

УДК 621.385.69.315.592.9

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-113-120

Ключевые вакуумные электронно-лучевые вентили в инверторе для статического компенсатора

А.В. Щербаков, П.М. Стальков

Приведены результаты исследований возможности создания инверторов для энергетики мощностью 1...2 МВт при бестрансформаторном подключении к сети частотой 50 Гц напряжением до 35 кВ на основе ключевых высоковольтных приборов (ВВП) — электронно-лучевых вентилях (ЭЛВ) на ток до 50 А и напряжении коммутации до 100 кВ.

Технический прогресс в преобразовательной технике для электроэнергетики требует совершенствования элементной базы в направлениях увеличения рабочих напряжений и частотного диапазона, стойкости к воздействию внешней среды, устойчивости к изменению энергетических режимов и надежности. Альтернативой элементной базы инверторов силовым полупроводниковым приборам (СПП) являются ключевые ЭЛВ. Оценку эффективности применения ЭЛВ следует проводить на основе сравнения электрических и эксплуатационных характеристик с СПП в условиях возможности использования их в преобразователях системы электроснабжения на уровне напряжения 35 кВ и выше. При приблизительном равенстве коммутлируемой ключами мощности СПП позволяют пропускать величину тока порядка нескольких килоампер при напряжении меньшем 5...6 кВ. Электронно-лучевые вентили в условиях той же мощности используются при постоянном токе около 50 А и напряжении 50...200 кВ.

Существенным преимуществом ЭЛВ является ограничение тока короткого замыкания (КЗ) в нагрузке и возможность в это время выдерживать кратковременное рассеивание большой мощности на аноде. На основе ЭЛВ можно создавать в перспективе инверторы с частотой дискретизации широтно-импульсной модуляции (ШИМ) более 10 кГц, что исключено для СПП типа IGCT и IGBT (до 2 кГц). ЭЛВ в ключевом режиме при коммутации напряжения от 20 до 200 кВ могут иметь потери в проводящий период 2...3 % коммутлируемой мощности. Уровень коммутлируемой мощности, составляющий 300...400 кВт, позволяет создавать инверторы с ШИМ для статических компенсаторов (СТК) реактивной мощности. Основным недостатком ЭЛВ — сравнительно низкое максимальное значение электрического КПД (0,9) и долговечность (обычные бариевые катоды до 8000 ч при токоотборе до 1 А/см² и температуре около 700...800 °С). Снижение плотности токоотбора пропорционально способствует повышению долговечности. Дальнейшее повышение электрического КПД ЭЛВ возможно путем оптимизации конструкции его электронно-оптической системы (ЭОС) с помощью компьютерного моделирования, а долговечность катода может быть достигнута за счет оптимизации конструкции, технологии нанесения и химического состава. Например, повышение долговечности до 100 000 ч при токоотборе до 30 А/см² и температуре около 1100 °С возможно путем применения металлопористых катодов на основе вольфрамовой губки с покрытием из WВаOs и продольными канавками на подложке.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, электронно-лучевые вентили, преобразовательная техника.

Для цитирования: Щербаков А.В., Стальков П.М. Ключевые вакуумные электронно-лучевые вентили в инверторе для статического компенсатора // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 113—120. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-113-120.

Vacuum Electron-beam Valves in the Inverter for a Static Compensator

A.V. Shcherbakov, P.M. Stalkov

The article presents the results from studying the possibility of designing inverters for power industry applications with a capacity of 1...2 MW with transformerless connection to a network with a frequency of 50 Hz and voltage up to 35 kV, with the use of high-voltage switching apparatuses on the basis of electron-beam valves for currents up to 50 A and switched voltages up to 100 kV.

If we wish to make further progress in the technology of power converters for electric power industry applications, it is necessary to improve the components in terms of increasing the operating voltages and frequency range, the resistance to the effect of external influencing factors, robustness to changes in power operating conditions, and reliability enhancement. Electron-beam valve based switches can be considered as an alternative to power semiconductor devices as components for making inverters. The effectiveness of using electron-beam valves should be estimated by comparing their electrical and operating characteristics with those of power semiconductor devices under the conditions of their possible use in the converters of a power supply system with the voltage level of 35 kV and above. With the approximately equal levels of power switched by the valves, power semiconductor devices are able to pass currents equal to around a few kA at voltages lower than 5...6 kV. As to electron-beam valves, in passing the same power levels, they can switch a constant current of around 50 A at a voltage of 50 to 200 kV.

