

УДК 621.385; 621.314

Перспективы разработки и применения вакуумных электронных приборов в силовой электронике и энергетике

*В. И. Переводчиков, Н. В. Матвеев, П. М. Стальков, И. М. Трухачев,
В. Н. Шапенко, А. Л. Шапиро, А. В. Щербаков*

Рассмотрены перспективы применения мощных электровакуумных ламп в силовой электронике и энергетике. Описаны возможности и пути повышения КПД ключевых ламп. Приведено сравнение характеристик мощных вакуумных и полупроводниковых приборов. Представлены результаты экспериментальных исследований модели инвертора на вакуумных лампах. Проведена оценка параметров и характеристик мощного преобразователя на электровакуумных приборах для силовой электроники и энергетике.

PACS: 85.45.Bz, 07.07.Mr, 07.50.Ek, 07.90.+c

Ключевые слова: электровакуумный прибор, КПД, электронно-лучевой вентиль, преобразователь, электронно-оптическая система.

Введение

В настоящее время в мощных высоковольтных схемах и устройствах в качестве быстродействующих ключей используются в основном полупроводниковые или газоразрядные приборы. Использование вакуумных электронных приборов с электростатическим (сеточным) управлением ограничено в основном мощными КВ- и УКВ-генераторами и модуляторами СВЧ-приборов. Между тем, вакуумные приборы имеют ряд существенных преимуществ перед полупроводниковыми. Эти преимущества — высокая электрическая прочность единичного прибора, быстродействие, слабая зависимость тока от анодного напряжения. Кроме того, вакуумные приборы имеют достоинства в области эксплуатационных характеристик, таких как способность работать при высоких температурах, устойчивость к электромагнитному излучению, возможность ограничивать ток короткого замыкания в нагрузке и стойкость по отношению к короткому замыканию в самом приборе. Факторами, ограничивающими применение вакуумных

электронных приборов в преобразователях и других мощных устройствах силовой электроники, являются большие потери в проводящем периоде тока и ограниченная величина коммутируемого тока. Однако последние успехи в разработке вакуумных ключевых приборов с повышенным электронным КПД позволяют рассмотреть возможность использования их вместо полупроводниковых ключей в высоковольтных устройствах для энергетике.

Пути повышения КПД вакуумных электронных ламп

Понижение потерь в вакуумных приборах возможно за счет использования принципа торможения электронного потока перед анодом. Этот принцип использован в разрабатываемых в ФГУП ВЭИ вакуумных электронных приборах с сеточным управлением, получивших название электронно-лучевые вентили (ЭЛВ). Основной особенностью ЭЛВ является высокий потенциал сетки, позволяющий отбирать большой ток с катода, и последующее торможение электронного потока перед анодом, имеющим потенциал существенно ниже сеточного. При этом происходит возврат энергии, затраченной на ускорение электронного потока в источник питания, т. е. рекуперация кинетической энергии электронов.

Принцип рекуперации энергии при торможении электронного потока в целях повышения электронного КПД широко используется в мощных СВЧ-приборах и устройствах электронного охлаждения ионных потоков в мощных ускорителях. Существенное отличие применения этого принципа в СВЧ-приборах с электродинамическим управлением и в сеточных лампах заключается в том, что в СВЧ-приборах торможение осуществляется

Переводчиков Владимир Иннокентьевич, главный научный сотрудник.

Матвеев Николай Викторович, начальник отделения.

Стальков Павел Михайлович, старший научный сотрудник.

Трухачев Иван Михайлович, начальник сектора.

Шапенко Валентина Николаевна, ведущий научный сотрудник.

Шапиро Александр Львович, начальник отделения.

Щербаков Александр Владимирович, начальник отдела.
ФГУП "Всероссийский электротехнический институт имени В. И. Ленина".

Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12.

Тел. (495) 361-90-88. E-mail: ivan.truhachev@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2011 г.

© Переводчиков В. И., Матвеев Н. В., Стальков П. М., Трухачев И. М., Шапенко В. Н., Шапиро А. Л., Щербаков А. В., 2012

после взаимодействия электронного потока с СВЧ-полями. Это приводит к большому разбросу электронов по энергиям и затрудняет достижение глубокого торможения. Применение принципа рекуперации в приборах с сеточным управлением упрощает задачу, так как в этом случае мы имеем дело с невозмущенным потоком электронов. Задача, однако, усложняется тем, что в ключевом электронном приборе существенным является минимизация габаритов и массы.

