

ДВУПОЛЯРНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР ГИД-25 ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА К500

© 2012 г. В. В. Ращенко

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

Поступила в редакцию 08.06.2011 г.

Импульсный генератор ГИД-25 с емкостным накопителем энергоемкостью 25 Дж разработан в качестве источника импульсного питания линз и корректоров каналов транспортировки пучков электронов и позитронов от накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 к бустерным накопителям комплексов ВЭПП-4 и ВЭПП-2000. Генератор состоит из накопительной емкости 100 мкФ, зарядного устройства и тиристорного ключа, коммутирующего емкость на нагрузку. Генератор обеспечивает прецизионную зарядку накопительной емкости до 15–700 В любой полярности и коммутацию ее на обмотку магнитного элемента канала. Погрешность зарядки емкости $\leq 0.01\%$ во всем диапазоне рабочих напряжений. Частота повторения импульсов 1 Гц.

НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ

Строящийся в настоящее время в Институте ядерной физики (Новосибирск) электронно-оптический канал К500 предназначен для транспортировки пучков электронов и позитронов от накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 к бустерным накопителям комплексов ВЭПП-4 и ВЭПП-2000. Энергия инжектируемых частиц – 510 МэВ. Канал транспортировки содержит более 80 импульсных магнитных элементов – линз и корректоров. Линзы служат для фокусировки пучка и представляют собой квадрупольные магниты с обмотками индуктивностью ~280 мкГн. Амплитуда рабочего тока в обмотке – до 380 А при номинальной энергии пучка. Корректоры – дипольные магниты, служащие для корректировки траектории пучка на прямолинейных участках с возможностью регулирования тока в широком диапазоне. В канале используются корректоры двух типов с обмотками индуктивностью 35 и 135 мкГн.

Для питания перечисленных выше магнитных элементов требуются относительно маломощные генераторы импульсов на основе емкостного накопителя с энергией ≤ 25 Дж. Каждый генератор должен обеспечивать в обмотке магнита полуволну тока синусоидальной формы длительностью ≥ 500 мкс положительной либо отрицательной полярности в зависимости от типа частиц. Максимум полуволны тока соответствует требуемому магнитному полю в апертуре канала в момент пролета пучка.

Для этих целей разработан описываемый импульсный двуполярный генератор ГИД-25. Генератор состоит из накопительной емкости 100 мкФ, зарядного преобразователя (для прецизионной

зарядки емкости в обе полярности до требуемого напряжения) и тиристорного двунаправленного ключа, коммутирующего емкость в нагрузку. Выбранная величина емкости обеспечивает в линзе требуемую длительность импульса тока. Для формирования импульса нужной длительности и уменьшения амплитуды тока в корректорах последовательно с ними включаются дополнительные индуктивности.

МЕТОДЫ ЗАРЯДКИ И СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Одной из проблем в проектировании прецизионных зарядных устройств является обеспечение требуемой точности зарядки в широком диапазоне рабочих напряжений накопителя. При зарядке емкости фиксированными порциями заряда за единицу времени, т.е. постоянным током (как это реализовано нами в [1]), приращение напряжения ΔU за один квант зарядки является постоянной величиной, не зависящей от уровня напряжения на накопительном конденсаторе:

$$\Delta U_c = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_{\text{зар}} \Delta t}{C},$$

при этом относительная ошибка зарядки линейно уменьшается с ростом напряжения накопителя:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{I_{\text{зар}} \Delta t}{CU}.$$

При расчете такой схемы для известного значения тока зарядки и емкости накопителя выбирается такое значение кванта Δt (частоты преобразования), при котором выполняется зарядка с приемлемой точностью на минимальном рабочем

напряжении. На более высоких напряжениях точность будет гарантированно выше.

Повысить точность можно также методом двухступенчатой зарядки, когда процесс разбивается на грубую зарядку большими порциями и точную подзарядку малыми порциями в режиме удержания. Однако, как показывают простые расчеты, при частоте преобразования в десятки килогерц и частоте повторения импульсов 1 Гц легко обеспечить погрешность $\leq 10^{-4}$ даже при одноступенчатой зарядке.