A significant advantage of electron-beam valves is their ability to limit short-circuit current in the load and simultaneously withstand short-term dissipation of a large power on the anode. In principle, electron-beam valves can be used to construct inverters with a PWM quantization frequency

of more than 10 kHz, which is not attainable for power semiconductor devices on the basis of IGCT and IGBT (up to 2 kHz). Electron-beam valves operating in the mode of switching a voltage ranging from 20 to 200 kV can have losses in the conducting period at a level of 2...3% of the switched power. With the switched power at a level of 300...400 kW, it becomes possible to construct PWM inverters for static reactive power compensators. The main disadvantage of electron-beam valves is a relatively low maximum value of their electrical efficiency (0.9) and durability (the service life of usual barium cathodes operating with a current density of up to 1 A/cm² and temperature of about 700...800 °C is no more than 8000 h). Decreasing the current density results in a proportional increase of the durability. A further increase in the electrical efficiency of an electron-beam valve is possible by optimizing the design of its electronic-optical system with the aid of computer modeling, and the durability of the cathode can be increased by optimizing its design, the application technology, and chemical composition. For example, increasing the durability up to 100 000 h at a current density of up to 30 A/cm² and a temperature of about 1100 °C is possible by using dispenser cathodes on the basis of a tungsten sponge with WBaOs coating and longitudinal grooves on the substrate.

Key words: power semiconductors, electron-beam valves, converter equipment.

For citation: Shcherbakov A.V., Stalkov P.M. Vacuum Electron-beam Valves in the Inverter for a Static Compensator. MPEI Vestnik. 2018;4:113—120. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-113-120.

Введение

Развитие силовой преобразовательной техники (статических компенсаторов (СТК) реактивной мощности, объединенных регуляторов потока мощности (ОРПМ)) для электроэнергетики требует совершенствования элементной базы в направлении увеличения рабочих напряжений, частотного диапазона тактовой частоты при преобразовании широтно-импульсно модулированного (ШИМ) сигнала в аналоговый, стойкости к воздействиям электромагнитного излучения (ЭМИ) и короткого замыкания (КЗ) в нагрузке, устойчивости к изменению энергетических режимов, повышения надежности [1].

С появлением силовых полупроводниковых приборов (СПП) актуальным становится привлечение новой элементной базы, способной решить возникающие проблемы на уровне силового коммутационного прибора, к которой относятся современные высоковольтные вакуумные приборы (ВВП), в частности, электронно-лучевые вентили (ЭЛВ).

Вентили разработаны во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ) г. Москвы и представляют собой высоковольтную вакуумную электронно-лучевую лампу с малыми потерями, предназначенную для работы в импульсном модуляторе в ключевом режиме при частых пробоях в нагрузке [2]. Их использование запланировано в разработках для решения задачи по исследованию путей создания выпрямительно-инверторных устройств (ВИУ) мощностью 1 МВт и более для СТК на напряжение до 35 кВ.

Создан новый (по сравнению с ЭЛВ 4/40) мощный ЭЛВ 50/100 (постоянный ток до 50 А, анодное напряжение до 100 кВ), способный к коммутации мощности при постоянном и переменном напряжениях (рис. 1).

К основным недостаткам ЭЛВ относятся относительно малая величина коммутируемого тока, большие потери при анодном напряжении менее 20 кВ из-за падения напряжения в проводящий период и малый срок службы в штатных режимах. Однако прогресс в развитии ЭЛВ в направлении увеличения мощности комму-

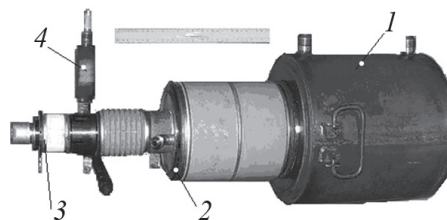


Рис. 1. Внешний вид ЭЛВ 50/100:

1 — анод; 2 — управляющий электрод; 3 — вывод накала; 4 — магнитный электроразрядный насос (ЭРН)

тации и уменьшения потерь позволяет более детально проанализировать и сравнить свойства и параметры ЭЛВ и СПП, оценить перспективы их применения в высоковольтных силовых электротехнических схемах. Уже сегодня можно найти дополнительные направления, где использование ВИУ на ЭЛВ в качестве ключевых приборов энергетического назначения дало бы ощутимый положительный эффект [3, 4].

Проведем сравнительный анализ ЭЛВ, позволяющий:

- определить пути разработки новых приборов в качестве элементной базы ВИУ и направления эффективного использования ЭЛВ при создании крупномасштабных ВИУ [5, 6];
- сопоставить параметры и характеристики ВИУ на ЭЛВ и СПП, изучить особенности их работы;
- снизить потери в ЭЛВ путем оптимизации его электронно-оптической системы (ЭОС);
- усовершенствовать катодный узел с целью достижения максимально возможного уровня долговечности.