Рассмотрим более подробно особенности создания ЭЛВ. Принцип был предложен и запатентован ФГУП ВЭИ [1, 2]. На рис. 1 приведена схема распределения потенциалов в трехэлектродном ЭЛВ в проводящий период.

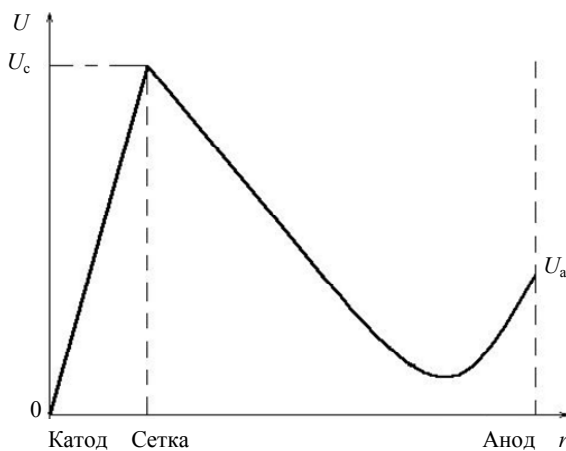


Рис. 1. Распределение потенциалов в проводящий период в ЭЛВ

Из приведенной схемы очевидна основная проблема создания ЭЛВ — не допустить возврата электронов на сетку (названную нами "ускоряющий электрод") при высоком потенциале последнего.

Электронный КПД ключевого прибора обозначим как отношение полезной мощности, коммутируемой прибором (мощности, выделяемой в нагрузку), к сумме коммутируемой мощности и мощности потерь в приборе:

$$\eta = \frac{D_{\hat{e}i i}}{D_{\hat{e}i i} + D_{\hat{i}i \hat{o}}} = \frac{1}{1 + \frac{D_{\hat{i}i \hat{o}}}{D_{\hat{e}i i}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ком}} = U_{\text{ком}} \cdot I_a$ — произведение напряжения на нагрузке при разомкнутом ключе, умноженное на ток нагрузки (или анодный ток) в проводящий период.

Очевидно, что определяющим величину электронного КПД является отношение мощности потерь к коммутируемой мощности. Назовем это отношение "относительными потерями" при коммутации, которое может быть представлено в виде следующего выражения:

$$F = \frac{P_{\hat{i}i \hat{o}}}{P_{\hat{e}i i}} = \frac{U_{\hat{o} \hat{y}} \cdot I_{\hat{o} \hat{y}} + U_a \cdot I_a}{U_{\hat{e}i i} \cdot I_a} = \frac{U_{\hat{o} \hat{y}}}{U_{\hat{e}i i}} \cdot \frac{I_{\hat{o} \hat{y}}}{I_a} + \frac{U_a}{U_{\hat{e}i i}}, \quad (2)$$

где F — относительные потери;
 $U_{y, \hat{y}}, I_{y, \hat{y}}$ — напряжение ускоряющего электрода и ток на него;
 U_a, I_a — потенциал анода в проводящий период и анодный ток.

Из (2) следует, что три фактора определяют минимизацию потерь и эффективность работы ЭЛВ:

минимальное значение напряжения ускоряющего электрода $\frac{U_{\hat{o} \hat{y}}}{U_{\hat{e}i i}}$ при необходимой величине тока I_a ;

минимизация потерь тока в цепи ускоряющего электрода $\frac{I_{\hat{o} \hat{y}}}{I_a}$;

понижение напряжения анода относительно коммутируемого $\frac{U_a}{U_{\hat{e}i i}}$.

Чтобы можно было сравнивать между собой высоковольтные ключевые лампы, введем параметр качества:

$$K = U_{\hat{e}i i} \cdot \frac{1}{R_{\hat{a}i}} = \frac{U_{\hat{e}i i} \cdot I_a}{U_a}, \quad (3)$$

где $R_{\text{вн}} = U_a/I_a$ — статическое внутреннее сопротивление прибора.

