

## СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ УСКОРИТЕЛЯ ЛИНАК-200

*А. А. Уланкин<sup>а, б, 1</sup>, В. В. Кобец<sup>а, б, 2</sup>, А. Е. Бруква<sup>а, 3</sup>,  
А. Н. Трифонов<sup>а, 4</sup>, О. Л. Сероштанов<sup>а, б, 5</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>б</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Представлена система стабилизации высоковольтного источника питания электронной пушки ускорителя Линак-200. Высоковольтный источник питания является ключевым компонентом электронной пушки, обеспечивая стабильное напряжение, необходимое для ускорения заряженных частиц. Нестабильность этого источника может приводить к колебаниям пучка электронов и снижению общей эффективности ускорителя. Разработанная система стабилизации направлена на минимизацию неустойчивости напряжения, что позволяет повысить точность и эффективность ускорения частиц в ускорителе.

The paper presents a stabilization system for the high-voltage power supply of the Linac-200 accelerator electron gun. The high-voltage power supply is a key component of the electron gun, providing the stable voltage needed to accelerate charged particles. The instability of this source can lead to fluctuations in the electron beam and a decrease in the overall efficiency of the accelerator. The developed stabilization system is aimed at minimizing voltage instability, which makes it possible to increase the accuracy and efficiency of particle acceleration in the accelerator.

PACS: 29.20.—с

### ВВЕДЕНИЕ

Электронная пушка в составе ускорителя электронов Линак-200 [1] требует надежного и стабильного высоковольтного питания для обеспечения стабильного пучка электронов. Нестабильность напряжения питания может негативно сказаться на качестве работы ускорителя, ухудшая параметры ускоренного пучка. Для устранения этих проблем необходимо использовать систему стабилизации, которая обеспечивает поддержание высокого напряжения с минимальными отклонениями.

---

<sup>1</sup>E-mail: ulankin@jinr.ru

<sup>2</sup>E-mail: vkobets@jinr.ru

<sup>3</sup>E-mail: dubna3@outlook.com

<sup>4</sup>E-mail: trifonov@jinr.ru

<sup>5</sup>E-mail: seroshtanov@jinr.ru

Основная цель разработки данной системы заключается в поддержании напряжения на заданном уровне с высокой точностью. Она должна быть способна реагировать на флуктуации питающего напряжения и нагрузок, обеспечивая минимальные отклонения выходного напряжения.

## ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ

В нашем случае стабилизацию напряжения  $-400$  кВ требуется поддерживать в пределах  $(-400 \pm 1)$  кВ при плавных изменениях напряжения сети. В дальнейшем по результатам работ на ускорителе возможно изменение параметров точности. Таким образом, система стабилизации должна иметь точность не менее  $0,25\%$ , что по сети переменного тока соответствует  $(220 \pm 0,55)$  В на фазе при условии стабильности других фаз. В изготовленном трехфазном стабилизаторе в качестве сигнала обратной связи, кроме  $-4$  В, с высоковольтного делителя используется сигнал обратной связи по напряжению сети  $380$  В. Стабилизатор (рис. 1) работает в двух режимах: стабилизация  $380$  В, стабилизация  $-400$  кВ.

Система стабилизации [2] работает по следующему принципу: напряжение, подаваемое на пушку, измеряется с помощью делителей и датчиков, затем поступает в систему обратной связи. При отклонении напряжения от номинального значения происходит коррекция сигнала с помощью стабилизатора, который управляет автотрансформатором и другими регулируемыми элементами системы. Таким образом, поддерживается постоянное напряжение на уровне  $-400$  кВ с минимальными отклонениями.

## ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ

*1. Трехфазный электромеханический стабилизатор.* Этот стабилизатор используется для поддержания стабильности входного напряжения на уровне  $380$  В. Он управляет подачей напряжения через автотрансформатор, который регулирует величину напряжения на выходе. Основной компонент — вольтдобавочный трансформатор, который добавляет или снижает напряжение в зависимости от величины отклонений от номинала.

Вольтдобавочный трансформатор в системе стабилизации выполняет роль корректирующего звена, компенсируя колебания входного напряжения, тем самым поддерживая постоянное выходное напряжение для источника  $400$  кВ. Вторая ключевая часть системы — автотрансформатор, который определяет величину этой коррективки. Электромеханическая часть отвечает за плавную регулировку напряжения с использованием механических приводов.

*2. Система обратной связи.* В стабилизаторе реализована возможность применения двух вариантов обратной связи: по выходному напряжению высоковольтного источника или по уровню напряжения трехфазной сети  $380$  В. При стабилизации по уровню напряжения высоковольтного источника обратная связь поступает от делителя напряжения, встроенного в электронную пушку, где происходит измерение высоковольтного напряжения.