Сравнительный анализ выпрямительно-инверторных устройств на базе электронно-лучевых вентилях и силовых полупроводниковых приборов

Разработка ВИУ для электроснабжения особо ответственного потребителя на ЭЛВ проводится впервые, поэтому оценка эффективности применения носит предварительный характер [7]. Оценку эффективности применения приборов в ключевом режиме следует

проводить на основе сравнения электрических и эксплуатационных характеристик в условиях возможности использования в системах электроснабжения на уровне напряжения $U_{ком} = 35$ кВ и выше. Особенностью ЭЛВ является полая конструкция анода, обеспечивающего потенциальное торможение коммутирующего электронного пучка. Прибор, будучи по конструкции триодом, имеет ярко выраженную пентодную вольт-амперную характеристику. Результаты сопоставления электрических характеристик ЭЛВ и СПП приведены в табл. 1.

Из принципиальных и конструктивных особенностей вытекают различия в электрических параметрах. При приблизительном равенстве коммутируемой ключами мощности СПП могут пропускать ток более килоампера при напряжении ≤ 6 кВ (мощность 5...6 МВт), а ЭЛВ 50/100 в условиях мощности 0,5...3 МВт используются при постоянном токе анода $I_{ан}$ до 50 А и напряжении $U_{ак} = 50...100$ кВ.

При оценке потерь в ВИУ на ЭЛВ используем результаты исследований опытных образцов ЭЛВ 50/100, изготовленных на ОАО «НПП «Контакт» (г. Саратов). В табл. 2 приведен результат расчета статических потерь и КПД ЭЛВ 50/100 при коммутируемой мощности 1050 кВт и напряжении 35 кВ. Кратковременно (до 1 мин) система охлаждения ЭЛВ может отводить мощность до 50 кВт.

Динамические потери на аноде $P_{ад}$ для ЭЛВ определяются мощностью заряда/разряда паразитной емкости $C_{а-к}$ анод-катод (около 40 пФ). Импульсный ток катода (около 500 А) обеспечивает быстрый разряд паразитной емкости анод-катод при коммутации. Заряд емкости при отключении происходит током нагрузки. Так, время заряда паразитной емкости анод-катод t током 30 А определяется, как

$$t = C_{а-к} U_{а-к} / I_{ан} = 26,6 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Пусть динамическими потерями ЭЛВ в ВИУ, формирующему 50 Гц при тактовой частоте ШИМ от 2 до

Таблица 1

Сопоставление ЭЛВ и СПП

Параметры сравнения		ЭЛВ	СПП
Конструктивные и принципиальные особенности		протяженная топология; некомпенсированный пространственный заряд (ρv) в объеме; высокая электрическая прочность вакуума; выделение тепла на поверхности полого анодного электрода	планарная топология; частично скомпенсированный пространственный заряд (ρv); низкая электрическая прочность объема полупроводника; выделение тепла в объеме полупроводника
Электрические	$U_{ак}, \text{кВ}$	≤ 200	$\leq 2...7$
	$I_{ан} / I_{ан}, \text{А}$	$\leq 50/500$	$\leq 3000/6000$
	$U_{ак}, \text{В}$	400...700	1...2
	$T_{выкл}, \text{мкс}$	$< 0,1$	0,5...800
	$P_{рассеяния}, \text{кВт}$	≤ 50	≤ 4
Эксплуатационные	$T_{max,раб}, \text{°C}$	≤ 300	≤ 120
	$I_{кз}, \text{А}$	равно $I_{ном}$	равно $nI_{ном}$
	Устойчивость прибора к КЗ в нагрузке	прибор физически ограничивает ток КЗ; после снятия КЗ сохраняет работоспособность	нет ограничения тока КЗ; при перегрузке происходит необратимый выход прибора из строя
	Стойкость к ЭМИ	Есть	Нет
Особенности использования в мощных высоковольтных схемах		возможность бестрансформаторного подключения к ЛЭП 20...35 кВ (в перспективе 110 кВ); высокая помехоустойчивость; нет необходимости в последовательном соединении приборов	необходимость использования высоковольтных трансформаторов или последовательных цепочек; сложные схемные решения; необходимость резервирования

Таблица 2

Усредненные характеристики ЭЛВ 50/100

$U_{уз}, \text{кВ}$	$I_{уз}, \text{А}$	$P_{пот,уз}, \text{кВт}$	$U_{ак}, \text{кВ}$	$I_{ан}, \text{А}$	$P_{ан}, \text{кВт}$	$P_{пот,н}, \text{кВт}$	$P_{\Sigma пот} = P_{уз} + P_{а} + P_{н}, \text{кВт}$	$P_{нагр}, \text{кВт}$	КПД, о.е.
1,4...1,5	1,5...1,6	2,1...2,4	0,4...0,7	30,0	12,0...21,0	1,4...1,5	15,5...24,9	1050	0,98...0,99

5 кГц, можно пренебречь из-за очень малой длительности фронтов по отношению к минимальной длительности тактового импульса. Тогда полные потери мостового трехфазного ВИУ мощностью 1050 кВт при наличии 6 вентилях (мощности потерь каждого вентиля $P_{\Sigma_{a.n}} = 15,5 \dots 24,9$ кВт) на частоте 2 кГц составят

$$P_{\text{ВИУ}} = 6PP_{\Sigma_{a.n}} = (93 \dots 149) \cdot 10^3 \text{ кВт},$$

а электронный КПД будет равен $\eta_{\text{ВИУ}} = 0,86 \dots 0,91$.