Параметр K весьма условно характеризует качество ключевых приборов. Есть и другие параметры, более полно учитывающие различные аспекты применения приборов. Однако предложенный нами вариант наиболее простой и характеризует главную проблему при разработке данного класса приборов, а именно, достижение малого значения статического внутреннего сопротивления при коммутации высокого напряжения.

Задачу создания ЭЛВ с высоким электронным КПД при высоком значении K можно более наглядно конкретизировать, переписав уравнение для отношения потерь в виде:

$$F = \left(\frac{I_{\hat{o} \hat{y}}}{I_a} + \frac{U_a}{U_{\hat{o} \hat{y}}} \right) \cdot \frac{U_{\hat{o} \hat{y}}}{U_{\hat{e}i i}}. \quad (4)$$

Мы будем называть отношение $U_{y, \hat{y}}/U_{\text{ком}}$ глубиной торможения электронного потока в условиях минимальных потерь тока на ускоряющем электроде. Понятно, что сумма относительных потерь определяется тщательностью и качеством формирования электронного потока.

Величина коммутируемого напряжения определяет электрическую прочность прибора и, тем

самым, величину расстояния от ускоряющего электрода до анода. Необходимость получить большой ток в приборе при минимальном статическом внутреннем сопротивлении требует приближения ускоряющего электрода к катоду. Создается существенно несимметричная картина распределения потенциала в пространстве в проводящий период, что затрудняет достижение достаточно глубокого торможения.

Основной вопрос — создание оптимальной электронно-оптической системы (ЭОС) — определяется созданием условий, затрудняющих возврат электронов на ускоряющий электрод, когда его потенциал существенно выше анодного. Существуют два пути создания рациональных ЭОС [3].

Первый путь — использование анода в форме полого цилиндра наподобие модели абсолютно черного тела. Этот метод широко используется для повышения КПД СВЧ-приборов типа лампы бегущей волны (ЛБВ). Его целесообразно применять при создании ключевых приборов с высоким коммутирующим напряжением при относительно малом токе. Он был использован нами при создании прибора ЭЛВ 2/200, предназначенного для коммутации напряжения 100—200 кВ при токе не более 2 А.

Для создания прибора на большие токи, используемых в силовой электронике, нами был предложен второй тип ЭОС. Он представляет собой многолучевую ленточную ЭОС с торможением электронов на поверхности анода, ортогональную падающему потоку.

Построение такой ЭОС без полости в аноде и развитой за счет протяженных ленточных пучков эмиссионной системой позволяет получить большие значения токов в минимальных габаритах.

На рис. 2 представлена схема расположения ленточных пучков и формирующих их электродов в многолучевом ЭЛВ.

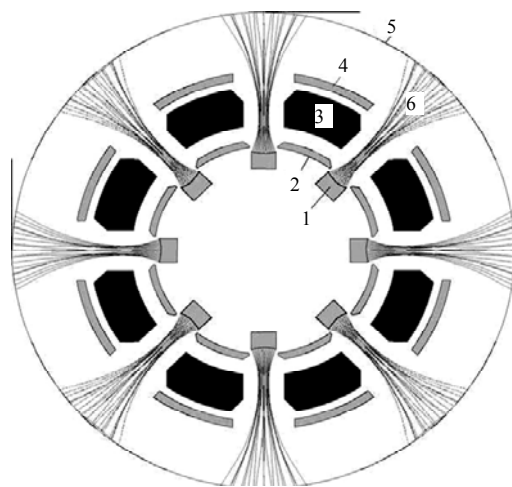


Рис. 2. Схема ЭОС многолучевого ЭЛВ:

1 — катод; 2 — прикатодный (формирующий) электрод;
3 — ускоряющий электрод; 4 — защитный электрод; 5 — анод;
6 — пучок электронов

Достоинством такой системы является также то, что, проводя разработку ЭОС одного луча, мы можем при создании ЭЛВ компоновать их в количестве, определяемом практически поставленной задачей. Например, нами была разработана ЭОС ЭЛВ 4/40 на ток до 8 А, имеющая 8 лучей, и на ток до 50 А, имеющая 24 луча.

