

УДК 621.385.111: 621.385.112: 621.385.551: 621.396.61

Разработка электронно-оптических систем высоковольтных электронных приборов с торможением электронного потока на аноде

В. И. Переводчиков, П. М. Стальков

При использовании высоковольтных ключевых электронных ламп типа ЭЛВ в силовой электронике и энергетике необходимо минимизировать потери в приборе при учете множества факторов. Приводится методика использования многофакторной оптимизации при разработке ЭЛВ. Расчет сопоставляется с результатом экспериментальных исследований электронно-оптической системы. По этой же методике разработана электронно-оптическая система ЭЛВ с дополнительным управляющим электродом для использования в усилительно-генераторном режиме.

PACS: 41.75.Fr, 41.85.Ne, 41.85.Ja, 07.07.Mr, 07.50.Ek, 07.57.Nm

Ключевые слова: электронный пучок, электронно-оптическая система, многофакторная оптимизация, электровакуумный прибор, КПД, электронно-лучевой вентиль.

Введение

Высоковольтные электронные приборы с торможением электронного потока на аноде обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными электровакуумными приборами. Благодаря своим преимуществам разработанные в ВЭИ в течение ряда лет электронно-лучевые вентили (ЭЛВ) нашли применение в различных областях. Высокие результаты, полученные в области исследований электронно-оптических систем (ЭОС) с торможением электронного потока, позволили создать прибор ЭЛВ 2/200 для применения в системах питания пылеулавливающих электрофильтров тепловых электростанций и электронно-лучевых сварочных установках, ЭЛВ 4/40 для применения в качестве модулятора импульсов в радиоэлектронных устройствах большей мощности и ЭЛВ 50/100 для применения в системе питания мощных гиротронов.

В то же время развитие техники открывает перед высоковольтными приборами новые области применения. Развитие преобразовательной техники ставит задачу создания устройств кондиционирования электроэнергии, статических компенсаторов реактивной мощности. К таким устройствам предъявляется прежде всего требование минимальных потерь энергии при высоком значении кондиционируемого напряжения, так эти устройства целесообразно подключать к линиям электропере-

дач напрямую, без промежуточных трансформаторов. Это требование ставит новые задачи по разработке ЭОС.

При формировании электронного потока в ЭОС возможен режим, при котором потенциал на аноде ниже потенциала на ускоряющем электроде (УЭ). При этом отбор тока с катода производится высоким потенциалом на ускоряющем электроде. Отношение потенциала анода в проводящий период к потенциалу ускоряющего электрода мы называем глубиной торможения пучка. На рис. 1 представлены электроды ЭЛВ. Применение принципа торможения электронного потока позволяет получить снижение потерь в ключевом приборе в открытом состоянии, при этом в закрытом состоянии прибор способен выдерживать напряжения в десятки и даже сотни кВ. Время перехода от закрытого состояния к открытому измеряется десятками микросекунд.

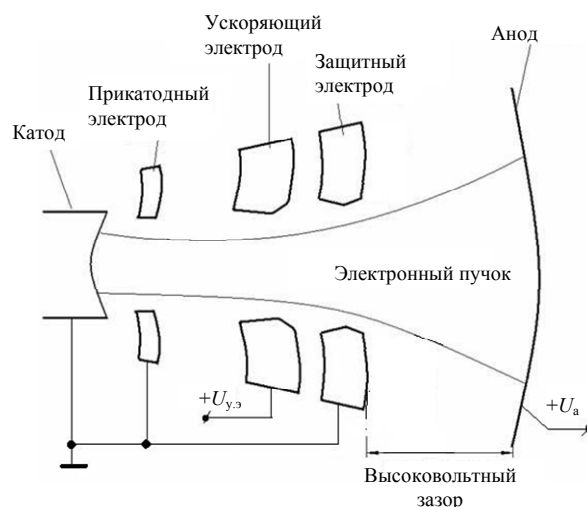


Рис. 1. ЭОС ЭЛВ

Разработка приборов с торможением электронного потока представляет собой сложную задачу,

Переводчиков Владимир Иннокентьевич, главный научный сотрудник.