Основные потери ВИУ на ЭЛВ — статические, для их снижения необходимо:

- уменьшить падение напряжения U_{a-k} с 0,7 до 0,2...0,4 кВ путем оптимизации ЭОС;
- менять (в зависимости от тока катода) мощность накала путем установки на катод термпары для автоматического удержания температуры в зоне, обеспечивающей режим пространственного заряда, и напряжение на управляющем электроде путем введения обратной связи.

Сравним результаты потерь ВИУ на ЭЛВ с СПП. Точные данные получить невозможно, поскольку инвертор на СПП выпущен для приводов и других целей на уровень напряжения 1,2...3,6 кВ, а мощность ВИУ значительно выше 100 МВт. Поэтому возьмем ВИУ напряжением до 3,6 кВ и мощностью до 1 МВт. Рассматривать последовательную цепочку из полевых транзисторов IGBT и тиристоров IGCT на ток $I_{a.n} = 30$ А и напряжение $U_{a-k} = 35$ кВ некорректно, так как данное соотношение тока и напряжения не характерно для СПП.

Для сравнения возьмем ключ на тиристоре IGCT с рабочим напряжением 3,6 кВ, током 1,2 кА, частотой 500 Гц и коммутируемой мощностью 4,3 МВт. Его статические потери составят 3,6 кВт, коммутационные — 4,25 кВт, полные — 7,85 кВт. Однако, предельная тактовая частота, при которой его можно использовать в режиме ШИМ составит 500 Гц, что приводит к большим значениям фильтрующих емкостей и дросселей. Использование понижающего трансформатора, даже на этой тактовой частоте, приводит к суммарным (с трансформатором) потерям, обеспечивающим результирующей КПД около 0,9...0,95, соизмеримый с ВИУ на 6 шт. ЭЛВ 50/100 в ключевом режиме (0,86...0,91) при напряжении 35 кВ и токе 30 А.

Высоковольтный высокочастотный инвертор для асинхронного электропривода ВПЧА 6,3/6,0-50 на транзисторе IGBT характеризуется (при коммутируемом напряжении 6,0 кВ) выходными мощностью 1 МВт, током $I_{\text{вых}} = 120$ А и КПД около 0,94. В этом случае с применением понижающего трансформатора общий КПД снизится до 0,92. Потери инвертора на транзисторе IGBT в этом режиме также соизмеримы с величиной потерь ВИУ на ЭЛВ 50/100.

Учитывая, что окончательные результаты можно получить только после испытания ВИУ на ЭЛВ при работе на реальную нагрузку, то предварительно можно сделать вывод, что суммарные относительные по-

тери мощности при использовании ЭЛВ близки к СПП. Проведенные работы показали, что статические потери ключей на ЭЛВ и СПП соизмеримы при использовании в высоковольтных ключевых схемах. Кроме того, динамические потери ЭЛВ ниже СПП, особенно при повышении тактовой частоты ШИМ. Если учесть эксплуатационные достоинства ЭЛВ, очевидно уже сейчас, что применение подобных приборов в ВИУ для энергетики в диапазоне относительно небольших мощностей может быть перспективно для определенной ниши потребителей.

В эксплуатационных параметрах заметно преимущество ЭЛВ, как более устойчивых к высокой температуре и ЭМИ. Существенным преимуществом является физическое ограничение тока КЗ в нагрузке при возможности выдерживать кратковременное рассеивание большой мощности на аноде. Это значит, что ЭЛВ с успехом может использоваться в режиме компенсационного стабилизатора тока нагрузки с возможностью плавного штатного (или аварийного) выключения и включения без использования вакуумных или элегазовых выключателей. Большим преимуществом при эксплуатации является тот факт, что пробой внутри ЭЛВ (искрение), в отличие от СПП (выгорание), не носит катастрофического, необратимого характера.

Данные эксплуатационные преимущества показывают перспективность применения ЭЛВ в высоковольтных цепях и, особенно, в сетях гарантированного электроснабжения особо ответственных потребителей, а также в случае бестрансформаторного подключения, когда в гальванической развязке нет необходимости [8].

На основе ЭЛВ можно создавать ВИУ с ШИМ при тактовой частоте, равной 10 кГц и выше, что исключено для тиристорных IGCT и транзисторных IGBT. Повышение тактовой частоты при формировании сетевого напряжения частотой 50 Гц позволило бы уменьшить параметры вспомогательных реактивных силовых элементов (конденсаторов, дросселей). Однако, это может вызвать новые побочные явления, например излучение высокочастотной гармонической составляющей, приводящее к необходимости создания высокочастотных экранов.