Метод “токовой” зарядки не очень эффективен с точки зрения отбора мощности. Напряжение на емкости в процессе зарядки имеет линейно нарастающую форму, а потребляемая мощность изменяется от нуля до максимума пропорционально зарядному напряжению. Более эффективным является способ зарядки постоянной мощностью или фиксированными порциями энергии за один такт преобразователя. При этом приращение напряжения ΔU от одного кванта энергии ΔE не является постоянной величиной, а обратно пропорционально напряжению на емкости:

$$\Delta U = \frac{\Delta E}{CU},$$

а относительная ошибка напряжения имеет уже квадратичную зависимость от уровня напряжения на емкости:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta E}{CU^2}.$$

Это означает, что при заданной величине ΔE труднее обеспечить требуемую точность зарядки на малых напряжениях.

В описываемом устройстве применен метод зарядки постоянной мощностью, а высокая точность зарядки на малых напряжениях достигается путем пропорционального регулирования зарядной мощности в зависимости от рабочего напряжения накопительной емкости. По сути, назначение устройства – зарядить емкость до требуемого напряжения за определенный интервал времени (в нашем случае он соответствует периоду повторения импульсов и равен 1 с). Следовательно, на низких напряжениях можно снижать мощность зарядки до тех пор, пока время зарядки укладывается в отведенный интервал. Снижение мощности или уменьшение кванта энергии за такт преобразования позволяет сохранить точность зарядки на малых напряжениях в приемлемом допуске.

ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ЗАРЯДКИ

Зарядное устройство генератора ГИД-25 выполнено по схеме однотактного обратноходового преобразователя (рис. 1).

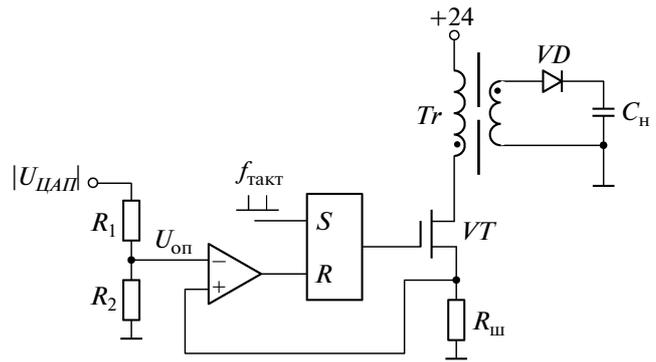


Рис. 1. Схема однотактного обратноходового преобразователя.

Нагрузкой ключевого каскада VT является трансформатор Tr , выполненный на магнитопроводе с немагнитным зазором. Один такт работы преобразователя состоит из активной фазы, когда ключ замкнут, и пассивной, когда ключ разомкнут. Во время активной фазы в зазоре запасается магнитная энергия

$$E_m = \frac{Li^2}{2},$$

где i – мгновенное значение тока в первичной обмотке, L – индуктивность трансформатора со стороны первичной обмотки.

В пассивной фазе ключ размыкается, и запасенная к моменту размыкания энергия через вторичную обмотку трансформатора и диод VD отдается в нагрузку – заряжаемую емкость C_n .

Таким образом, E_m – это и есть квант энергии ΔE (без учета потерь), передаваемый в каждом такте в заряжаемую емкость. В активной фазе ток первичной обмотки имеет линейно нарастающую форму, а момент размыкания ключа определяется ш.и.м.-компаратором, который сравнивает сигнал шунта $R_{ш}$, пропорциональный току, с некоторым опорным напряжением $U_{оп}$. Опорное напряжение компаратора задает максимальную величину тока I_{max} , а значит, и величину кванта энергии за один такт.

Параметром, задающим это опорное напряжение, является напряжение $U_{ЦАП}$, которое также задает и рабочее напряжение накопителя. Делитель R_1/R_2 задает коэффициент, согласующий уровни напряжения цифроаналогового преобразователя $ЦАП$ и сигнала шунта. При таком пропорциональном регулировании тока приращение напряжения ΔU за один такт будет равно

$$\Delta U = \frac{\Delta E}{CU_c} = \frac{LI_{max}^2}{2CU_c} = k \frac{LU_c^2}{2CU_c} = k \frac{LU_c}{2C},$$

т.е. пропорционально напряжению на емкости U_c , а относительная ошибка

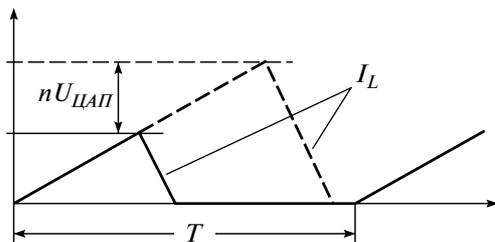


Рис. 2. Пропорциональное регулирование мощности зарядки.

$$\frac{\Delta U}{U} = k \frac{LU_C}{2CU_C} = k \frac{L}{2C} = \text{const}$$

— постоянная величина, не зависящая от напряжения на емкости. Исходя из требуемой точности зарядки при работе на заданную емкость, рассчитываются такие параметры, как частота преобразования и величина кванта энергии ΔE .