Стальков Павел Михайлович, старший научный сотрудник. ФГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина".

Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Тел. (495) 361-90-31. E-mail: stalkov@vei.ru

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2011 г.

© Переводчиков В. И., Стальков П. М., 2012

требующую учета множества факторов, что является следствием принципиальных физических противоречий.

Основной задачей данной работы является улучшение удельных характеристик (отнесенных к массе или объему) приборов, прежде всего удельного первеанса. Наилучшим решением для достижения этой цели является применение многолучевых электронно-оптических систем, состоящих из однотипных ячеек-лучей, возможно более рационально расположенных в объеме прибора.

Многолучевые приборы и многофакторная оптимизация

На рис. 2 представлен поперечный разрез многолучевого прибора с ленточными пучками и торможением электронного потока. Таким образом, работу можно свести к улучшению характеристик отдельного луча, что достигается оптимизацией ЭОС.

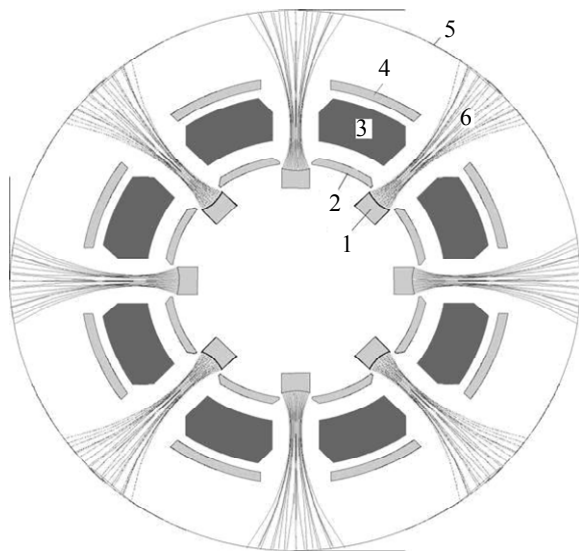


Рис 2. Компонировка многолучевого прибора:

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

Для оптимизации, необходимо наличие критерия оптимизации, по значению которого возможно бы было сравнивать различные варианты приборов и делать выводы о целесообразности вносимых изменений в конструкцию прибора. Этот критерий должен зависеть от многих характеристик прибора и удовлетворять следующим требованиям:

- однозначность определения;
- учет возможно большего количества параметров прибора;
- увеличение любого из параметров, повышающих качество прибора (например первеанс), должно вызывать увеличение значения коэффициента;

- увеличение любого из параметров, снижающих качество прибора (например потери), должно приводить к уменьшению значения коэффициента.

Для удобства комплексной оценки и возможности дополнительной оптимизации общий рассматриваемый критерий целесообразно представлять как сумму коэффициентов, учитывающих различные группы параметров — электрические, массогабаритные, удельные. Так как рассматриваемый критерий предназначен для улучшения качества прибора, целесообразно назвать его *суммарный коэффициент качества*.

Важно отметить, что в силу разнородности учитываемых параметров суммарный коэффициент качества представляет собой число, не имеющее физического смысла, и определяется по формуле:

$$K_{\Sigma} = K_{\text{электр}} + K_{\text{массгаб}} + K_{\text{уд}}, \quad (1)$$

где

$$\hat{E}_{\text{уеаёоё}} = \sum_i k_i \cdot p_i, \quad (2)$$

здесь k_i — весовой коэффициент, p_i — электрический параметр.

Значения весовых коэффициентов определяются из значимости учитываемого параметра для качества прибора и характера влияния этого параметра на качество прибора (параметры, определяющие рост потерь, учитываются с отрицательным знаком).

$$\hat{E}_{i \text{ амааа}} = \sum_i \frac{k_i}{p_i}, \quad (3)$$

где k_i — весовой коэффициент, p_i — массогабаритный параметр.