Особенности работы электронно-лучевых вентилях 50/100 в ключевом режиме

Проведенный сравнительный анализ ЭЛВ и модуляторных ламп большой мощности, работающих в ключевом режиме, в России и за рубежом показал, что основным параметром, определяющим электронный КПД, является качество ключевого прибора K (отношение коммутируемого напряжения $U_{a.k}$ к внутреннему сопротивлению $R_{\text{вн}}$ лампы в проводящий период, $K = U_{a.k}/R_{\text{вн}}$), которое в ЭЛВ существенно превышает существующие модуляторные лампы.

В табл. 3 представлены основные усредненные параметры в ключевом режиме работы ЭЛВ 50/100

Таблица 3

Основные усредненные параметры ЭЛВ

Предельные параметры	Тип ЭЛВ, термокатод		
	ЭЛВ 2/200, 1 шт. круглый таблеточный	ЭЛВ 4/40, 8 шт. ленточных	ЭЛВ 50/100, 24 шт. ленточных
Коммутируемое напряжение $U_{а.к}$, кВ	200	60	100
Анодный ток в непрерывном режиме $I_{а.п}$, А	2	8	50
Анодный ток в импульсном режиме $I_{а.и}$, А	4...10	50	500
Мощность накала $P_{нак}$, Вт	(7,5 А, 12 В) 90	(30 А, 12 В) 360	(90 А, 16 В) 1500
Первеанс P , мкА/В ^{3/2}	8,7	88	200
Торможение $U_{а.к}/U_{в.з}$, %	40	25	30
Токоперехват $I_{в.з}/I_{к}$, %	1	4,6	5,5
Мощность нагрузки $P_{н}$, кВт	400	480	5000
Крутизна S , мА/В ^{3/2}	0,72	5	6,5
Габариты (высота/диаметр), мм	435/170	480/200	500/250
Масса, кг	13	25	40

по сравнению с разработанными ранее вентилями ЭЛВ 2/200 и 4/40 [9].

В электрическую схему ЭЛВ 50/100 подключается как классический триод. Электронный поток формируется прямоугольными ленточными катодами в виде 24 ленточных пучков прямоугольного сечения. Эмитирующая поверхность каждого катода $6 \times 100 \text{ мм}^2$. Охлаждение анода и ускоряющего электрода — жидкостное. На основе ЭЛВ 4/40 разработана физическая модель двуполярного коммутатора на пониженную мощность для мостового ВИУ. За базовую конструкцию коммутатора на основе ЭЛВ принят стандартный шкаф (рис. 2) типа А Type 12 ENCLOSURE ISSUE No.A-2509 (DK 7820 510).

Электронно-оптическая система электронно-лучевого вентиля

Минимизация потерь на электродах определяется тем, что при прохождении электронного потока потенциал анода ниже управляющего, а сам электронный поток с помощью ЭОС тщательно сформирован в компактный луч прямоугольного сечения, практически не имеющий рассеяния на краях.

В анодной цепи ЭЛВ 50/100 в ключевом режиме при повышении коммутационного напряжения процент потерь уменьшается, так как абсолютное значение мощности потерь на участке анод–катод в проводящий период ЭЛВ величина постоянная и определяется конструктивными особенностями ЭОС.

Соотношение анодного напряжения и диаметра отверстия управляющего электрода таково, что проникаемость электрического поля анода в прикатодную область мало, поэтому ток анода определяется только потенциалом управляющего электрода $U_{в.з} = 1,4...1,5 \text{ кВ}$, который превышает падение напряжения анод–катод

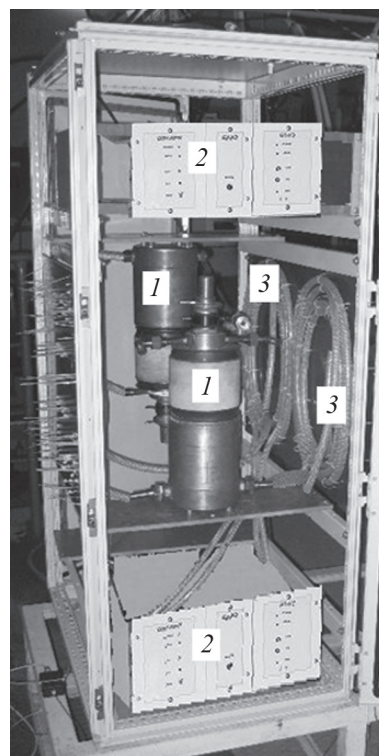


Рис. 2. Физическая модель коммутатора на основе двух водоохлаждаемых ЭЛВ 4/40:

1 — ЭЛВ4/40; 2 — подмодулятор (блок управления); 3 — водной высоковольтный дроссель

$U_{а.к} = 0,4...0,7 \text{ кВ}$ и практически не зависит от исходного напряжения на аноде $U_{а.к}$.