Таким образом, регулирование мощности зарядки в описываемом устройстве осуществляется путем ограничения максимального тока индуктивности преобразователя величиной, пропорциональной заданию ЦАП (рис. 2).

В качестве примера оценим величину кванта энергии и приращения напряжения за один такт зарядки при максимальном рабочем напряжении, исходя из реальных параметров генератора. Рабочее напряжение накопителя $U_C = 700$ В, индуктивность первичной обмотки трансформатора $L = 96$ мкГн, максимальный ток обмотки при данном напряжении $I_{\text{max}} = 8.5$ А.

$$\Delta E = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2} = \frac{96 \cdot 10^{-6} \cdot 8.5^2}{2} \approx 3.5 \text{ мДж},$$

$$\Delta U = \frac{\Delta E}{CU_C} = \frac{3.5 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6} \cdot 700} = 50 \text{ мВ},$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{700} \approx 7 \cdot 10^{-5}.$$

Осциллограммы на рис. 3 иллюстрируют пульсации напряжения в режиме стабилизации, а также зависимость уровня пульсаций от напряжения на емкости. Как видно на рис. 3г, реально наблюдаемые пульсации при напряжении 700 В оказываются меньше расчетных вследствие некоторых потерь в процессе преобразования.

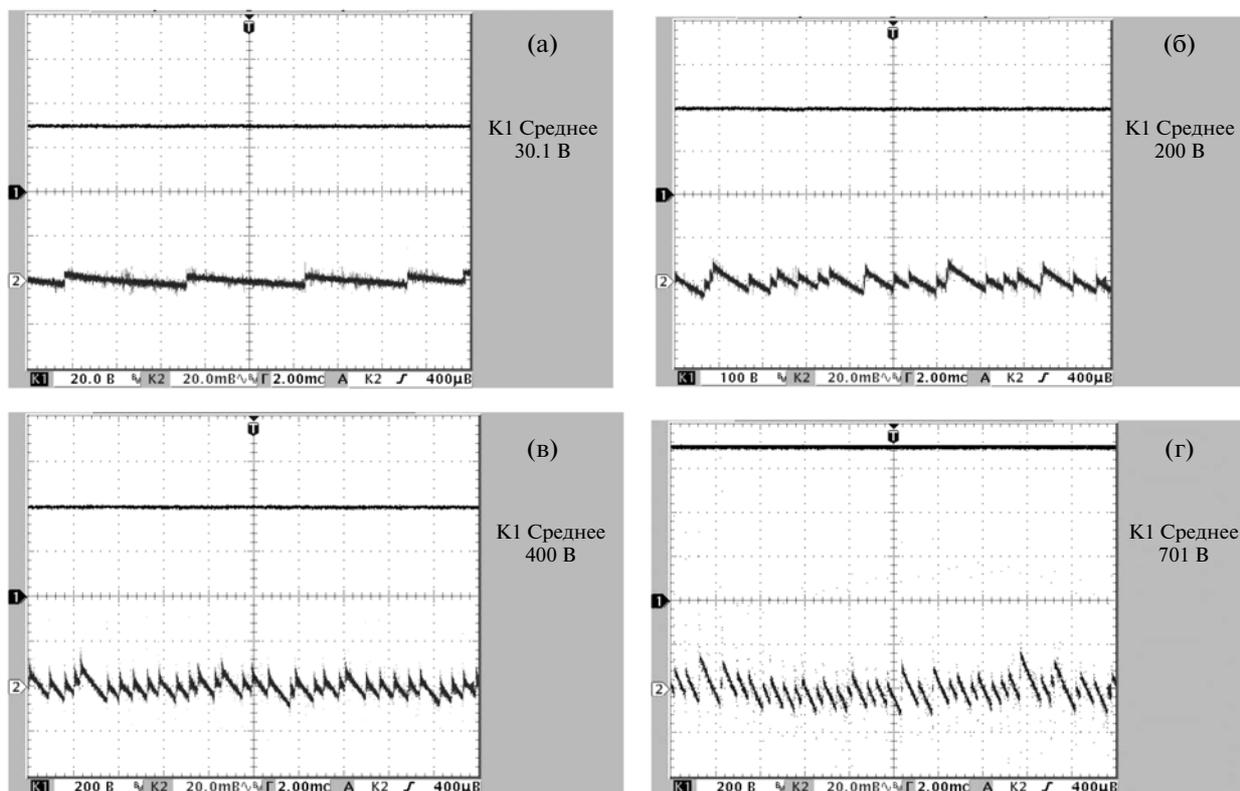


Рис. 3. Пульсации напряжения в режиме стабилизации при разных уровнях напряжения на емкости. Верхний луч K1 — полное напряжение (величина указана на рисунке), нижний луч K2 — переменная составляющая (пульсации) в масштабе 20 мВ/деление.

