параллельных периферийных интерфейсов и поддерживают аппаратную реализацию большого количества управляющих протоколов, благодаря чему управление источником и связь с системой управления осуществляется без дополнительного усложнения контроллера.

Таким образом, построение контроллера источника питания на вышеописанных сигнальных процессорах в сумме с применением в силовой части преобразователя современных силовых ключей на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором

(IGBT) позволяет создать источники с выходной мощностью в десятки киловатт с высоким коэффициентом полезного действия, хорошими временными характеристиками, гибко настраиваемым алгоритмом управления и защит, интегрированными управляющими интерфейсами.

При разработке в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН энергоблока для установок электронно-лучевой сварки [1] потребовалось создание высоковольтного источника постоянного тока с максимальной мощностью 30 кВт и выходным напряжением до 65 кВ. Источник используется для создания ускоряющего напряжения в электронной пушке. Специфика установки накладывает ряд требований на источник питания. Во-первых, для формирования качественного сварного шва необходима высокая стабильность энергии электронного луча. Главным образом это нужно для получения минимального размера сфокусированного на свариваемой поверхности электронного пятна. Допустимая нестабильность выходного высокого напряжения источника в зависимости от технологических требований установки лежит в пределах 0,5–0,1 %. Во-вторых, одним из режимов работы установки является глубокая модуляция тока электронного луча. В этом режиме ток нарастает от 0,1–0,5 мА (режим прицеливания) до рабочего значения 100–500 мА, а потом спадает. Время фронта подъёма и спада — порядка 500 мкс. Другой режим модуляции — это изменение рабочего тока на 10–15 % с частотой 50–100 Гц. От источника высокого напряжения требуется, чтобы переходные искажения в высоком напряжении при модуляции не превышали по амплитуде 5 % (в некоторых установках 1 %) и были не дольше 5 мс по времени. Ограничение амплитуды возникает в силу необходимости иметь сфокусированный на поверхности и ограниченный по размеру электронный луч, чтобы не допускать касания лучепровода. В соответствии с данными требованиями разработано семейство высоковольтных источников с выходной мощностью 15 кВт [2] и 30 кВт [3].

Цель предлагаемой работы — создание управляющего контроллера для мощных высоковольтных источников, позволяющего получить относительную нестабильность выходного напряжения менее 0,1 % и минимизировать переходный процесс в выходном напряжении источника при модуляции выходного тока до уровня менее 5 % по амплитуде и 5 мс по времени.

**Управляющий контроллер.** Контроллер построен с использованием цифрового сигнального процессора TMS320F2811 фирмы "Texas Instruments" и программируемой логической матрицы MAX3128 фирмы "Altera". Для общения с внешним миром в контроллере реализованы управляющие интерфейсы CANbus, Ethernet и RS232, модуль локального управления и индикации, а также встроенный диагностический web-сервер.

Входные сигналы, несущие информацию о состоянии источника, подаются на масштабирующие буферы с защитой от импульсов перенапряжения и от синфазной помехи. С выходов буферов сигналы поступают на входы аналого-цифрового преобразователя, и далее все они обрабатываются уже только внутри управляющего алгоритма, находящегося в сигнальном процессоре. Структурные части управляющего алгоритма можно разбить на несколько функциональных блоков: входной фильтрации, защиты, индикации и управления, стабилизации. Сначала происходит входная фильтрация измеренных сигналов. В данной разработке каждый сигнал оцифровывается с частотой, в 4 раза превышающей рабочую частоту силового преобразователя высоковольтного источника. В нашем случае рабочая частота составляет обычно 20 кГц. Благодаря такому приёму все сигналы пропускаются после измерения через цифровой фильтр с усреднением за период работы силового преобразователя (50 мкс), что позволяет практически полностью подавить помехи от него, наводящиеся на входы контроллера. Для коррекции фазовой характеристики на выходе усредняющего фильтра расположены фильтры с экспоненциальной импульсной характеристикой с постоянной времени 200 мкс. Далее все сигналы поступают в блок за-

щиты, контролирующей превышение параметрами источника безопасных значений, узел индикации и передаются через интерфейс связи в вышестоящую систему управления. Значения выпрямленного напряжения трёхфазной сети, выходного напряжения и выходного тока источника поступают в блок стабилизации, вычисляющий сигнал управления для широтно-импульсного формирователя. С формирователя ШИМ сигналы управления силовыми ключами подаются на программируемую логическую матрицу, в которой реализован блок аппаратной защиты, физически отключающий силовые ключи в случае нештатной ситуации. С выхода этого узла сигналы управления идут на усилители управления силовыми ключами [2]. В результате на выходе силового преобразователя формируются прямоугольные импульсы напряжения частотой 20 кГц, модулированные по скважности в соответствии с управляющим сигналом. Это напряжение поступает на повышающий высоковольтный трансформатор и затем выпрямляется. Уровень выходного напряжения контролируется высоковольтным делителем, напряжение с которого возвращается в контроллер.