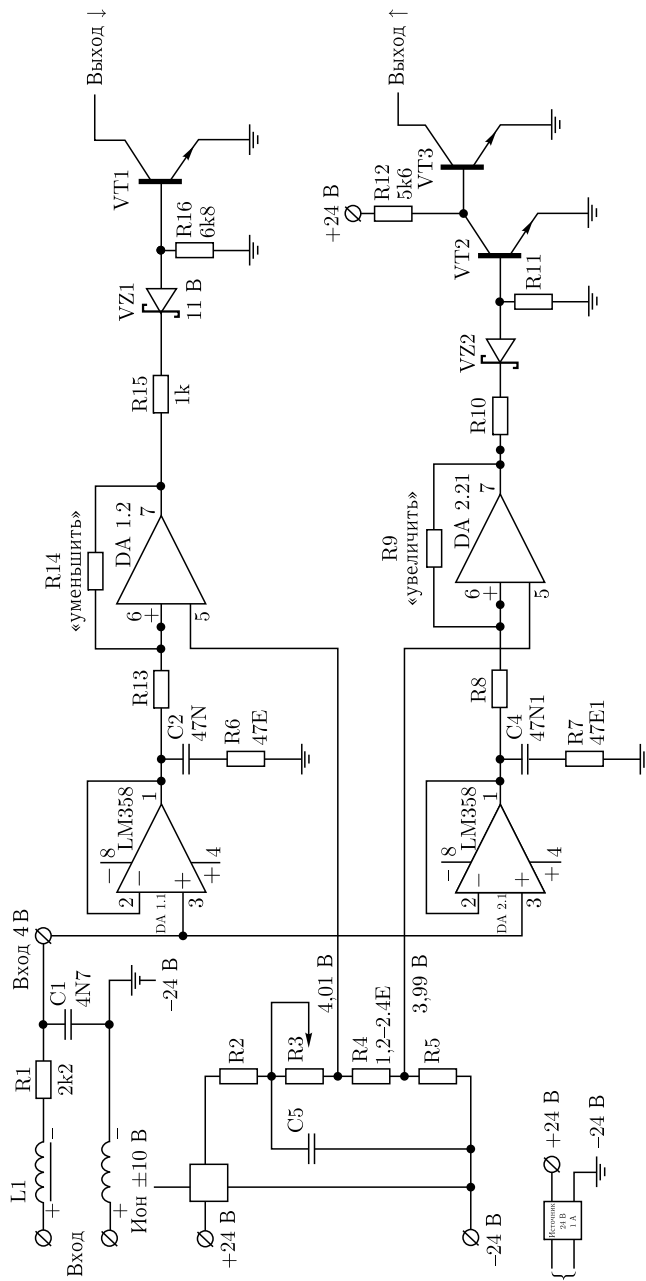


Рис. 2. Функциональная схема блока компараторов

При стабилизации по уровню напряжения трехфазной сети 380 В обратная связь берется с датчика уровня напряжения трехфазной сети. Для повышения точности стабилизации напряжения в системе применяется суммарная (интегральная) характеристика трех фаз. Это позволяет стабилизировать все три фазы одновременно, поддерживая более точную и равномерную стабилизацию высоковольтного источника.

Сигнал обратной связи поступает на блок компараторов (рис. 2), где происходит сравнение с опорным напряжением. Если обнаруживается отклонение, компараторы выдают управляющий сигнал, который передается на автотрансформатор и вольтодобавочный трансформатор, что вызывает корректирующее действие.

**3. Инвертор сигнала.** Для корректного взаимодействия высоковольтного делителя с системой стабилизации применяется инвертор сигнала, который преобразует [3] отрицательный сигнал напряжения (напряжение катода составляет  $-400$  кВ) в положительное значение, соответствующее входу в универсальное задающее устройство. Это необходимо для правильного восприятия системой контролирующих сигналов и корректного регулирования напряжения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе экспериментов были проведены измерения напряжения с использованием осциллографа для оценки стабильности работы стабилизатора. Важным аспектом было измерение отклонений порядка  $1$  кВ от напряжения  $400$  кВ, что соответствовало  $10$  мВ на  $4,00$  В. Для этих измерений необходимо было создать схему, которая обеспечивала:

- согласование импедансов между делителем и измерительной частью;
- устройство для обеспечения возможностей измерения малых отклонений напряжения от заданных параметров.

Для этой цели было собрано устройство, схема которого приведена на рис. 3.