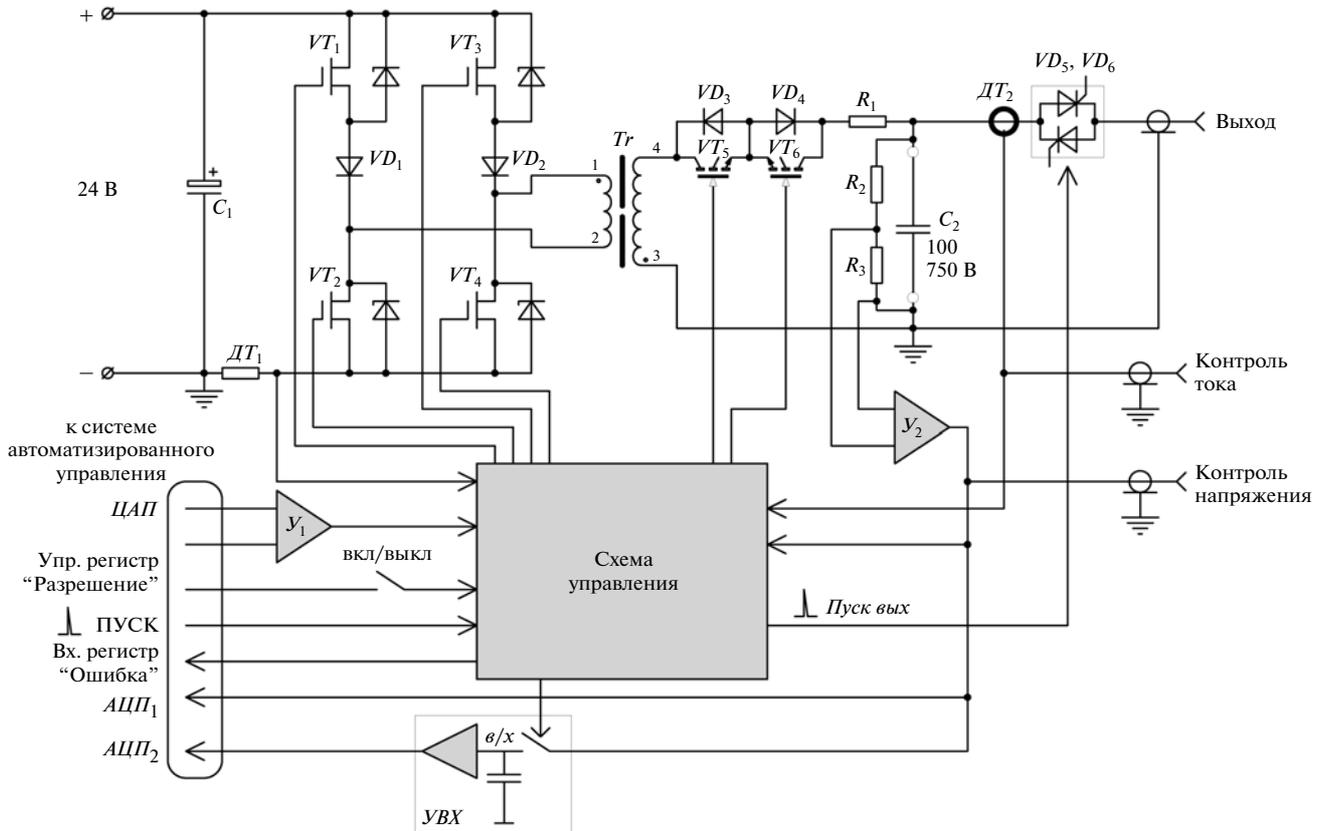


Рис. 4. Принципиальная схема генератора ГИД-25. U_1, U_2 – инструментальные усилители AD620; УВХ – устройство выборки/хранения; DT_1, DT_2 – датчики тока; VT_1-VT_4 – IRFS4229, VT_5, VT_6 – IRG4BH20K; VD_1, VD_2 – MBR40250, VD_3, VD_4 – DSE112-12A, VD_5, VD_6 – SK120KQ16; C_1 – 2×3300 мкФ, 35 В; Tr – трансформатор на ферритовом магнитопроводе RM14 марки N41 (Ercos) с зазором 1 мм (w_1 – 20 витков проводом ПЭВ2 0.7мм, w_2 – 100 витков проводом МГТФ-0.07).

УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАТОРА

На рис. 4 приведена упрощенная принципиальная схема двуполярного импульсного генератора ГИД-25.

Генератор рассчитан на работу от автоматизированной системы управления и имеет следующие входы/выходы управления:

- аналоговый дифференциальный вход для задания напряжения от ЦАП;
- двоичный вход “Разрешение” от управляющего регистра;
- двоичный выход “Ошибка”, сигнал ошибки вырабатывается в аварийных ситуациях для дистанционной диагностики;
- вход импульса запуска тиристора “Пуск”;
- аналоговый выход мгновенного значения напряжения накопителя;
- аналоговый выход напряжения накопителя с устройства выборки/хранения для измерения с помощью интегрирующего АЦП.

Генератор питается от источника постоянного напряжения 24 В. Все необходимые питающие

напряжения формируются внутри блока с помощью дополнительных преобразователей. Зарядка накопительной емкости осуществляется по схеме однотактного обратного преобразователя (описанного в предыдущем разделе) через повышающий трансформатор Tr . Рабочая частота преобразователя – 33 кГц.