**Стабилизация выходного напряжения.** Как уже было отмечено, высоковольтный источник представим в виде трёх основных узлов:

- силовой преобразователь, формирующий ШИМ с напряжением частотой 20 кГц и амплитудой 400 В;
- повышающий трансформатор с секционированной вторичной обмоткой;
- физически совмещённые со вторичной обмоткой секционированный высоковольтный выпрямитель и конденсатор фильтра.

В силу наличия выпрямителя фильтрующей ёмкости на выходе устройства и резонансных контуров в конструкции преобразователя силовая схема для системы управления представляется существенно нелинейной. Это не позволяет получить удовлетворительную модель управления, для которой можно проводить анализ устойчивости. Однако, сделав ряд упрощений и ограничив область рассмотрения модели устройства, её можно всё же линеаризовать.

Частотный диапазон, в котором применима модель, ограничим частотой  $\sim 5$  кГц. Амплитудно-частотные характеристики силового преобразователя и трансформатора [2] показаны на рис. 1, *a*. Характеристика построена так, что имеет единичное усиление и плоскую ФЧХ в полосе 5 кГц в каждую сторону от рабочей частоты. Для частотной характеристики выпрямление аналогично перемножению сигнала и рабочей частоты. Соответ-

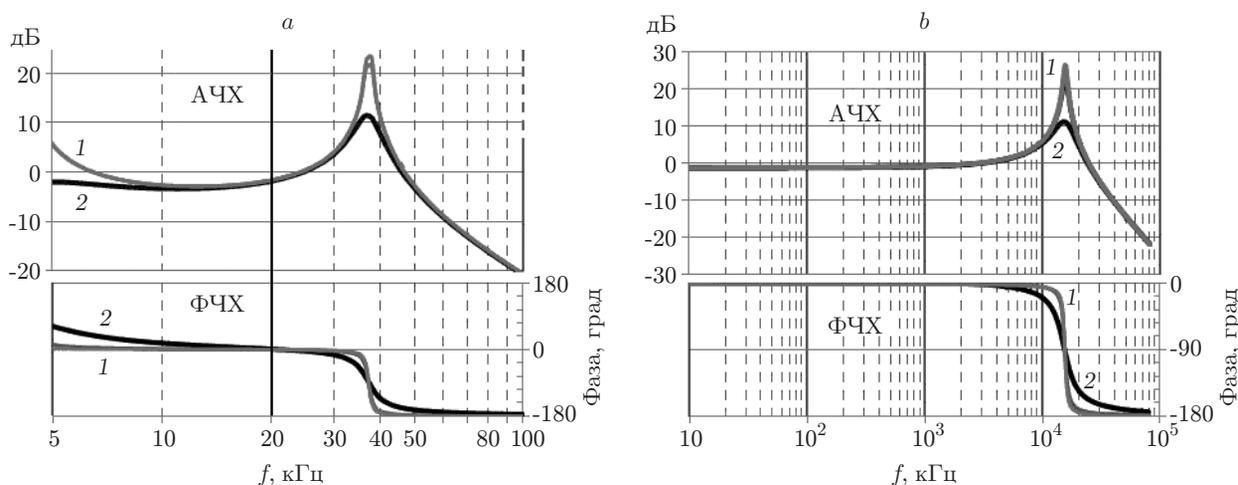


Рис. 1. Частотные характеристики: *a* — силовой части, *b* — всего источника. Обозначения кривых: 1 — нагрузка 1 % от номинальной, 2 — номинальная нагрузка

ственно в итоговом спектре мы будем иметь две части:  $F_{\text{сигн}} = -20$  кГц и  $F_{\text{сигн}} = +20$  кГц. Для рассмотрения системы управления интересна только первая часть. Вид этого спектра приведён на рис. 1, *b*. Из него видно, что в полосе до 5 кГц для системы управления силовой преобразователь с высоковольтным трансформатором можно представить как безынерционный усилитель.

