

УДК 621.311.69

© А. Н. Арсеньев, А. Г. Монаков, Н. В. Краснов, М. Н. Краснов

РЕГУЛИРУЕМЫЕ ДВУХПОЛЯРНЫЕ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Разработана линейка высокостабильных регулируемых двухполярных базовых источников питания двух серий — низковольтной: ± 10 , ± 100 , ± 300 , ± 600 В, и высоковольтной: ± 1000 , ± 1500 , ± 3000 , ± 5000 В. Необходимые параметры блоков питания определяются, исходя из современных требований, предъявляемых к источникам питания, входящих в состав различных аналитических приборов и комплексов. К таким параметрам можно отнести двухполярность, высокую стабильность не хуже $5 \cdot 10^{-6}$, изолированный электрический выход, отсутствие механических регулировок — управление от персонального компьютера, калибровка блоков не чаще 2 раз в месяц. Для управления блоками питания разработаны коммутационные устройства на 24 и 48 каналов для систем питания, а для одиночного блока питания — блок интерфейсный одноканальный. В комплекте с коммутационными устройствами программное обеспечение реализует установку необходимого рабочего напряжения независимо для каждого блока питания, отображение заданного и измеренного напряжения в блоке питания, одновременное включение необходимых блоков питания, калибровку и подстройку блоков.

Кл. сл.: высокостабильный регулируемый двухполярный источник питания, низковольтный источник питания, высоковольтный источник питания, коммутационное устройство

ВВЕДЕНИЕ

При всем многообразии выпускаемых в России источников питания для аналитического приборостроения серийно выпускаемых отечественных источников с высокими эксплуатационными характеристиками на рынке нет, но присутствуют несколько зарубежных производителей регулируемых одно- и двухполярных малошумящих прецизионных источников питания — Ultravolt [1], Matsusada [2], Spellman [3], Applied Kilovolts [4], Stahl-electronics Germany [5], Iseg Spezialelektronik GmbH Germany [6], TPS Limited UK [7], Wiener GmbH Germany [8].

Регулируемые двухполярные малошумящие прецизионные источники питания применяются во многих областях науки и техники, в частности в аналитических приборах и их составных частях; это — электронные и ионные пушки, электростатические линзы, электронно-оптические системы, а также экспериментальные и промышленные электрофизические установки.

Примером повышения требований к характеристикам источников питания может служить электронная спектроскопия, позволяющая проводить исследования и анализ при решении задач физики твердого тела, химии полупроводников, биотехнологии, металлургии для определения химического состава, атомной, электронной структуры тончайших пленок с пространственным разрешением не-

сколько межатомных расстояний. Успех тонких исследований базируется на использовании совершенной аппаратуры. Во всех случаях на результат исследований влияют аналитические свойства анализатора, которые позволяют записывать энергетические спектры вышедших электронов с той или иной степенью разрешающей способности. 15–20 лет назад хорошим разрешением считалось 100 мэВ [9, 10], 5 лет назад в связи с прогрессом расчета анализаторов и улучшением электрических параметров систем питания хорошее разрешение — 10 мэВ [11–13]. Дальнейшее развитие теории расчета электронно-оптических систем и создание высокостабильных источников питания позволяют ставить задачу о получении разрешения 1 мэВ. Для решения этой задачи с точки зрения источников питания необходимы долговременная стабильность и шумовая дорожка источника питания менее $5 \cdot 10^{-6}$ как для низковольтных, так и высоковольтных напряжений, прикладываемых к электродам электронно-оптической системы анализатора. Решение задачи создания более современного анализатора позволит получить более тонкую структуру спектра электронов, характеризующих исследуемый объект, что в свою очередь даст об объекте новые знания. Кроме анализатора при использовании потока сфокусированных первичных электронов в качестве зонда необходим электронный пучок, хорошо сфокусированный в пространстве (пятно

электронного пучка на исследуемом объекте несколько микрон и максимальная моноэнергетичность электронов). Эти требования также приводят к использованию высокостабильных источников напряжения, аналогичных по свойствам источникам для анализатора. Сложность электронно-оптических систем формирования электронного пучка и анализатора требует использования высокостабильных независимых управляемых источников напряжения в широком диапазоне номиналов.