Основные проблемы, возникающие при реализации подобного потока электронов, связаны с тем, что в ЭЛВ прикатодная и прианодная области имеют принципиально различные геометрические характеристики. Катод и расстояние "катод—ускоряющий электрод" имеют малые размеры благодаря тому, что необходимо иметь максимальную плотность тока (единицы А/см²) и большой перванс по ускоряющему электроду. Анодная область, наоборот, характеризуется достаточно большими размерами, диктуемыми величиной коммутируемого напряжения и возможностью рассеивать большую мощность на аноде. Последнее существенно, так как даже при малом падении напряжения на аноде в стационарном ключевом режиме необходимо обеспечивать возможность увеличения анодного напряжения в переходных режимах при стабилизации и регулировании тока в нагрузке.

Исследование возможности аналитического решения совместно двух областей по методике Пирса показало, что для этого необходимо иметь протяженный эквипотенциальный участок в области ускоряющего электрода. Это приводит к увеличению массогабаритных показателей прибора. Поэтому было предложено использовать дополнительный, т.н. "защитный" электрод, имеющий потенциал катода. Линза, образованная ускоряющим и защитным электродами, позволяет на стадии отработки ЭОС организовать ортогональные к эквипотенциальной поверхности в области анода электронные траектории потока.

Для уменьшения эффекта возврата электронов от анода к ускоряющему электроду служит образующийся перед анодом при глубоком торможении электронов минимум потенциала. Форма минимума определяется только геометрическими характеристиками линзы (зеркала), образованной защитным электродом и анодом.

На рис. 3 приведено распределение потенциала в плоскости симметрии луча в зависимости от глубины торможения электронного потока.

Методика расчета электронно-оптических систем, основанная на оптимизации результатов траекторного анализа, подкрепленных экспериментальными исследованиями одного луча, приведена в статье "Разработка электронно-оптических сис-

тем высоковольтных электронных приборов с торможением электронного потока на аноде” настоящего журнала. На рис. 4 приведены характеристики токовых потерь на управляющем электроде $I_{y,з}/I_k$ в зависимости от глубины торможения $U_a/U_{y,з}$, полученные в результате оптимизации на экспериментальном стенде.

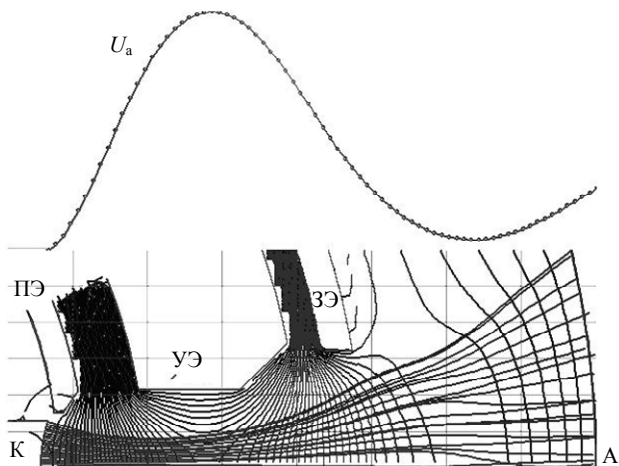


Рис. 3. Распределение потенциала в плоскости симметрии луча: К — катод; ПЭ — прикатодный (формирующий) электрод; УЭ — ускоряющий электрод; ЗЭ — защитный электрод; А — анод

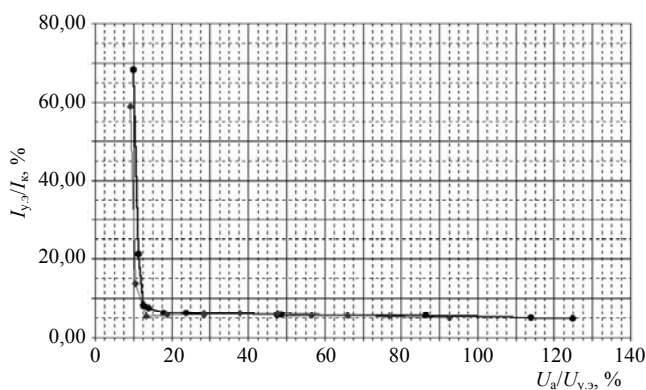


Рис. 4. Характеристики токовых потерь на управляющем электроде $I_{y,з}/I_k$ в зависимости от глубины торможения $U_a/U_{y,з}$. Данные двух разных опытов

Как это следует из рис. 4, может быть достигнута глубина торможения 10—15 % при потерях тока не более 5 %. Очевидно, что при реализации многолучевого прибора из-за несовершенства сборки будут получены более высокие потери.