Полярность выходного напряжения задается работой соответствующей группы транзисторных ключей – VT_1, VT_4, VT_6 либо VT_2, VT_3, VT_5 . Так, например, для зарядки емкости в положительную полярность транзисторы VT_1, VT_4, VT_6 заперты и в работе не участвуют. Ключ VT_3 находится в замкнутом состоянии, подключая верхний по схеме вывод первичной обмотки трансформатора Tr к положительной шине источника питания. Ключ VT_2 работает в ш.и.м.-режиме на частоте 33 кГц, обеспечивая работу преобразователя. Замкнутый ключ VT_5 шунтирует диод VD_3 реверсивного выпрямителя, давая возможность емкости C_2 заряжаться в положительную полярность через диод VD_4 . Небольшой балластный резистор R_1 подав-

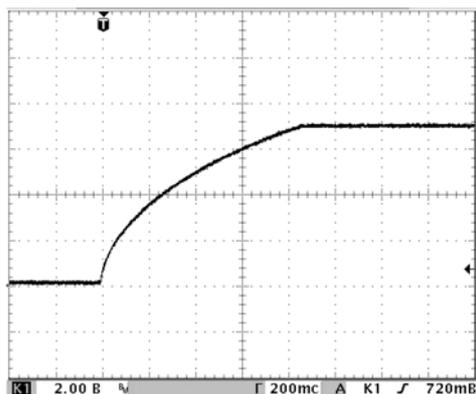


Рис. 5. Напряжение на накопительной емкости в процессе зарядки от 0 до 700 В. (2 В/деление, делитель 1 : 100).

ляет паразитные колебания, а также позволяет повысить точность зарядки ценой некоторого снижения к.п.д. Зарядка происходит фиксированными порциями энергии, которые контролируются датчиком тока DT_1 . Кривая зарядного напряжения на емкости C_2 приведена на рис. 5.

Вид кривой, полученной экспериментально, согласуется с аналитическим выражением для $U_C(t)$:

$$U_C(t) = \left(\frac{2\Delta E t}{C\Delta t} \right)^{1/2},$$

где Δt – период (квант) работы преобразователя.