Повышение качества ЭЛВ заключается в повышении его электрического КПД путем оптимизации конструкции ЭОС, обеспечивающей снижения потерь на участке анод–катод и уровня перехвата тока катода управляющим электродом, а также повышение элек-

трической прочности [10]. Результаты стендовых экспериментальных исследований перспективной ЭОС приведены на рис. 3 [11, 12].

Долговечность катода электронно-лучевого вентиля

Практически все вопросы, связанные с долговечностью катода, приводят к снижению его эмиссионной способности и определяются уровнем остаточного давления (вакуумом), режимом работы и конструкцией. Чем ниже остаточное давление, тем больше срок службы. Желательно иметь рабочий уровень ниже 10^{-6} мм рт. ст. и поддерживать его с помощью геттеров или малогабаритных магнитных электроразрядных насосов (ЭРН).

Практически режим работы оксидного стандартного катода при температуре $700...750$ °С и плотности съема тока с катода (токоотбора) $0,5...1$ А/см² обеспечивает срок службы около 8000 ч. Однако, проведенный Л.А. Ашкинази в 1990 — 2009 гг. обзор статей по катодам показывает, что срок службы и токоотбор могут быть существенно увеличены до 30...50 тыс. ч путем изменения конструкции подложки и материала оксидной поверхности [13].

По конструкции наиболее перспективными считаются катоды с вогнутой или плоской поверхностью, оксидные на основе вольфрамовой губки (металлопористые) [14 — 16]. При оптимизации материала покрытия работа выхода катода с покрытием ReOsW на 0,03 эВ меньше, чем с покрытием OsW. Катод с 3 % Sc₂O₃ имеет эмиссию в 20 раз больше, чем у WBa-катада и в 4 раза больше WBaOs-катада. Для катода с WBa покрытием отравляющее давление остаточных газов при остаточном давлении $2,10^{-10}$ мм рт. ст. на порядок больше, чем для WBaOs, а для катода с пленкой W+Sc₂O₃ при плотности тока 10 А/см² и 900 °С получен срок службы 18 000 ч.

Исследованы оба фактора ограничения срока службы WBaOs-катада, расход активного вещества и деградация поверхности подложки. При 50; 20; 10; 5; 2 А/см² достижим срок службы 0,3; 5; 20; 50; 200 тыс. ч. По мнению разработчиков, для WBaOs покрытия катодов может быть достигнут срок службы 100 000 ч при токоотборе 30 А/см² и температуре 1100 °С.

Катод с покрытием WBaOs при 1010 °С и токоотборе до 2 А/см² должен иметь срок службы — 240 000 ч.

Кроме того, можно дополнительно создать оригинальную конструкцию поверхности катода с канавками. Вещество покрытия катода, распыляемое при бомбардировке, перераспыляется с одной на другую сторону канавки и, таким образом, срок службы должен возрасти. Однако необходимы длительные испытания в режиме реального времени и условиях номинального режима работы прибора.

Заключение

Приведены результаты работы по исследованию путей создания перспективных высоковольтных ВИУ на базе ЭЛВ, проведенной с целью расширения возможностей и повышения качественных показателей элементной базы силовой электроники для решения современных задач электроэнергетики.

Ряд эксплуатационных преимуществ ЭЛВ по сравнению с СПП (быстродействие, возможность физического ограничения тока нагрузки, устойчивость к воздействию ЭМИ и КЗ, широкий температурный диапазон, стойкость к пробоям внутри приборов, возможность многократного включения и отключения под нагрузкой) делает их перспективными для создания помехоустойчивых ВИУ для СТК или ОРПМ, обеспечивающих кондиционирование качества электроэнергии при снабжении особо ответственных потребителей с напряжением 5 кВ и током 30 А. Электрический КПД ВИУ на основе ЭЛВ — 0,86...0,91.

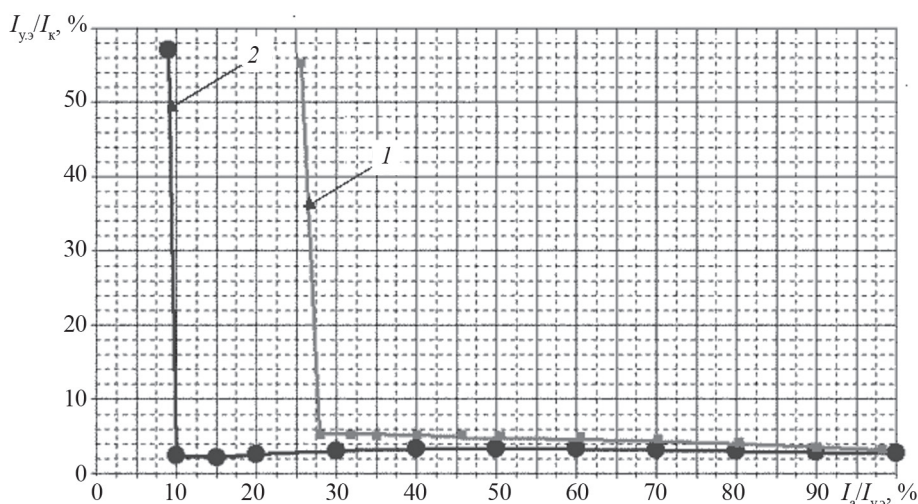


Рис. 3. Экспериментальные результаты до (1) и после (2) компьютерной оптимизации тока перехвата $I_{уэ}/I_k$ от торможения $U_a/U_{уэ}$ в ЭОС с ленточным катодом