При сделанном выше ограничении выпрямитель с выходной ёмкостью можно линеаризовать. Весь источник представляется в виде управляемого источника положительного тока, заряжающего выходную выпрямительную ёмкость.

Такая модель позволяет рассматривать поведение источника в статических режимах и сохраняет актуальность при изучении поведения модели во времени при увеличении тока нагрузки. Уменьшение нагрузки рассматривать в такой модели нельзя, так как ток источника при моделировании становится отрицательным.

Теперь модель объекта управления можно записать в виде системы уравнений

$$\begin{cases} V_{\text{вых}}(t) = \int_0^t \frac{(I_{\text{вх}}(t') - I_{\text{вых}}(t'))}{C_{\text{выпр}}} dt', & V_{\text{вых}} > 0, \\ I_{\text{вых}}(t) = \frac{V_{\text{вых}}(t)}{R_{\text{нагр}}}, \\ I_{\text{вх}}(t) = SV_{\text{упр}}(t - \tau), & I_{\text{вх}} > 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $V_{\text{вых}}$ ,  $I_{\text{вых}}$  — выходные напряжение и ток;  $R_{\text{нагр}}$  — нагрузка высоковольтного источника;  $I_{\text{вх}}$  — ток, которым представляется весь источник;  $V_{\text{упр}}$  — выходной сигнал регулятора, использующийся для задания ШИМ сигнала на ключи силового преобразователя;  $\tau$  — задержка в один период рабочей частоты, возникающая между установкой сигнала ШИМ и его реальным изменением;  $C_{\text{выпр}}$  — ёмкость выходного выпрямителя.

Задачей управления является стабилизация выходного напряжения источника. Нестабильность выходного напряжения в установившемся режиме не должна превышать 0,1 %. Переходной процесс при изменении нагрузки должен укладываться в 5 % по амплитуде и 5 мс по времени. Основной контур стабилизации выполнен в виде пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора). Модель регулятора, применяемая для вычислений, описывается системой

$$\begin{cases} V_{\text{дел}}(t) = F(K_{\text{дел}}V_{\text{вых}}(t)), \\ V_{\text{ош}}(t) = (V_{\text{уст}} - V_{\text{дел}}(t)), \\ V_{\text{упр}}(t) = K_0V_{\text{ош}}(t) + K_1 \int_0^t V_{\text{ош}} dt + K_2[V_{\text{ош}}(t) - V_{\text{ош}}(t - \Delta T)], \end{cases} \quad (2)$$

где  $V_{\text{дел}}$  — сигнал с высоковольтного делителя, прошедший через фильтрацию, которая для простоты описывается  $RC$ -фильтром с максимальной из существующих постоянной времени;  $F(x)$  —  $RC$ -фильтр с  $\tau \sim 200$  мкс;  $V_{\text{уст}}$  — установка выходного напряжения;  $V_{\text{ош}}$  — сигнал с усилителя ошибки.

Подбор оптимальных коэффициентов, позволяющих получить надлежащее качество регулирования при сохранении устойчивости для всех рабочих режимов, осуществлялся с помощью моделирования системы в программе NL5 [4]. В качестве критерия оптимальности анализировались форма частотной характеристики системы с разомкнутой обратной

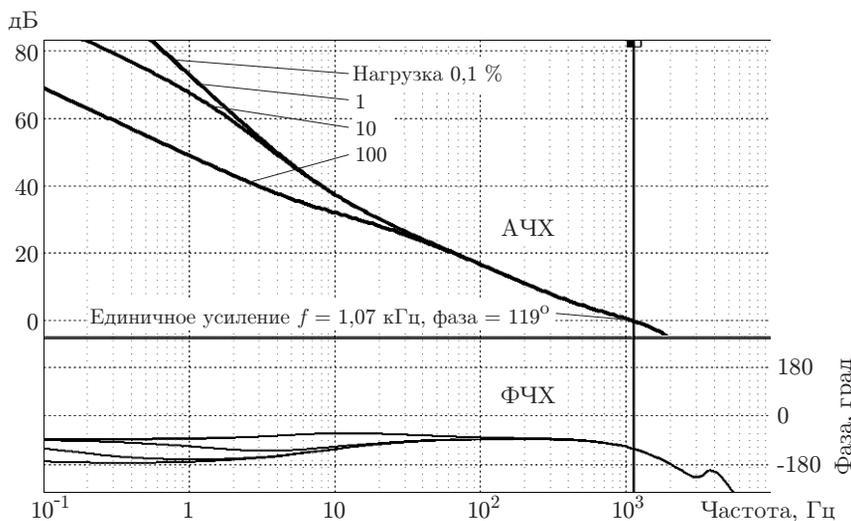


Рис. 2. Частотные характеристики системы с разомкнутым контуром управления в зависимости от нагрузки