В качестве коммутирующего двунаправленного ключа VD_5 , VD_6 в устройстве применен тиристорный модуль SK120KQ16 фирмы Semikron. Он состоит из двух тиристоров, включенных встречно-параллельно. По внешнему сигналу запуска в схеме управления формируется задержка 500 мкс, необходимая для “захвата” напряжения на емкости перед выстрелом устройством выборки-хранения $УВХ$ для последующего измерения “медленным” $АЦП$. Затем происходит запуск тиристоров и формирование на индуктивной нагрузке полуволны тока. В зависимости от добротности контура часть энергии возвращается в емкость, заряжая ее в противоположную полярность. Если уровень остаточного напряжения превышает 15 В, в схеме автоматически формируется повторный импульс запуска тиристоров, возвращающий заряд накопителя через нагрузку в исходную полярность. Процессы формирования импульсов проиллюстрированы на рис. 6.

В таблице приведены основные параметры генератора.

Параметр	Значение	Примечание
Емкость накопителя	100 мкФ	К75-40б 750 В 100 мкФ
Диапазон рабочих напряжений накопителя	15–700 В	Положительной и отрицательной полярности
Максимальная энергоемкость накопителя	25 Дж	
Частота повторения импульсов	1 Гц	
Пульсации напряжения накопителя в режиме стабилизации, $\Delta U/U$	$<7 \cdot 10^{-5}$	Во всем диапазоне рабочих напряжений
Общая нестабильность напряжения накопителя, $\Delta U/U$	$<1 \cdot 10^{-4}$	
Задание зарядного напряжения	Внешний источник напряжения –7...+7 В	ЦАП блока СЕАС124
Сигнал запуска	Положительный импульс амплитудой 5–15 В, длительностью ≥ 300 нс	От блока СGV18
Напряжение питания	24 В	Постоянное
Потребляемый ток	2 А	В режиме зарядки
Общий к.п.д.	~50%	При максимальной мощности

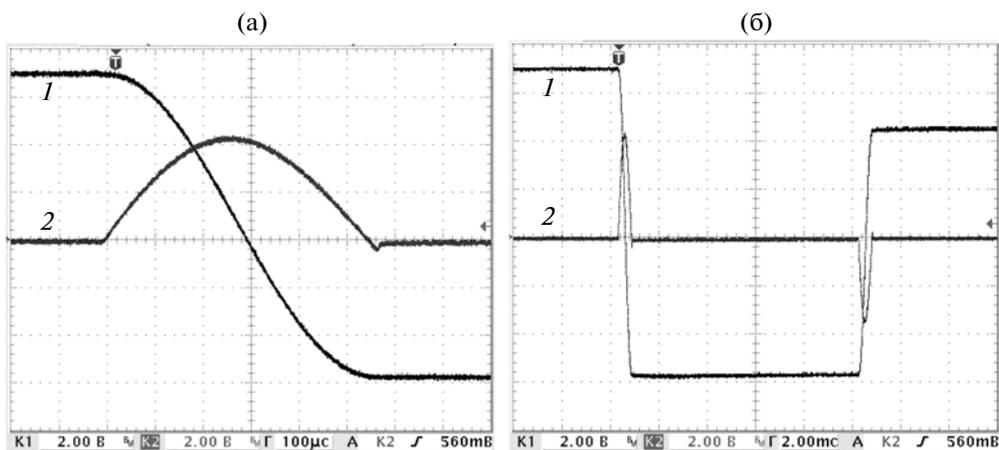


Рис. 6. Формирование выходного импульса (а) и процесс рекуперации (б). 1 – напряжение накопителя (2 В/деление, делитель 1 : 100); 2 – ток нагрузки (2 В/деление, датчик тока 1 В/100 А).