Развитие техники высокоэффективных источников формирования интенсивных корпускулярных пучков, в том числе и электронных, и исследование проблем взаимодействия концентрированных потоков энергии с конденсированным веществом предъявляют повышенные требования к электронным системам питания физических установок, на которых используются методы эпитаксиальных нанотехнологий.

Требования, предъявляемые к электропитанию для аналитического приборостроения столь же различны, как и номенклатура самих приборов, которые только по напряжению занимают диапазон от 3 до 30 000 В [14]. Пульсации напряжения, долговременная и краткосрочная стабильность,

повторяемость и погрешность — таков перечень наиболее важных факторов, определяющих степень надежности полученной аналитической информации. Кроме того, поскольку аналитические приборы внедряются в сферу управления производственных технологических процессов, очень важен такой показатель источников питания, как их надежность.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА БАЗОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Рассматриваемые источники питания реализованы с использованием базовой блок-схемы, представленной на рис. 1, для всех источников питания, но с учетом конструктивных особенностей для высоковольтных блоков. Двухполярный малошумящий источник питания содержит фильтр-стабилизатор питания устройства 1, осуществляющий предварительную стабилизацию питающего напряжения $U_{пит}$, нестабильность которого влияет на выходное напряжение блока $U_{вых}$. Стабилизированное и отфильтрованное от пульсаций и шумов напряжение, выходящее из фильтра-стабилизатора 1 поступает в гальванически развязанный преобразователь питающего напряжения 2,

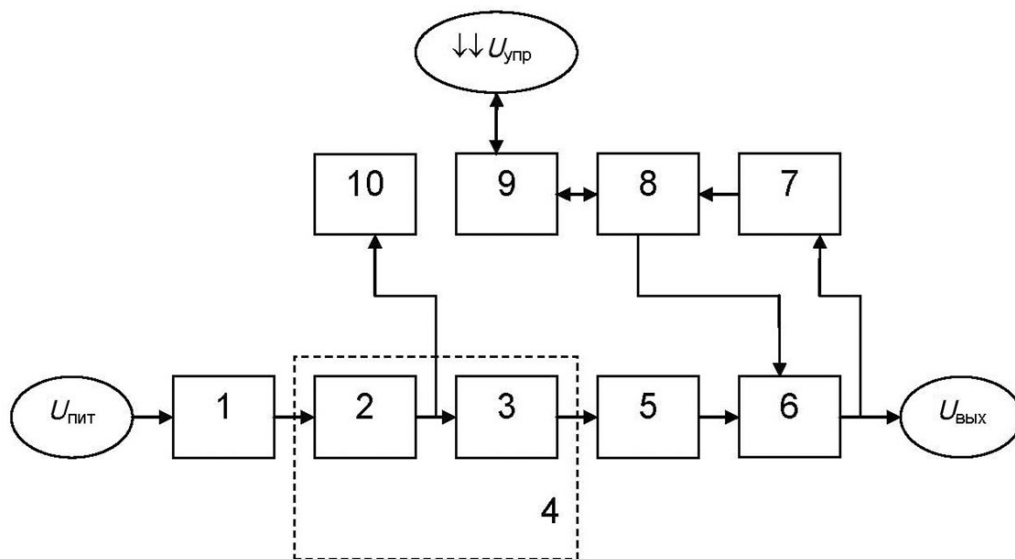


Рис. 1. Базовая блок-схема двухполярных малошумящих источников питания.

1 — фильтр-стабилизатор, 2 — преобразователь питающего напряжения, 3 — малошумящий преобразователь напряжения, 4 — экранирующий корпус, 5 — фильтр, 6 — линейный регулятор с оптронной развязкой, 7 — канал обратной связи, 8 — устройство управления выходным напряжением, 9 — канал приема-передачи данных, 10 — термостат