Так как целью оптимизации является снижение массы и уменьшение объема прибора, коэффициент качества по массогабаритным параметрам представляет собой сумму обратных величин.

$$\hat{E}_{\text{оа}} = \sum_i k_i \cdot p_i, \quad (4)$$

где k_i — весовой коэффициент, p_i — удельный параметр.

Так как ЭЛВ является высоковольтным коммутационным прибором, важное значение имеют удельные параметры прибора, нормированные как по массе, так и по объему.

Физические параметры прибора можно рассортировать по следующим основным категориям: электрические, массогабаритные, удельные.

К электрическим параметрам ЭЛВ относятся: ток катода прибора, первеанс прибора (определяемый по току катода и напряжению ускоряющего электрода), минимальное отношение $U_a/U_{y,з}$ в открытом приборе (предельная глубина торможе-

ния), напряжение на ускоряющем электроде в открытом приборе, максимальное анодное напряжение в закрытом приборе (коммутируемое напряжение), отношение $I_{y,3}/I_k$ в открытом приборе (относительные токовые потери), напряжение ускоряющего электрода, при котором ток катода равен нулю при максимальном анодном напряжении (запирающее напряжение).

К массогабаритным параметрам ЭЛВ относятся: масса прибора, объем прибора, габариты прибора.

В качестве удельных параметров определяют: удельное коммутируемое напряжение по массе (отношение коммутируемого напряжения к массе прибора), удельное коммутируемое напряжение по объему прибора (отношение коммутируемого напряжения к объему прибора), удельный коммутируемый ток по массе (отношение коммутируемого тока к массе прибора), удельный коммутируемый ток по объему (отношение коммутируемого тока к объему прибора), удельная коммутируемая мощность по массе (отношение коммутируемой мощности к массе прибора), удельная коммутируемая мощность по объему (отношение коммутируемой мощности к объему прибора).

Такой подход дает возможность учитывать в зависимости от требований решаемой задачи либо суммарно все параметры, либо какую-то из категорий параметров, имеющую наиболее важное значение. Важным вопросом является определение значений весовых коэффициентов в формулах (1)—(4). Значение коэффициентов k_i должно отражать важность параметра p_i с точки зрения решаемой задачи.

Применение многофакторной оптимизации дает возможность существенно улучшить полезные свойства прибора, повысить его качество. Методика работы состоит из следующих этапов. Во-первых, необходимо произвести расчет электронно-оптической системы прибора с применением различных методов, как аналитических и численных, в частности, методом траекторного анализа, и уже на этом этапе возможно оценить большинство параметров будущего прибора и даже провести частичную оптимизацию ЭОС. Далее необходимо экспериментальное исследование ЭОС на однолучевом макете для точного определения всех параметров прибора, в том числе и тех, которые невозможно в настоящее время определить расчетным путем. К таким параметрам относятся, например, ток ускоряющего электрода. Также на этапе экспериментальных исследований результат учитывает те явления, которые не были учтены при расчетах (например, влияние краевых эффектов).

Полученные в результате исследований однолучевого макета ЭОС экспериментальные данные обрабатываются в целях определения параметров полного многолучевого прибора. Например, оче-

видно, что первеанс N -лучевого прибора будет в N раз выше первеанса однолучевого макета, однако относительные токовые потери в многолучевом приборе будут неизменны при условии идентичности каждого из лучей ЭОС. На основании обработанных таким образом данных исчисляется суммарный коэффициент качества прибора, и производится сравнение полученного результата с результатами других ЭОС. После сравнения результатов делается вывод о предпочтительности той или иной системы и определяется, какие параметры системы нуждаются в дальнейшем улучшении в первую очередь, после чего цикл повторяется с измененной ЭОС. Процесс повторяется до достижения результата, соответствующего поставленной задаче. Таким образом, применение методики многофакторной оптимизации позволяет добиться существенного улучшения качества прибора.