На основании изложенных соображений были разработаны приборы типа ЭЛВ 4/40 на ток до 8 А в непрерывном режиме при напряжении коммутации 60 кВ, а также находящийся в стадии завершения разработки ЭЛВ 50/100 на ток до 50 А при напряжении коммутации 100 кВ. Разработка конструкторской документации и выпуск партии приборов осуществляется на заводе “Контакт” (г. Са-

ратов). На рис. 5 приведены вольт-амперные характеристики приборов, а на рис. 6 — фотографии ЭЛВ 4/40 и ЭЛВ 50/100.

Сопоставив характеристику глубины торможения (см. рис. 4) с вольт-амперной характеристикой ЭЛВ (см. рис. 5), можно сделать очевидный вывод, что характеристика глубины торможения в относительных единицах наглядно и исчерпывающе описывает обе (анодную и сеточную) характеристики.

Исследование возможности использования электровакуумных приборов в преобразовательных схемах для силовой электроники и энергетики

Разработка ЭЛВ позволила перейти к конкретной оценке возможности использования вакуумных ключевых приборов в силовой электронике и преобразовательной технике для линий электропередач.

Сопоставляя в общем виде характеристики управления силовых полупроводниковых приборов (СПП) типа IGBT и IGCT с характеристиками ЭЛВ, можно прийти к выводу, что коммутируемые мощности единичным прибором очень близки (около 10 МВт). Соотношение тока и напряжения в случае СПП (2000 А, 5 кВ) более удобное для использования в преобразовательных схемах по сравнению с ЭЛВ (50 А, 200 кВ). Как те, так и другие приборы легко использовать при параллельном включении. Несколько сложнее последовательное соединение, необходимое в полупроводниковых схемах при напряжении свыше 6 кВ. Эта проблема полностью отсутствует в ЭЛВ. Большим достоинством ЭЛВ являются значительно большие возможности рассеяния мощности и ряд других эксплуатационных характеристик (стойкость к ЭМИ и пробоям в приборе, высокая рабочая температура и т. д.). Однако необходимость реализации высоких значений токов привела к преимущественному использованию СПП в энергетических преобразователях.

Для оценки потерь при коммутации ЭЛВ и сопоставление их с ключами СПП были проведены исследования работы однофазного преобразовательного моста мощностью 100 кВт на ЭЛВ 4/40 в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с частотой дискретизации 1—2 кГц. На рис. 7 приведены осциллограммы напряжения и тока частотой 50 Гц, инвертированного мостом при входном постоянном напряжении. Там же показаны фронты импульса ШИМ, определяющие динамические потери.