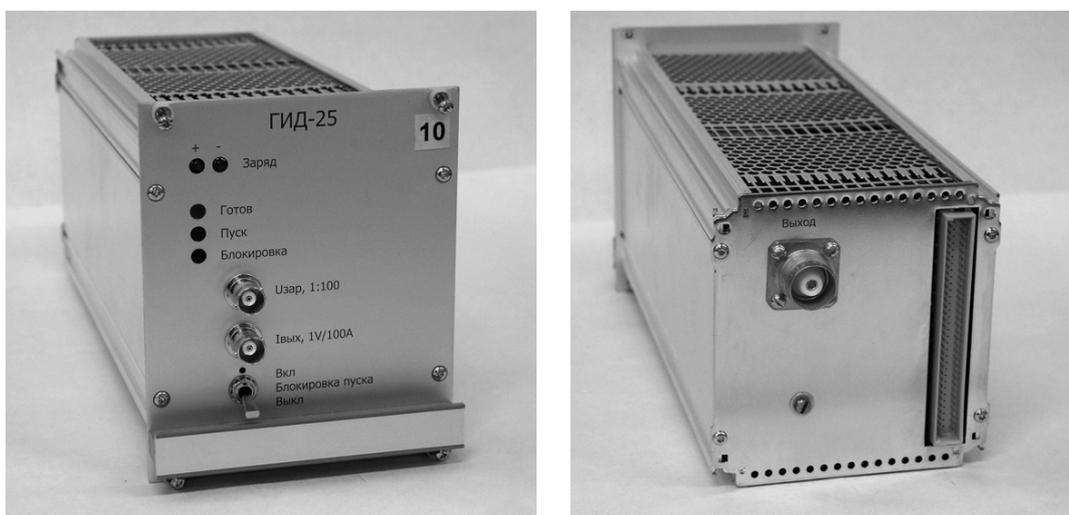


Рис. 7. Внешний вид блока.

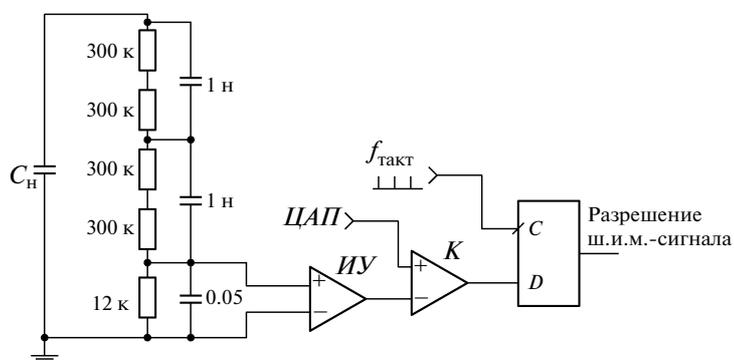


Рис. 8. Измерение и обработка сигнала напряжения накопителя.

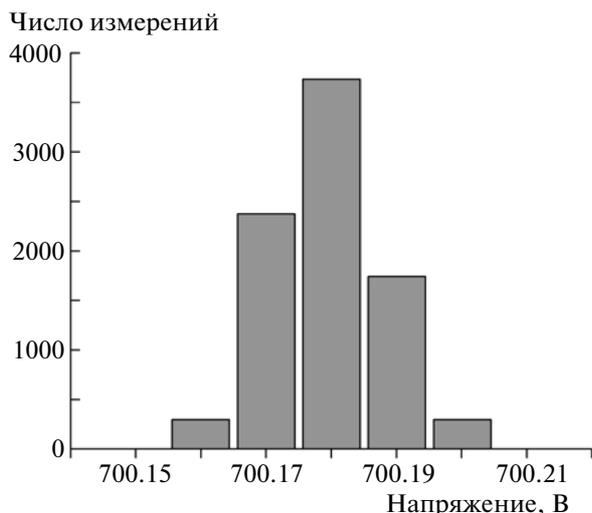


Рис. 9. Гистограмма измерений напряжения на емкости.

Генератор выполнен в виде вставного закрытого блока стандарта Евромеханика высотой 3U (128 мм), шириной 21HP (106 мм) и глубиной 230 мм. Блок спроектирован для работы в составе 8-канальной стойки с управлением от блоков SEAC124 [2] и CGVI8 [3]. Внешний вид устройства показан на рис. 7. На передней панели расположены индикаторы уровня напряжения на накопительном конденсаторе положительного или отрицательного знака, светодиодные индикаторы состояния, контрольные разъемы напряжения накопителя (1 : 100) и тока нагрузки (1 В/100 А), а также тумблер принудительной блокировки.