осуществляющий гальваническую изоляцию узлов 3–10 и питание узлов 3, 8–10 от фильтра-стабилизатора 1. Питающее напряжение от гальванически развязанного преобразователя 2 поступает в малошумящий преобразователь напряжения 3, в котором вырабатываются положительное и отрицательное постоянные напряжения, одинаковые по абсолютной величине и равные максимальному значению выходного напряжения $U_{\text{вых}}$. Металлический экран предотвращает влияние электромагнитных полей, генерируемых гальванически развязанным преобразователем питающего напряжения 2 и малошумящим преобразователем напряжения 3. Положительное и отрицательное постоянные напряжения поступают на вход фильтра 5, в котором происходит уменьшение уровня шумов и пульсаций. Отфильтрованные напряжения поступают в линейный регулятор с оптронной развязкой 6, где происходит линейная регулировка $U_{\text{вых}}$ пропорционально сигналу рассогласования, поступающему от устройства управления выходным напряжением 8. Напряжение $U_{\text{вых}}$ поступает на выходной разъем устройства и на вход канала обратной связи 7, выходной сигнал которого пропорционален $U_{\text{вых}}$ и поступает в устройство управления выходным напряжением, где сравнивается с управляющим сигналом, поступающим из оптического канала приемо-передачи данных 9. Полученный сигнал рассогласования поступает в линейный регулятор с оптронной развязкой 6. Кроме того, из устройства управления выходным напряжением 8 через оптический канал приемо-передачи данных 9 с исполь-

зованием оптической связи $\downarrow\downarrow U_{\text{упр}}$ передается сигнал, соответствующий $U_{\text{вых}}$ для контроля внешним устройством.

Предложенные технические решения позволяют повысить стабильность выходного напряжения блока питания ($U_{\text{вых}}$) при использовании термостабилизации блока, устранении влияния импульсных преобразователей на линейный регулятор напряжения и устранении воздействия внешних помех на управляющий сигнал. Кроме того, использование гальванической развязки между выходным и питающим напряжениями, использование оптического канала управления и контроля от внешнего устройства и линейный регулятор с оптронной развязкой существенно расширяют функциональные возможности блоков питания — последовательное соединение блоков, обеспечивающих работоспособность физических узлов.

Использование базовой схемы позволяет создать линейку блоков питания с различными диапазонами регулировок выходных напряжений, что может наиболее полно удовлетворить требованиям систем питания аналитических приборов. Кроме того, наиболее стабильные параметры блоки питания имеют в средней части диапазона регулировки. Исходя из этого испытаниям подверглись два образца блоков питания, отличающиеся между собой диапазоном регулировок, хотя при необходимости блок питания с большим диапазоном регулировки может заменить блок питания с меньшим диапазоном. В табл. 1 представлены параметры линейки образцов блоков питания.

Табл. 1. Основные параметры блоков питания (х — штатное исполнение, о — опция)

Наименование	Низковольтный	Высоковольтный	Двухполярный	Положительная полярность	Отрицательная полярность	Евромеханика 3U12НР-220 мм	Евромеханика 3U14НР-220 мм	Стабильность	Ток нагрузки, мА	Потребляемая мощность, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
НВБП-10-1 (5 В)	х	—	х	о	о	х	—	$5 \cdot 10^{-6}$	5	< 20
НВБП-10-2 (10 В)	х	—	х	о	о	х	—	$5 \cdot 10^{-6}$	5	< 20
НВБП-10-3 (15 В)	х	—	х	о	о	х	—	$5 \cdot 10^{-6}$	5	< 20
НВБП-100-1 (75 В)	х	—	х	о	о	х	—	$< 10^{-5}$	30	< 20
НВБП-100-2 (100 В)	х	—	х	о	о	х	—	$< 10^{-5}$	30	< 20
НВБП-100-3 (125 В)	х	—	х	о	о	х	—	$< 10^{-5}$	30	< 20