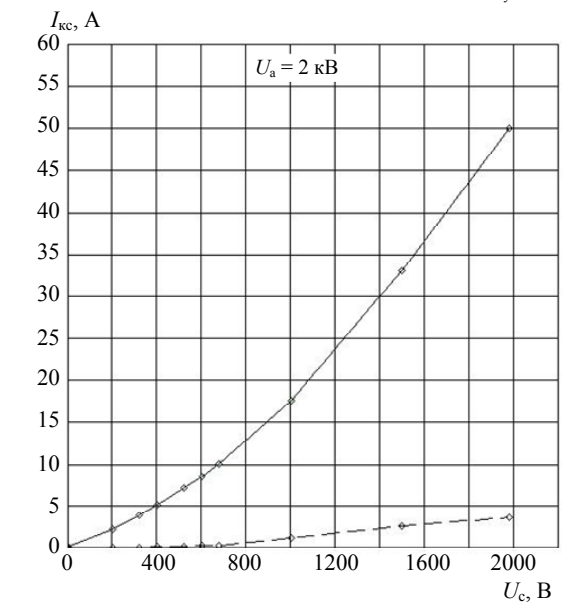
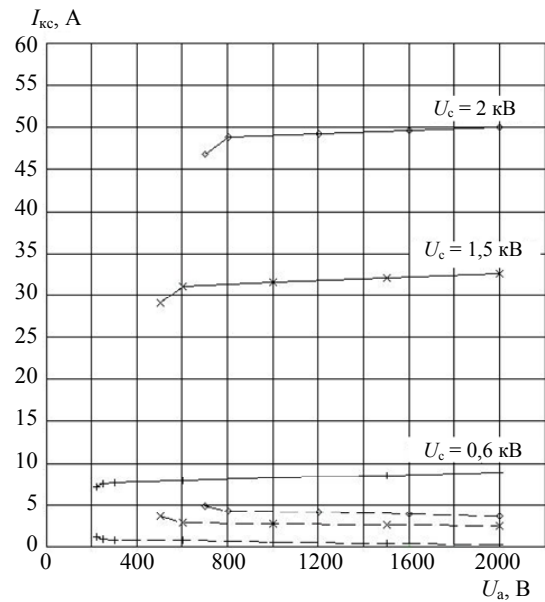
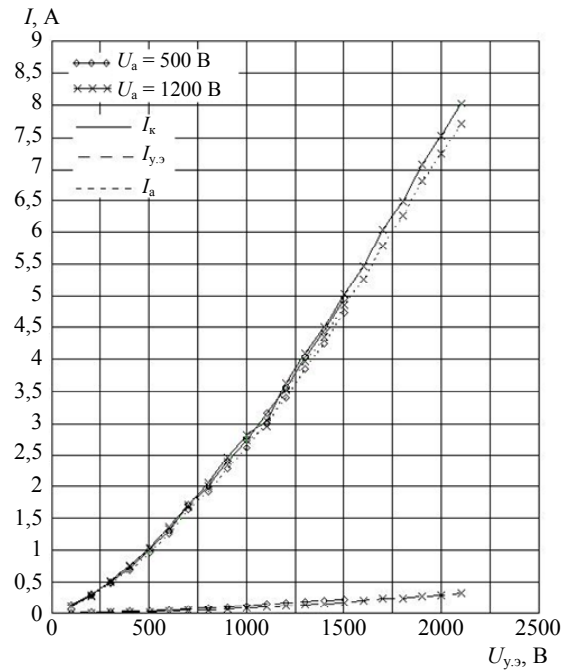
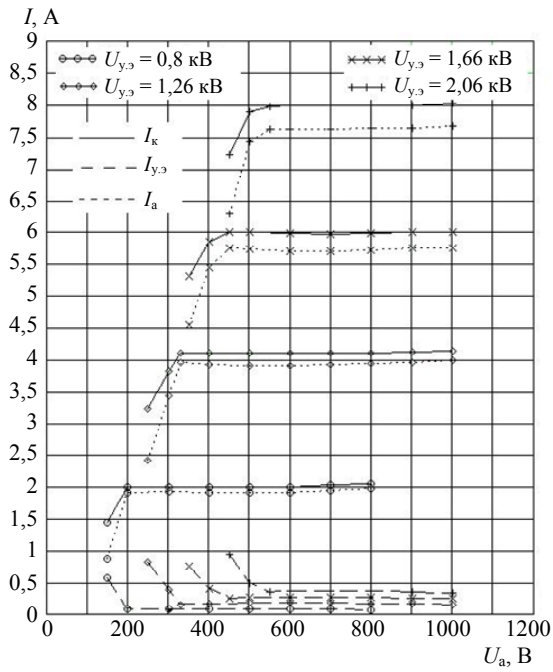


Рис. 5. Анодные (сверху) и сеточные (снизу) характеристики ЭЛВ 4/40 (слева) и ЭЛВ 50/100 (справа)