В качестве вакуумного ключевого прибора предложен ЭЛВ 50/100, обладающий высоким электронным КПД около 0,99 при прохождении анодного тока 5...50 А, напряжении на нагрузке 50...100 кВ, падении напряжения анод-катод 0,7...1 кВ.

Разработана и выпущена опытная партия ЭЛВ 50/100 на ОАО «НПП «Контакт» (г. Саратов).

Для решения поставленной задачи по повышению электрического КПД ВКУ при пониженных напряжениях 10...35 кВ необходима компьютерно-экспериментальная оптимизация конструктивных особенностей ЭОС ЭЛВ.

Доступна возможность разработки новых ЭЛВ с постоянным 100 А и импульсным более 1000 А токами для кратковременного шунтирования контактов основного размыкателя при штатном/аварийном отключениях мощных высоковольтных нагрузок в высоковольтных импульсных источниках питания специального назначения.

Существенное повышение срока службы ЭЛВ до 60...100 тыс. ч возможно путем замены катодов с классическим бариевым покрытием на никелевой подложке на катоды с металлопористой вольфрамовой подложкой с канавками, WBaOs-покрытием и обязательным введением терморегуляции, обеспечивающей работу в режиме пространственного заряда при всех режимах работы нагрузки.

Литература

1. Кузьменко В.А., Таратута И.П., Чуприков В.С. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (опыт разработки и внедрения) // Электро. 2003. № 5. С. 34—38.
2. Щербаков А.В. Импульсный высоковольтный модулятор с частичным разрядом емкостного накопителя // Вестник МЭИ. 2017. № 1. С. 50—57.
3. Щербаков А.В. Электронно-лучевые вентили для высоковольтных импульсных устройств // Электротехника. 2014. № 2. Т. 1. С. 38—43.
4. Переводчиков В.И. и др. Исследование путей создания преобразователя для энергетики на основе вакуумных ключевых электронных приборов // Электротехника. 2012. № 10. С. 18—24.
5. Радиллов Т.В. Разработка методики моделирования установившихся режимов электроэнергетических систем с гибкими электропередачами: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2014.
6. Переводчиков В.И. и др. Перспективы разработки и применения вакуумных электронных приборов в силовой электронике и энергетике // Прикладная физика. 2012. № 2. С. 18—24.
7. Переводчиков В.И., Щербаков А.В., Трухачев И.М., Матвеев Н.В. Перспективы создания помехоустойчивого статического компенсатора реактивной мощности на основе вакуумных ключевых электронных приборов // Электро. 2011. № 5. С. 41—44.

8. Пат. № 95434 РФ. Многофункциональный энергетический комплекс (МЭК) / Н.В. Матвеев и др. // Бюл. изобрет. 2010. № 18.

9. Переводчиков В.И., Шапенко В.Н., Мартынов В.Ф. Новый класс мощных электронных приборов — электронно-лучевые вентили // Прикладная физика. 2000. № 2. С. 86—94.

10. Акимов П.И. Принципы построения электронно-оптических систем мощных электронных приборов и методы их численного проектирования: Автореф. дисс. ... доктора физ.-мат. наук. М.: Изд-во МЭИ, 2002.

11. Perevodchikov V.I., Stalkov P.M. Voltage Drop in Switch High-voltage Vacuum Electronic Devices // Proc. Intern. Conf. Actual Problems of Electron Devices Eng. Saratov, 2010. Pp. 454—459.

12. Perevodchikov V.I. e. a. High-effective Switching and Power Amplifier Tubes with Electrons Deceleration and Their Application in Power Electronics // IEEE Vacuum Electronics Conf. Monterey, 2010. Pp. 477—478.

13. Ашкинази Л.А. Результаты в области термо- и вторично-электронных катодов за 1990—2009 годы. М.: Изд-во МИЭМ, 2010.

14. Смирнов В.А. и др. Щелевые металлопористые катоды // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. № 1 (1). С. 96—99.

15. Смирнов В.А. и др. Катодные узлы для ускорителей электронов // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2016: Сб. трудов Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. Рязань: Рязанский гос. радиотехн. ун-т, 2016. С. 137—141.