Табл. 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
НВБП-300-1 (250 В)	x	—	x	o	o	x	—	$<10^{-5}$	10	< 20
НВБП-300-2 (300 В)	x	—	x	o	o	x	—	$<10^{-5}$	10	< 20
НВБП-300-3 (350 В)	x	—	x	o	o	x	—	$<10^{-5}$	10	< 20
НВБП-600-1 (500 В)	x	—	x	o	o	x	—	$<10^{-5}$	5	< 20
НВБП-600-2 (600 В)	x	—	x	o	o	x	—	$<10^{-5}$	5	< 20
НВБП-600-3 (700 В)	x	—	x	o	o	x	—	$<10^{-5}$	5	< 20
ВВБП-1000-1 (800 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	3	< 20
ВВБП-1000-2 (1000 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	3	< 20
ВВБП-1000-3 (1200 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	3	< 20
ВВБП-1500-1 (1300 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	2	< 20
ВВБП-1500-2 (1500 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	2	< 20
ВВБП-1500-3 (1700 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	2	< 20
ВВБП-3000-1 (2500 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	1	< 20
ВВБП-3000-2 (3000 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	1	< 20
ВВБП-3000-3 (3500 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	1	< 20
ВВБП-5000-1 (4000 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	0.6	< 20
ВВБП-5000- (5000 В)	—	x	x	o	o	—	x	$<10^{-5}$	0.6	< 20

На рис. 2 представлена осциллограмма дрейфа выходного напряжения $U_{\text{вых}} = 604 \text{ В}$ в течение часа после прогрева образца блока питания, шкала напряжений по ординате — 2 мВ/деление, измерения проводились с использованием цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024, что соответствует дрейфу напряжений не более 5 ppm/ч. На рис. 3 представлена осциллограмма шумовой дорожки на уровне 604 В при временном разрешении 10 мс/деление по оси абсцисс и шкале по оси ординат — 2 мВ/деление, что соответствует размаху пульсаций не более 0.0005 %. Измерения проводились для образца блока питания НВБП-600-3 (700 В) (см. табл. 1).

На рис. 4 приведена зависимость выхода рабочего напряжения на режим при прогреве образца блока питания в течение 3 ч (а) и осциллограмма шумовой дорожки после выхода на режим на уровне 500 В в течение 2 ч после прогрева (б), размах пульсаций не более 0.0004 %. Измерения проводились для образца блока питания НВБП-600-2 (600 В) (см. табл. 1). Измерения проводились с использованием вольтметра Agilent 34401A. Во всех случаях измерений температура окружающего воздуха составляла $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Измерения проводились в средней части диапазона регулировок вырабатываемых напряжений.

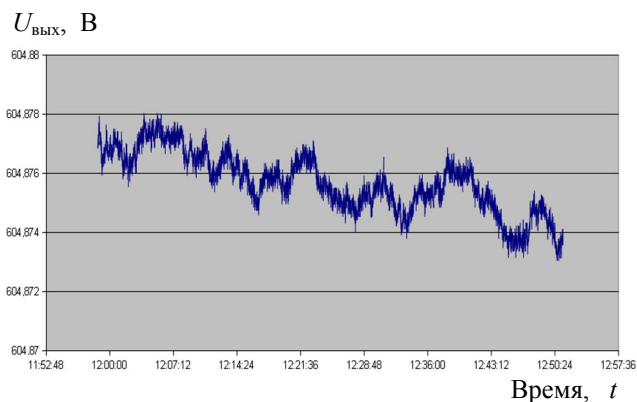


Рис. 2. Осциллограмма дрейфа выходного напряжения $U_{\text{вых}} = 604$ В в течение часа после прогрева с 11 часов 55 мин до 12 часов 55 минут. Шкала напряжений по ординате — 2 мВ/деление

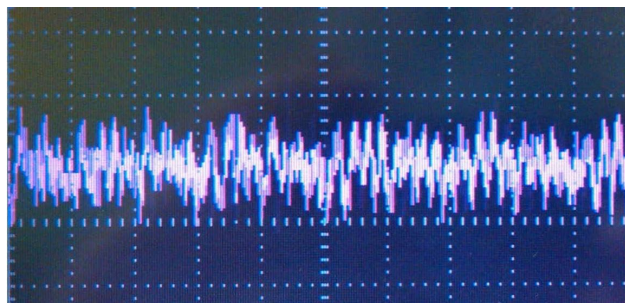


Рис. 3. Осциллограмма шумовой дорожки на уровне 604 В при временном разрешении 10 мс/деление по оси абсцисс и шкале по оси ординат — 2 мВ/деление