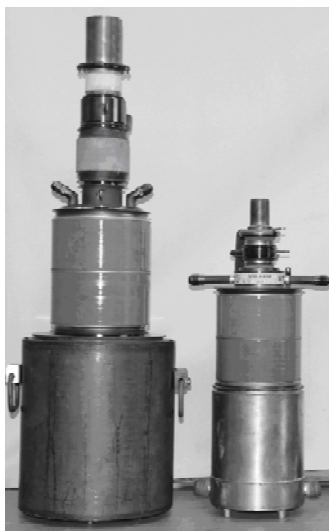


Рис. 6. Внешний вид ЭЛВ 50/100 (слева) и ЭЛВ 4/40

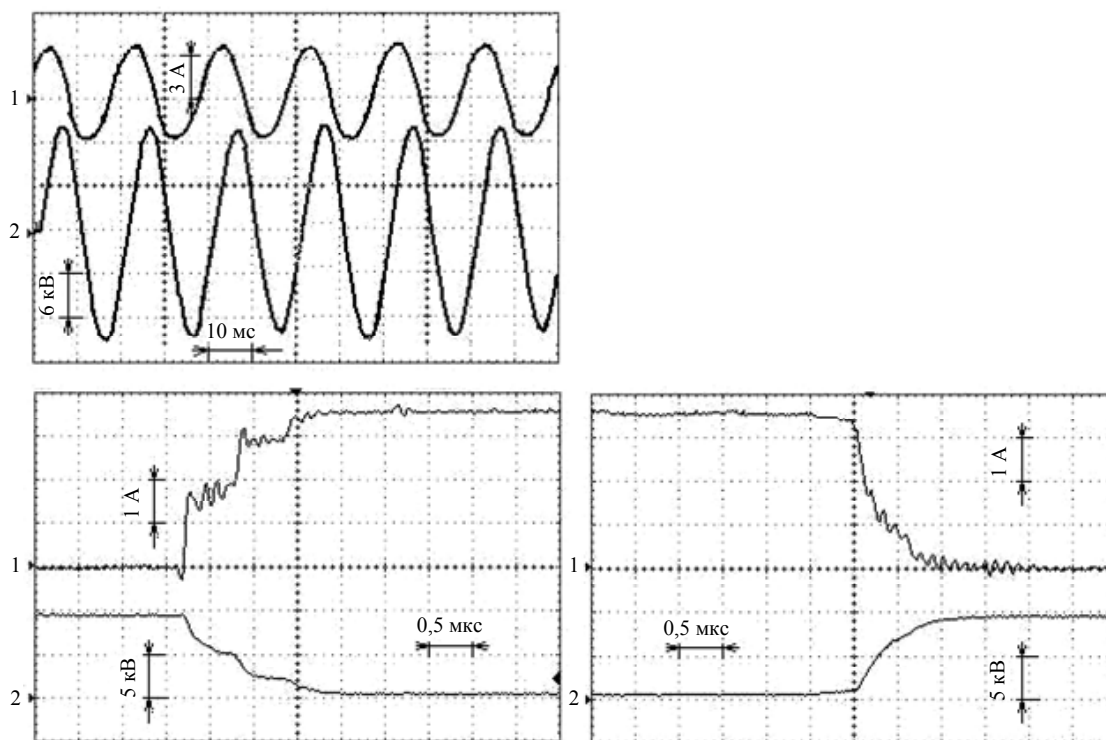


Рис. 7. Форма напряжения и тока на нагрузке 50 Гц при частоте ШИМ 2 кГц (сверху) и фронты импульса ШИМ

Полученные результаты позволили сделать заключение, что динамические потери при коммутации ЭЛВ составляют ~ 30 % статических потерь. В то же время в преобразователях на СПП динамические потери больше статических.

Проведенные исследования мостовой схемы позволили перейти к созданию экспериментального образца преобразователя на ЭЛВ мощностью 1 МВт, работающего при напряжении сети 35 кВ. Создание преобразователя такой мощности в режиме бестрансформаторного подключения уже позволяет оценить эффективность его работы и найти область применения в энергетике.

Экспериментальные исследования партии ЭЛВ 50/100, характеристики которых приведены на рис. 5, позволили оценить статические потери преобразователя на основе данного типа приборов. Ниже приведены расчетные параметры преобразователя мощностью 1 МВт при токе 30 А и напряжении 35 кВ.

$U_{y.э}, \text{кВ}$	$U_a, \text{кВ}$	$I_{y.э}, \text{А}$	$P_a, \text{кВт}$
1,4	0,52	6,3	15,6
$P_{y.э}, \text{кВт}$	$P_n, \text{кВт}$	$P_{\Sigma}, \text{кВт}$	$P_{\Sigma} / P_{ком}, \%$
8,8	7,2	35,0	3,5

Таким образом, суммарные статические потери, складывающиеся из потерь на аноде, ускоряющем электроде и мощности нагрева катода, составляют ~ 3,5 % от коммутируемой мощности. Расчетная величина динамических потерь, полученная на основе приведенных выше стендовых исследова-

ний, повышает общие относительные потери до 4—4,5 %.