связью для получения максимального усиления в диапазоне 0,1 Гц–1 кГц и реакция выходного напряжения на единичную ступеньку в сигнале управления. Необходимо, чтобы для всего диапазона нагрузок переходной процесс был как можно меньше по времени, при этом не имел перерегулирования более 5 % и колебательной составляющей. На основе (1) и (2) в программе была построена модель и исследовались частотные характеристики системы с разомкнутым контуром управления для анализа устойчивости [5] и временные характеристики при изменении нагрузки  $R_{нагр}$  в диапазоне от 100 % (30 кВт) до 0,1 % (30 Вт). Амплитудно- и фазочастотные характеристики полученной системы управления с подобранными коэффициентами показаны на рис. 2.

Из рисунка видно, что использование ПИД-регулятора позволяет решить задачу регулирования выходного напряжения с погрешностью не более 0,1 %. Как следует из АЧХ, для всего диапазона возможной нагрузки коэффициент усиления разомкнутого контура становится выше 60 дБ при частотах ниже 1 Гц, что соответствует ошибке установки выходного напряжения меньше  $10^{-3}$ . Частота единичного усиления системы составляет примерно 1 кГц, причём она не может быть существенно увеличена. Это определяется наличием физических ограничений, связанных с задержкой ШИМ формирователя, вызывающей критическое для устойчивости фазовое запаздывание после частот 3 кГц, и необходимостью фильтрации сигнала выходного напряжения, из-за чего набег фазы начинает нарастать также после частоты 2–3 кГц. Моделирование показывает, что получить достаточное быстродействие системы при модуляции выходного тока таким простым регулятором не получается. При вполне удовлетворительной амплитуде (около 3 %) время переходного процесса в напряжении при изменении выходного тока от 0,1 до 100 % составляет около 50 мс. Есть разные способы решения этой проблемы. Можно идти по пути увеличения порядка звеньев регулятора, чтобы получить большее усиление на частотах 1–100 Гц, что повысит быстродействие. Можно использовать дополнительные контуры регулирования. Было решено идти по второму пути и добавить дополнительный контур регулирования выходного напряжения ( $V_{доп}$ ) по уровню выходного тока:

$$\begin{cases} V_{доп}(t) = F_{адд}(I_{вых}(t), V_{вых}(t)), \\ V_{упр}(t) = V_{упрПИД}(t) + V_{доп}(t). \end{cases} \quad (3)$$

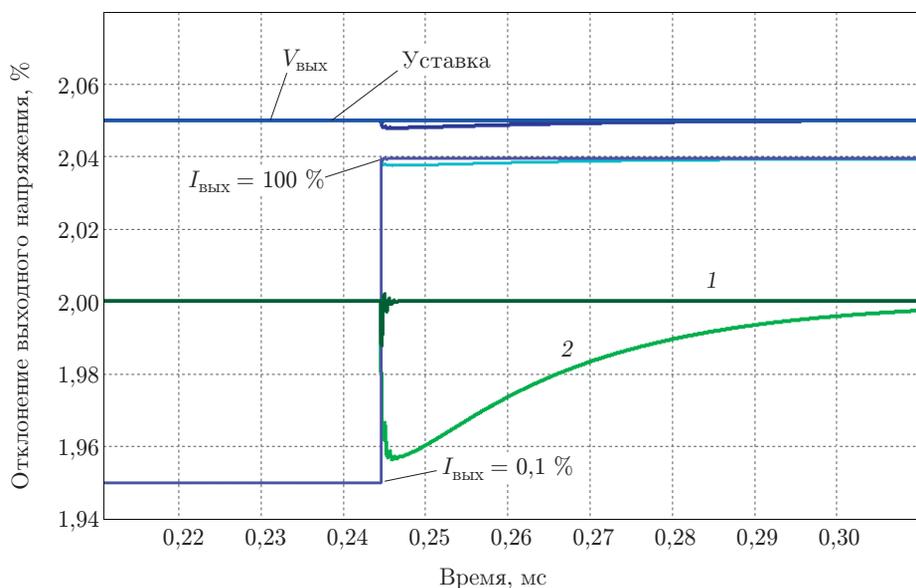


Рис. 3. Моделирование переходного процесса в выходном напряжении при модуляции тока нагрузки с дополнительным регулятором (кривая 1) и без него (кривая 2)