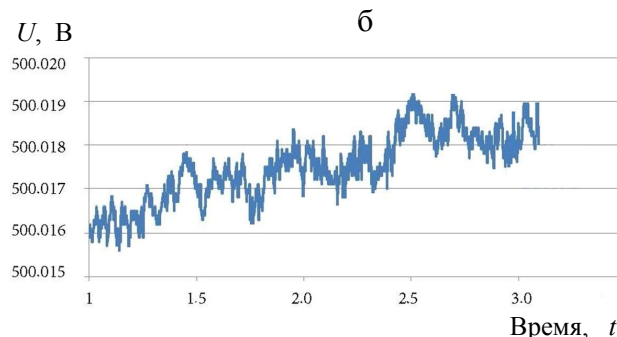
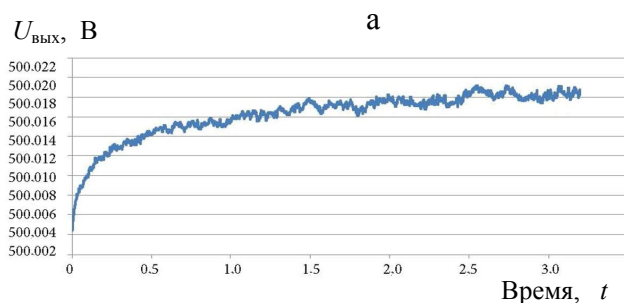


Рис. 4. Зависимость выхода рабочего напряжения на режим при прогреве в течение 3 ч (а) и осциллограмма шумовой дорожки после выхода на режим на уровне 500 В в течение 2 ч после часового прогрева (б)

Полученные экспериментальные результаты соответствуют или превосходят уровень соответствующих зарубежных высокостабильных блоков питания. Полное сравнение параметров доступно для блока ± 5 кВ и представлено в Приложении (табл. П1, П2). В Приложении же представлено фото высоковольтного двухполярного блока питания с изолированным выходом ВВ-3000-2 (3000 В) (см. табл. 1), выполненного в стандарте Евромеханика 3U14HP-220 мм.

КОММУТАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Управление и контроль состояния прецизионных блоков питания, входящих в состав общих систем питания приборов, осуществляется при помощи коммутационного устройства, рассчитанного на 24 или 48 каналов (блоков питания). Блок-схема коммутационных устройств на 24/48 каналов представлена на рис. 5. Управление осуществляется от верхнего управляющего компьютера

с соответствующим установленным программным обеспечением. Коммутационное устройство подключается к компьютеру верхнего уровня по каналу управления USB. За организацию обмена данными между компьютером и коммутационным устройством отвечает адаптер шины. Он построен на аппаратно-программном наборе от фирмы FTDI. Простота такого решения в построении адаптера шины позволяет легко организовать связь компьютера с любым устройством как на уровне разработчиков аппаратуры, так и на уровне разработчиков верхнего программного обеспечения.

Таким образом, поток данных от компьютера верхнего уровня через адаптер шины поступает на концентратор. Концентратор из общего потока данных выделяет информацию, предназначенную для каждого конкретного блока питания, проверяет ее целостность, переформатирует ее в команды управления и направляет ее на соответствующий каналный приемопередатчик ($K1, \dots, K24/48$).

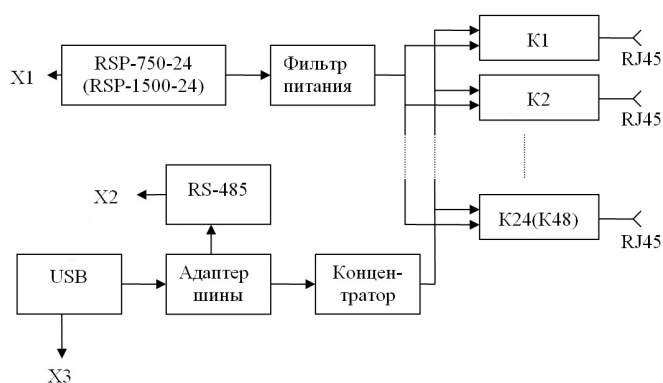


Рис. 5. Блок-схема коммутационных устройств на 24/48-канальный приемопередатчик для управления и контроля состояниями блоков питания