Сопоставление с преобразователем на IGBT и IGCT мощностью 1—3 МВт, работающих при напряжении 0,6—6 кВ, показывает примерно такой же уровень потерь, но при этом в сети 35 кВ требуется использование высоковольтных трансформаторов с потерями 1—2 %.

Экспериментальный преобразователь на ЭЛВ 50/100 в виде трех двухполюсных переключателей (рис. 8) изготовлен и смонтирован в Истринском отделении ФГУП ВЭИ. Однако его наладка и экспериментальное исследование не окончены.

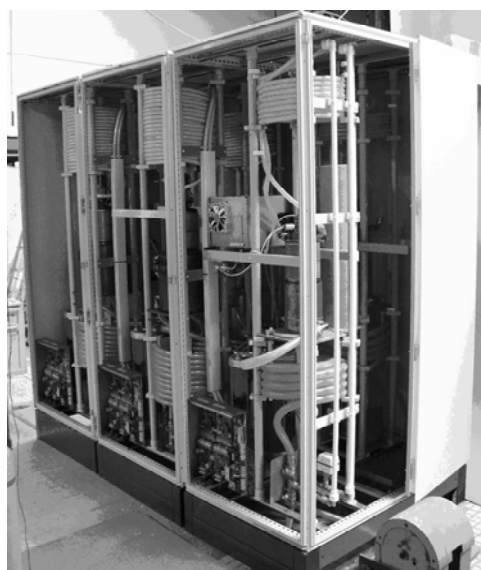


Рис. 8. Трехмодульный блок переключателя на ЭЛВ 50/100

Заключение

В работе приведены результаты разработки мощных ключевых электровакуумных приборов с высоким КПД — электронно-лучевых вентилей, проведено их количественное и качественное сравнение с силовыми полупроводниковыми приборами. Представлены результаты экспериментального исследования ЭЛВ в составе однофазного преобразовательного моста.

Оценка возможности создания преобразователя на основе разработанного прибора ЭЛВ 50/100 показывает, что при токе 80—100 А, который может быть реализован в приборе, уровень коммутируемой мощности может быть поднят до 3 МВт при суммарных потерях ~ 5 % от коммутируемой мощности.

При таком уровне мощности уже возможно создание бестрансформаторного преобразователя для сетей с напряжением 20—35 кВ, на основе которого может быть создан статический компенсатор реактивной мощности или объединенный ре-

гулятор мощности для кондиционирования систем электроснабжения ответственных потребителей мощностью 10—15 МВт. Такие системы могут быть предложены для крупных химических и металлургических заводов, а также спецобъектов. Это открывает перспективы применения преобразователя на ЭЛВ в энергетике.

Дополнительные преимущества вакуумных приборов по сравнению с полупроводниковыми, а именно, возможность управления величиной тока при коротком замыкании в нагрузке и более плавное отключение ее от сети, должно быть дополнительно изучено.

Литература

1. Будкер Г. И., Переводчиков В. И. Патент РФ. А. с. 367482 БИ.1973. № 8 МКИ Н01 21/10.
2. Переводчиков В. И., Шапенко В. Н., Трухачев И. М., Мурашов А. С., Стальков П. М. Патент РФ RU 2 338 292 С1 на изобретение “Электронно-лучевая лампа” от 10.11.2008.
3. Переводчиков В. И., Шапенко В. Н., Акимов П. И. // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. № 3. С. 24.

Perspectives of design and application of vacuum tubes in power electronics

*V. I. Perevodchikov, N. V. Matveev, P. M. Stalkov, I. M. Truhachev, V. N. Shapenko,
A. L. Shapiro, A. V. Shcherbakov*
All-Russian Electrotechnical Institute,
12 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
E-mail: ivan.truhachev@yandex.ru

The article deals with perspectives of application of powerful vacuum tubes. We describe the possibility and the way of increasing the efficiency of switching tubes, comparing characteristics of powerful vacuum tubes and semiconductors. The results of experimental investigation of models of vacuum tubes invertors are described. Parameters and characteristics of powerful vacuum tubes invertors for powerful electronics are estimated.

PACS: 85.45.Bz, 07.07.Mp, 07.50.Ek, 07.90.+c

Keywords: vacuum tube, efficiency, electron-beam valve, converter, electron-optical system.

Bibliography — 3 references.

Received September 22, 2011