В случае рассматриваемой линейной модели  $F_{\text{адд}}(x)$  является просто умножение тока на коэффициент. В случае реального источника используется нелинейный контур управления по выходному току, для которого снималась реальная характеристика изменения скважности ШИМ сигнала управления в зависимости от выходных тока и напряжения и получалась кусочно-линейная двумерная функция  $F_{\text{адд}}(I_{\text{ВЫХ}}, V_{\text{ВЫХ}})$ . Результаты моделирования реакции на изменение нагрузки от 0,1 до 100 % с дополнительным контуром регулирования и без него показаны на рис. 3. Видно, что введение дополнительного контура существенным образом улучшает ситуацию. Длительность переходного процесса при моделировании становится чуть более 1 мс, а амплитуда — около 1 %.

Результирующая структура системы стабилизации выходного напряжения приведена на рис. 4. Здесь кроме ПИД- и дополнительного регуляторов видна ещё одна обратная

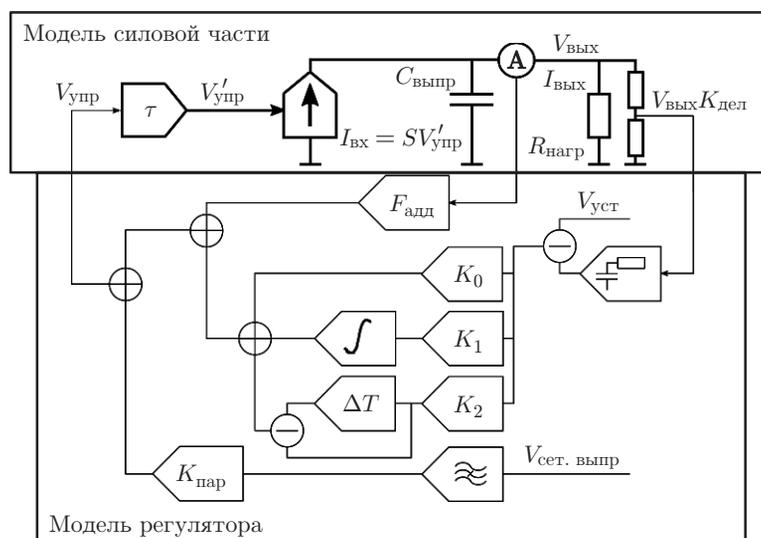


Рис. 4. Модель системы управления ( $K_{\text{пар}}$  — коэффициент усиления параметра контура)