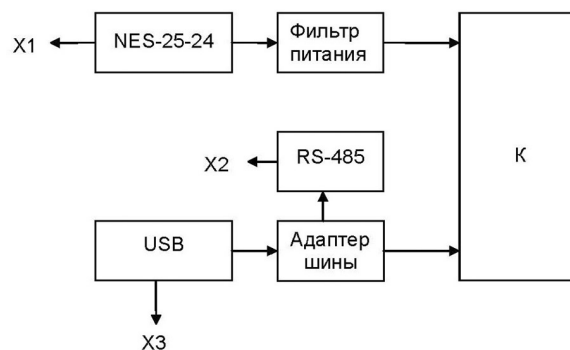


Рис. 6. Блок-схема интерфейсного одноканального приемопередатчика для управления и контроля состоянием блоком питания

Прецизионный блок питания подключается к каналному приемопередатчику через разъем RJ-45. Через контакты этого разъема, помимо последовательного канала управления, осуществляется основное питание источника от встроенного в коммутационное устройство блока питания RSP-750/1500-24. Таким образом, через каналный приемопередатчик производится управление блоком питания, а также контролируется его состояние. Данные, полученные от блока питания, постоянно находятся в области памяти каналного приемопередатчика и при запросе передаются в управляющий компьютер верхнего уровня.

Помимо данных о выходном напряжении источника питания и его состоянии, в каналный приемопередатчик заносится информация о типе подключенного к нему источника питания и возможном диапазоне его выходного напряжения.

Каждое отдельное коммутационное устройство может быть реализовано в двух вариантах исполнения отличающихся максимальным количеством каналов управления и позволяет обслуживать системы, содержащие до 24 или до 48 прецизионных блоков питания. Для обслуживания систем из большего количества источников питания коммутационное устройство имеет возможность наращиваться, организуя собственную локальную сеть. Для этого выбран дополнительный канал RS-485, который обслуживается внутренним контроллером связи коммутационных устройств. В такой сети, состоящей из нескольких коммутационных устройств, одно будет работать как мастер канала, остальные будут подчиненными устройствами. Мастер канала организует связь с компьютером верхнего уровня и отвечает за синхронизацию обмена с подчиненными устройствами. Доступ к сети подчиненных устройств осуществляется таким образом, что каждому из них выделяется опреде-

ленный временной интервал для передачи своих данных. Для управления и контроля состояния одного блока разработан одноканальный интерфейс работающий аналогичным образом. Блок-схема интерфейса одноканального приведена на рис. 6.

Управление блоками питания коммутационными устройствами (КУ 24/48) или блоком интерфейсным одноканальным (БИО) осуществляется от управляющего компьютера программным обеспечением, реализующим:

- установку необходимого рабочего напряжения независимо для каждого блока питания;
- отображение заданного и измеренного напряжений на выходе блока питания;
- одновременное включение необходимых блоков питания;
- калибровку и подстройку блоков питания.

Программное обеспечение работает в среде Windows (XP, Vista, WIN7, WIN8, WIN10) и обладает минимальными системными требованиями:

- процессор CPU: Pentium III и выше;
- оперативная память RAM: 128 Mb и выше;
- необходимое место на жестком диске HDD — до 5 Mb.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана линейка высокостабильных регулируемых двухполярных с изолированным выходом источников питания двух серий: низковольтной (± 10)–(± 600) В и высоковольтной (± 1000)–(± 5000) В, при этом максимально использовались отечественные комплектующие. Широко применена унификация разработанных узлов для всех типов источников питания. Полученные экспериментальные данные подтвердили

характеристики разработанных источников питания, которые сравнимы с лучшими мировыми аналогами. Применение источников питания в совокупности с коммутационными устройствами по-

зволяет создавать аналитические приборы и экспериментальные установки с высокими параметрами.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Табл. III. Таблица сравнений 1