На DA1.1 был установлен повторитель для согласования импедансов между делителем и последующими каскадами. На DA1.2 был выполнен суммирующий усилитель. На первый вход суммирующего усилителя поступало исследуемое напряжение  $-4$  В. На второй вход суммирующего усилителя поступало напряжение от имеющегося регулируемого источника опорного напряжения положительной полярности

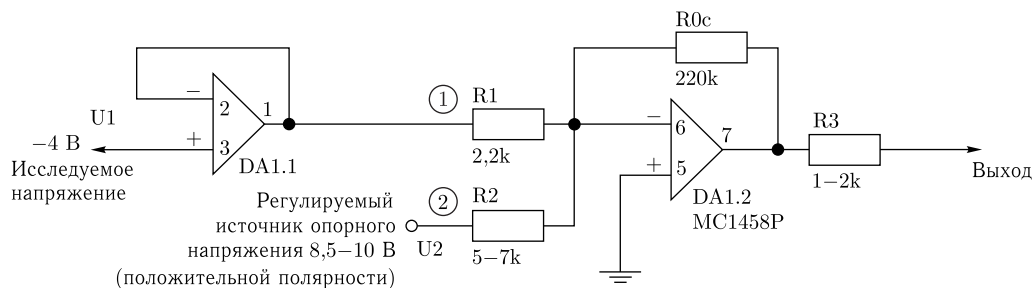


Рис. 3. Функциональная схема измерения напряжения  $400$  кВ

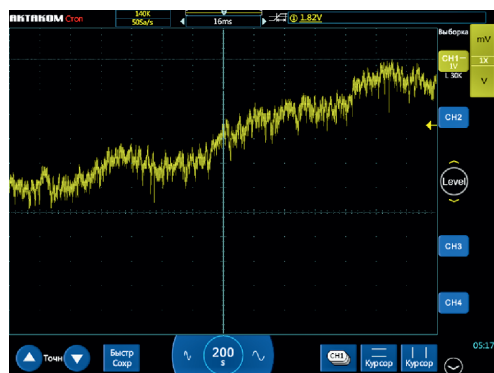


Рис. 4. Осциллограмма изменения напряжения без работы стабилизатора

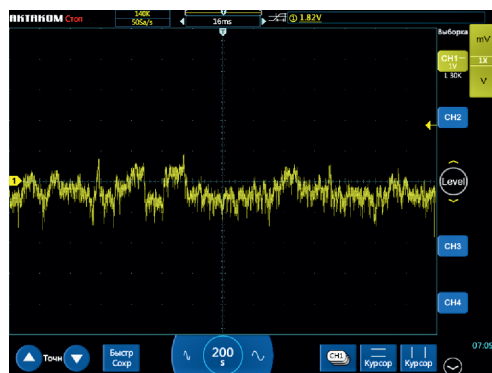


Рис. 5. Осциллограмма изменения напряжения с работающим стабилизатором

в диапазоне 8–10 В. Настройкой этого устройства достигался уровень выходного напряжения, равный нулю при 4 В на входе. Коэффициент усиления по исследуемому напряжению составлял 100, т.е. напряжение 10 мВ соответствовало 1 В (а также отклонению на 1 кВ на пушке). Такие параметры были оптимальны для регистрации с помощью осциллографа.

Исследования показали, что без применения стабилизатора (рис. 4) отклонения напряжения составляли до 4 кВ за время развертки 47 мин, что недопустимо для точной работы системы. Однако с использованием стабилизатора (рис. 5) отклонения сократились до  $\pm 1$  кВ, что соответствует требованиям по точности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена разработка системы стабилизации высоковольтного источника питания для электронной пушки ускорителя Линак-200. Исследование показало, что стабильность высокого напряжения является критически важным фактором для обеспечения точности и надежности работы ускорителя. Разработанная система стабилизации, основанная на трехфазном электромеханическом стабилизаторе с обратной связью, продемонстрировала высокую эффективность в снижении колебаний напряжения.

Основные результаты исследования подтверждают, что использование стабилизатора позволило уменьшить отклонения напряжения с 4 до  $\pm 1$  кВ, что соответствует требованиям к точности системы. Внедрение обратной связи с делителя напряжения и корректирующего действия на основе сигнала инвертора обеспечило плавную и точную регулировку высокого напряжения на уровне 400 кВ.

В дальнейшем планируется оптимизация системы для повышения ее быстродействия и улучшения характеристик устойчивости к внешним воздействиям, таким как колебания питающей сети и температурные изменения. Улучшение системы стабилизации создаст условия для более точного контроля параметров ускоренного пучка и повысит надежность работы ускорительной установки в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kroes F. B.* Improvement of the 400 kV Linac Electron Source of AmPS // EPAC. Berlin, 1992.
2. *Илюкович А. М., Шульман Б. Р.* Стабилизаторы и стабилизированные источники питания переменного тока. М.; Л.: Энергия, 1965. 120 с.
3. *Гельман М. В., Преображенский К. А., Дудкин М. М.* Преобразовательная техника: Учеб. пособие. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.

Получено 28 октября 2024 г.