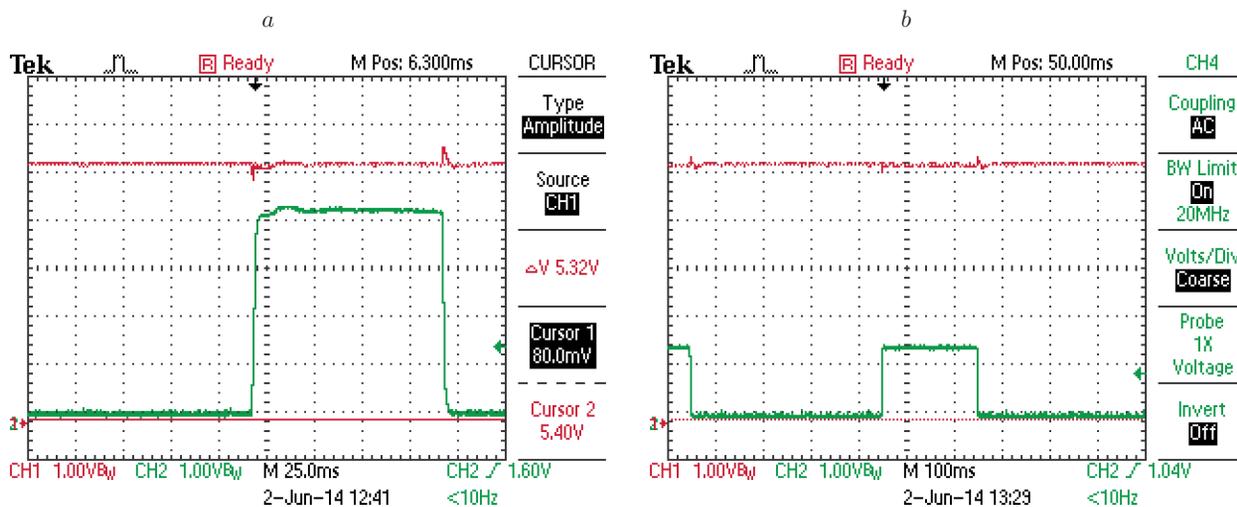


Рис. 5. Осциллограммы с делителя выходного напряжения (верхний луч) и датчика выходного тока (нижний луч) высоковольтного источника. Модуляция тока нагрузки при  $V_{\text{ВЫХ}} = 60$  кВ:

$a$  —  $I_{\text{ВЫХ}} = 0,5\text{--}600$  мА,  $b$  —  $I_{\text{ВЫХ}} = 0,5\text{--}250$  мА

связь, подмешивающая к сигналу управления пульсации напряжения на выходе трёхфазного силового выпрямителя ( $V_{\text{сст. выпр}}$ ). Данное звено обеспечивает гарантированное подавление пульсаций в 300 Гц на выходе источника до уровня заведомо меньше чем 0,1 %. Только выходным фильтром и ПИД-регулятором подавление пульсаций, проявляющихся при большой выходной мощности, осуществляется до уровня  $\sim(0,2\text{--}0,3)$  % при их максимальном уровне на выходе трёхфазного выпрямителя около 10 %.

Результаты реальных испытаний управляемого таким контроллером высоковольтного источника в составе энергоблока электронно-лучевой сварки [6] представлены на рис. 5. Испытания проводились с быстрыми (менее 100 мкс) включением и выключением тока луча. На рис. 5,  $a$  ток поднимается до 600 мА, что составляет 36 кВт выходной мощности, на рис. 5,  $b$  показана модуляция тока от 0,5 до 250 мА (15 кВт выходной мощности). Для максимальной мощности величина переходного процесса не превышает 5 %, для средней — 1 % при длительности его в обоих случаях менее 5 мс.

**Заключение.** Представленные в данной работе архитектура контроллера мощного высоковольтного источника и алгоритмы функционирования узла регулятора выходного напряжения позволяют получить гибкую эффективную систему с высоким качеством стабилизации выходного напряжения и отличными временными характеристиками системы стабилизации. С применением вышеуказанного контроллера была создана серия надёжных высоковольтных источников с выходным напряжением 60 кВ, нестабильностью выходного напряжения менее 0,1 %, выходным током до 250, 500 и 600 мА. С их использованием изготовлено и введено в эксплуатацию семь комплектов оборудования для установок электронно-лучевой сварки, успешно реализованных на производстве и в ИЯФ СО РАН. Кроме этого, на основе модификаций контроллера разработаны высоковольтные источники мощностью 15 кВт с выходным напряжением 120 и 300 кВ, входящие в состав электрофизических установок ИЯФ СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Logachev P. V., Medvedko A. S., Kuper E. A. et al. 60 keV 30 kW electron beam facility for electron beam technology // Proc. EPAC 2008. Genoa, Italy, 2008. P. 1887–1889.

2. **Gusev I. A., Medvedko A. S., Senkov D. V. et al.** High-voltage source with output voltage up to 60 kV with power up to 15 kW // Proc. RuPAC 2006. Novosibirsk, Russia, 2006. P. 301–303.
3. **Gusev I. A., Medvedko A. S., Senkov D. V. et al.** High-voltage source with output voltage up to 60 kV with output current up to 500 mA // Proc. RuPAC 2008. Zvenigorod, Russia, 2008. P. 168–170.
4. **NL5 Circuit Simulator** // Sidelinesoft. URL: <http://nl5.sidelinesoft.com/index.php?page=index&lang=ru> (дата обращения: 4.03.2015).
5. **Зайцев Г. Ф.** Теория автоматического управления и регулирования. Киев: Высш. шк., 1989. 431 с.
6. **Купер Э. А., Логачев П. В., Репков В. В. и др.** Автоматизированная система для задания координат шва в установках электронно-лучевой сварки // Автометрия. 2015. **51**, № 1. С. 55–61.

*Поступила в редакцию 4 марта 2015 г.*

---