16. Акимов П.И. и др. Мощный импульсный многолучевой клистрон для питания линейного ускорителя электронов // Там же. С. 137—141.

References

1. Kuz'menko V.A., Taratuta I.P., Chuprikov V.S. Staticheskie Tiristornye Kompensatory Reaktivnoy Moshchnosti (Opyt Razrabotki i Vnedreniya). Elektro. 2003;5:34—38. (in Russian).
2. Shcherbakov A.V. Impul'snyy Vysokovol'tnyy Modulyator s Chastichnym Razryadom Emkostnogo Nakopitelya. Vestnik MPEI. 2017;1:50—57. (in Russian).
3. Shcherbakov A.V. Elektronno-luchevye Ventili dlya Vysokovol'tnyh Impul'snyh Ustroystv. Elektrotehnika. 2014;2:1:38—43. (in Russian).
4. Perevodchikov V.I. i dr. Issledovanie Putey Sozdaniya Preobrazovatelya dlya Energetiki na Osnove Vakuumnnyh Klyuchevykh Elektronnykh Priborov. Elektrotehnika. 2012;10:18—24. (in Russian).
5. Radilov T.V. Razrabotka Metodiki Modelirovaniya Ustanovivshihya Rezhimov Elektroenergeticheskikh Sistem s Gibkimi Elektropredachami: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2014. (in Russian).
6. Perevodchikov V.I. i dr. Perspektivy Razrabotki i Primeneniya Vakuumnnyh Elektronnykh Priborov v Silovoy Elektronike i Energetike. Prikladnaya Fizika. 2012;2:18—24. (in Russian).

7. **Perevodchikov V.I., Shcherbakov A.V., Truhachev I.M., Matveev N.V.** Perspektivy Sozdaniya Pomekhoustoychivogo Staticheskogo Kompensatora Reaktivnoy Moshchnosti Na Osnove Vakuumnyh Klyuchevykh Elektronnykh Priborov. *Elektro*. 2011;5:41—44. (in Russian).

8. **Pat № 95434 RF.** Mnogofunktsional'nyy Energeticheskiy Kompleks (MEK) / N.V. Matveev i dr.. Byul. Izobret. 2010;18. (in Russian).

9. **Perevodchikov V.I., Shapenko V.N., Martynov V.F.** Novyy Klass Moshchnykh Elektronnykh Priborov — Elektronno-luchevye Ventili. *Prikladnaya Fizika*. 2000;2: 86—94. (in Russian).

10. **Akimov P.I.** Printsipy Postroeniya Elektronno-opticheskikh Sistem Moshchnykh Elektronnykh Priborov i Metody ih Chislennogo Proektirovaniya: Avtoref. Diss. ... Doktora Fiz.-mat. Nauk. M.: Izd-vo MPEI, 2002. (in Russian).

11. **Perevodchikov V.I., Stalkov P.M.** Voltage Drop in Switch High-voltage Vacuum Electronic Devices. *Proc. Intern. Conf. Actual Problems of Electron Devices Eng. Saratov*, 2010:454—459.

12. **Perevodchikov V.I. e. a.** High-effective Switching and Power Amplifier Tubes with Electrons Deceleration and Their Application in Power Electronics. *IEEE Vacuum Electronics Conf. Monterey*, 2010:477—478.

13. **Ashkinazi L.A.** Rezul'taty v Oblasti Termo- i Vtorichno-elektronnykh Katodov za 1990—2009 Gody. M.: Izd-vo MIEM, 2010. (in Russian).

14. **Smirnov V.A. i dr.** Shchelevye Metalloporistye Katody. *Elektronika i Mikroelektronika SVCH*. 2017;1;1 (1):96—99. (in Russian).

15. **Smirnov V.A. i dr.** Katodnye Uzly dlya Uskoriteley Elektronov. *Sovremennye Tekhnologii v Nauke i Obrazovanii — STNO-2016: Sb. Trudov Mezhdunar. Nauch.-tekhn. i Nauch.-metod. Konf. Ryazan': Ryazanskiy Gos. Radiotekhn. Un-t*, 2016:137—141. (in Russian).

16. **Akimov P.I. i dr.** Moshchnyy Impul'snyy Mnogoluchevoy Klistron dlya Pitaniya Lineynogo Uskoritelya Elektronov. *Tam zhe*:137—141. (in Russian).

Сведения об авторах

Щербаков Александр Владимирович — доктор технических наук, начальник отдела Всероссийского электротехнического института, e-mail: shav180745@vei.ru

Стальков Павел Михайлович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Всероссийского электротехнического института, e-mail: stalkov@vei.ru

Information about authors

Shcherbakov Aleksandr V. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Dept., All-Russian Electrotechnical Institute, e-mail: shav180745@vei.ru

Stal'kov Pavel M. — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of All-Russian Electrotechnical Institute, e-mail: stalkov@vei.ru

Статья поступила в редакцию 24.07.2017