Параметр	Производитель				
	Модель				
	UltraVolt	Matsusada	Spellman	APPLIED KILOVOLTS	
	2E24-P15-10PPM	KA-5P	MPS5P10/24	HP005PAA025	LS005PIP010
Выходное напряжение, В	6000	5000	5000	5000	5000
Размах пульсаций не более, %	0.001	0.0004	0.0006	0.0004	0.0001
Дрейф напряжения не более, ppm/ч	20	50	70	100	50
Дрейф напряжения не более, ppm/8 ч	25	Не указан	200	500	100
Температурный коэффициент напряжения не более, ppm/°C	50	25	25 (10*)	25 (12*)	10
Двухполярность	нет	нет	нет	нет	нет

* — доступны по заказу

Табл. П2. Таблица сравнений 2

Параметр	Производитель				
	Модель				
	Мантигора	Iseg	Wiener*	ETPS Limited*	Девайс Консалтинг
	HR-6000P	50 205	EHS8060p	НТР-EHS 80-60-105F	HVPPS 5000- 2(5000v)- ±- EM
Выходное напряжение, В	6000	5000	6000	6000	5000
Размах пульсаций не более, %	0.5	0.00014	0.0001	0.0001	0.0005
Дрейф напряжения не более, ppm/ч	50	Не указан	Не указан	Не указан	10
Дрейф напряже- ния не более, ppm/8 ч	Не указан	— " —	— " —	— " —	25
Температурный коэффициент напряжения не более, ppm/°C	25	50	25	30	10
Двухполярность	нет	да	нет	нет	да

* — многоканальные блоки (для сравнения выбраны 8-канальные)



Фото высоковольтного двухполярного блока питания с изолированным выходом ВВБП-3000-2(3000 В) (см. табл. 1)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ultravolt. URL: http://www.advanced-energy.com/en/UltraVolt_Power.html.
2. Matsusada. URL: <http://www.matsusada.com>.
3. Spellman. URL: <http://www.spellmanhv.com>.
4. Applied Kilovolts. URL: <http://www.exelis-ps.com>.
5. Stahl-electronics, Germany. URL: <http://www.stahlelectronics.com/high-voltage-source.html>.
6. Iseg Spezialelektronik GmbH, Germany. URL: <http://iseg-hv.com/en/products/detail/DPS>.
7. ETPS Limited, UK. URL: <http://www.etps.co.uk/products/high-voltage-power-supply/productinfo.aspx?ProdID=HTP-EHS-8-F0>.
8. Wiener GmbH, Germany. URL: <http://www.wiener-d.com/sc/power-supplies/mpod--lvhv/>.
9. Hemmers O., Whitfield S.B., Glans P., Wang H., Lindle D.W., Wehlitz R., Sellin I.A. High-resolution electron time-of-flight apparatus for the soft X-ray region // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69, no. 11. P. 3809–3817. Doi: 10.1063/1.1149183.
10. Samarin S.N., Artamonov O.M., Waterhouse D.K., Kirschner J., Morozov A., Williams J.F. Highly efficient time-of-flight spectrometer for studying low-energy secondary emission from dielectrics: Secondary-electron emission from LiF film // Rev. Sci. Instrum. 2003. Vol. 74, no. 3. P. 1274–1278. Doi: 10.1063/1.1537044.
11. Lebedev G., Jozwiak C., Andresen N., Lanzara A., Hussain Z. TOF electron energy analyzer for spin and angular resolved photoemission spectroscopy // Physical Procedia. 2008. Vol. 1, no. 1. P. 413–423. Doi: 10.1016/j.phpro.2008.07.122.
12. Jozwiak C., Graf J., Lebedev G., Andresen N., Schmid A.K., Fedorov A.V., El Gabaly F., Wan W., Lanzara A., Hussain Z. A high-efficiency spin-resolved photoemission spectrometer combining time-of-flight spectroscopy with exchange-scattering polarimetry // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81, no. 5. 053904. Doi: 10.1063/1.3427223.
13. Pierce D.T. Perspective on probing metallic ferromagnetism with electrons // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109, no. 7. 07E106. Doi: 10.1063/1.3537960.
14. Скапеллати К. Высоковольтные источники питания для аналитического приборостроения // Аналитика. 2013. № 4. С. 48–54.