На задней панели расположены разъем питания и внешнего управления DIN64 и разъем CP50-165 для подключения нагрузки через коаксиальный кабель.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ СТАБИЛИЗАЦИИ

Точность и стабильность напряжения зависят не только от энергетических параметров устройства, но также от методики измерения и регулирования этого напряжения. Как правило, для измерения напряжения на заряжаемой емкости применяется высокоомный делитель (R_2/R_3 на рис. 4). Такой делитель имеет достаточно высокое выходное сопротивление и чувствителен к электрическим помехам, присутствующим в схеме при работе в ч.-преобразователя. Проблема в значительной мере решается использованием компенсированного RC-делителя (рис. 8). В устройстве применен делитель 1 : 100 с постоянной времени $\tau = 0.6$ мс. Если к точности и стабильности резисторов делителя предъявляются жесткие требования, так как это главное звено, задающее об-

щую точность устройства, к емкостному делителю таких жестких требований нет, так как он компенсирует лишь переменную составляющую напряжения. В генераторе ГИД-25 использованы резисторы MFR06 (Uniohm) с допуском 0.1% и температурным коэффициентом 15 ppm/°C указанных на схеме рис. 8 номиналов. В емкостной части делителя применены керамические SMD-конденсаторы с диэлектриком X7R.

Другой важный элемент – масштабирующий буферный усилитель. Несмотря на “заземленную” емкость накопителя, в устройстве используется инструментальный усилитель с дифференциальным входом AD620, чтобы исключить влияние синфазной помехи от “земляных” токов.

В устройстве применено “релейное” регулирование напряжения, т.е. по сигналу компаратора K формируется сигнал разрешения или запрета прохождения ш.и.м.-импульса управления силовым ключом. В целях повышения помехоустойчивости сигнал компаратора стробируется импульсами тактового генератора в моменты времени, когда силовые ключи находятся в статическом состоянии. Схема регулирования работает устойчиво, если время релаксации сигнала ошибки на выходе компаратора K меньше периода повторения импульсов тактового генератора. В режиме удержания устойчиво работающая схема подзаряжает емкость одиночными “квантами”, компенсируя ток утечки.

Еще одна серьезная проблема, возникающая при проектировании прецизионных источников питания, – борьба с помехой на частоте питающей сети. Если прибор питается непосредственно от сети 50 Гц, приходится принимать ряд специальных мер, чтобы устранить влияние сетевой наводки на выходное напряжение. Сетевой “фон” проникает как по силовым цепям, так и в виде наводок на цепи обратной связи. В этом смысле описываемый прибор имеет преимущество, так как питающее его постоянное напряжение от промежуточного преобразователя уже в значительной степени избавлено от сетевых пульсаций. Как видно на осциллограммах (рис. 3), величина сетевого фона, проникшего в измеряемый сигнал тем или иным путем, ничтожно мала по сравнению с уровнем пульсаций на частоте преобразования.

Приведенный выше комплекс мер позволил добиться в описываемом устройстве высокой точности и долговременной стабильности напряжения накопительной емкости. На рис. 9 приведена гистограмма ~8500 измерений напряжения на емкости в режиме работы на линзу с частотой 1 Гц. Данные записывались раз в секунду с помощью УВХ и SEAC124 в течение двух часов непрерывной работы прибора.

ОБЩИЙ ВИД СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ

Система импульсного питания К500 выполнена в виде 8-канальных шкафов конструктива Евромеханика. В одном шкафу размещается 8 генераторов ГИД-25, блоки автоматизированного управления и два 4-канальных блока измерительных поясов. Все восемь генераторов питаются от общего преобразователя напряжения на 24 В/600 Вт, расположенного в шкафу. Блоки автоматизации имеют собственные маломощные источники питания, расположенные в верхнем этаже. Они разбиты на две идентичные группы, каждая из которых обслуживает четыре генератора. Блоки поясов содержат бесконтактные датчики тока и совместно с блоками VSDC2 [4] осуществляют прецизионные измерения тока нагрузки.

Автор выражает благодарность Юдину Валерию Дмитриевичу за помощь в разработке и изготовлении узлов системы импульсного питания К500.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришанов Б.И., Кондауров М.Н., Ращенко В.В. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2. № 3(126). С. 86.
2. <http://www.inp.nsk.su/%7Ekozak/designs/ceac124r.pdf> (Козак В.П. Описание блока СЕАС124).
3. <http://www.inp.nsk.su/%7Ekozak/designs/cgvi8r.pdf> (Козак В.П. Описание блока СГVI8).
4. <http://www.inp.nsk.su/activity/automation/device/devicenew/canbus/vsdc2.pdf> (Батраков А.М. Описание блока VSDC2).