**Институт аналитического приборостроения РАН,
г. Санкт-Петербург (Арсеньев А.Н., Монаков А.Г.,
Краснов Н.В.)**

**ООО "Девайс Консалтинг", г. Санкт-Петербург
(Краснов М.Н.)**

Контакты: Краснов Николай Васильевич,
krasnov@alpha-ms.com

Материал поступил в редакцию: 24.05.2017

ADJUSTABLE BIPOLAR HIGHLY STABLE POWER SUPPLIES

A. N. Arseniev¹, A. G. Monakov¹, N. V. Krasnov¹, M. N. Krasnov²

¹*Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg, Russia*

²*Ltd "Device Consulting", Saint-Petersburg, Russia*

A line of highly stable adjustable bipolar base power supplies of two series: low-voltage ± 10 , ± 100 , ± 300 , ± 600 V and high-voltage ± 1000 , ± 1500 , ± 3000 , ± 5000 V. The necessary parameters of power supplies are determined on the basis of modern requirements for power supplies that are part of various analytical instruments and complexes. These parameters include: bipolarity, high stability no worse than $5 \cdot 10^{-6}$, isolated electrical output, absence of mechanical adjustments — control from a personal computer, calibration of blocks not more than 2 times a month. To control power supply units, switching devices for 24 and 48 channels for power supply systems have been designed, and for a single power supply unit, a single-channel interface unit. Complete with switching devices, the software implements: setting the operating voltage independently for each power supply unit, displaying the set and measured voltage in the power supply, simultaneous activation of the required power supplies, calibration and adjustment of the units.

Keywords: highly stable adjustable bipolar power supply, low-voltage power supply, high-voltage power supply, switching device

REFERENCES

1. Ultravolt. URL: http://www.advanced-energy.com/en/UltraVolt_Power.html.
2. Matsusada. URL: <http://www.matsusada.com>.
3. Spellman. URL: <http://www.spellmanhv.com>.
4. Applied Kilovolts. URL: <http://www.exelis-ps.com>.
5. Stahl-electronics, Germany. URL: <http://www.stahlelectronics.com/high-voltage-source.html>.
6. Iseg Spezialelektronik GmbH, Germany. URL: <http://iseg-hv.com/en/products/detail/DPS>.
7. ETPS Limited, UK. URL: <http://www.etps.co.uk/products/high-voltage-power-supply/productinfo.aspx?ProdID=HTP-EHS-8-F0>.
8. Wiener GmbH, Germany. URL: <http://www.wiener-d.com/sc/power-supplies/mpod--lvhv/>.
9. Hemmers O., Whitfield S.B., Glans P., Wang H., Lindle D.W., Wehlitz R., Sellin I.A. High-resolution electron time-of-flight apparatus for the soft X-ray region. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, vol. 69, no. 11, pp. 3809–3817. Doi: 10.1063/1.1149183.
10. Samarin S.N., Artamonov O.M., Waterhouse D.K., Kirschner J., Morozov A., Williams J.F. Highly efficient time-of-flight spectrometer for studying low-energy secondary emission from dielectrics: Secondary-electron emission from LiF film. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, vol. 74, no. 3, pp. 1274–1278. Doi: 10.1063/1.1537044.
11. Lebedev G., Jozwiak C., Andresen N., Lanzara A., Hussain Z. TOF electron energy analyzer for spin and angular resolved photoemission spectroscopy. *Physical Procedia*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 413–423. Doi: 10.1016/j.phpro.2008.07.122.
12. Jozwiak C., Graf J., Lebedev G., Andresen N., Schmid A.K., Fedorov A.V., El Gabaly F., Wan W., Lanzara A., Hussain Z. A high-efficiency spin-resolved photoemission spectrometer combining time-of-flight spectroscopy with exchange-scattering polarimetry. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, vol. 81, no. 5, 053904. Doi: 10.1063/1.3427223.
13. Pierce D.T. Perspective on probing metallic ferromagnetism with electrons. *J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 109, no. 7, 07E106. Doi: 10.1063/1.3537960.
14. Scapellati C. [High Voltage Power Supplies for Analytical Instrumentation]. *Analitika* [Analytics], 2013, no. 4, pp. 48–54. (In Russ.).

Contacts: *Krasnov Nikolay Vasil'evich*, krasnov@alpha-ms.com

Article received in edition: 24.05.2017