Пример расчета

В качестве примера рассмотрим применение многофакторной оптимизации ЭОС при создании высоковольтного коммутирующего прибора ЭЛВ 50/100.

Для высоковольтного коммутирующего прибора было разработано два варианта ЭОС: один — с требованием максимальной электрической прочности, другой — с меньшей электрической прочностью и большим первеансом. С учетом результатов траекторного анализа соответствующие значения коэффициентов качества прибора представлены на рис. 3. Для коммутации максимально высокого напряжения 150—170 кВ в ЭОС необходим высоковольтный зазор в 32 мм. Однако в ЭОС с таким большим высоковольтным зазором затруднительно осуществить глубокое торможение электронного потока вследствие образования виртуального катода в прианодной области.

Для того чтобы избежать этого явления придется снизить объемный заряд электронного пучка, а это означает снижение тока и первеанса системы. Это возможно реализовать при увеличении компрессии пучка. На основе такой ЭОС построен прибор ЭЛВ 50/100М. Очевидно, что достижение сочетания требований большой электрической прочности и глубокого торможения пучка электронов возможно лишь ценой снижения первеанса прибора. Однако эта компромиссная ЭОС имеет существенное преимущество, а именно, узкий пучок с высокой компрессией заполняет менее 10 % диафрагмы ускоряющего электрода, что означает низкий уровень токовых потерь и высокую устойчивость системы к возможным флуктуациям и искажению взаимного положения электродов. Однако для использования прибора в качестве ключевого элемента для устройств кондиционирования элект-

троэнергии основным требованием является первеанс системы, а требования к высоковольтному зазору снижены до 100 кВ. Таким образом, возможна разработка ЭОС с более высоким первеансом. Для достижения требуемого результата необходимо уменьшить компрессию электронного пучка при сохранении его ламинарности. На такой ЭОС построен прибор ЭЛВ 50/100М2. Обе разработанные системы имеют свои преимущества, но для целей применения в электроэнергетике наиболее подходящей является ЭОС ЭЛВ 50/100М2, что подтверждается расчетом суммарного коэффициента качества прибора, представленного на рис. 3. Для сравнения там же приведен расчет K_{Σ} для однолучевого ЭЛВ 2/200, обладающего малым током и высоким уровнем коммутируемого напряжения 200 кВ.

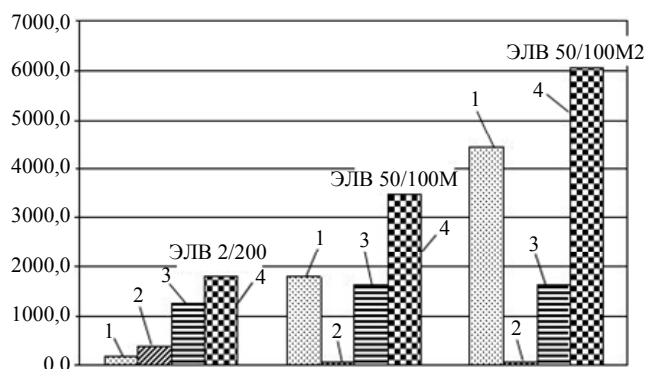


Рис. 3. Расчет коэффициентов качества по параметрам: 1 — электрическим; 2 — массогабаритным; 3 — удельным; 4 — коэффициент общий

Таким образом, применение суммарного коэффициента качества позволяет формализовать рассуждения о пригодности различных ЭОС к специфическим требованиям применения приборов.

Вышеизложенные результаты относятся к высоковольтным ключевым приборам, работающим в режиме "замкнутый ключ — разомкнутый ключ". Достигнутые результаты позволяют продолжить исследования в новом направлении, а именно, создании электронных приборов с управлением электронным потоком мощных усилительных и генераторных ламп.

Генераторные и усилительные лампы

Очевидно, что применение принципа торможения электронного потока в мощных усилительных и генераторных лампах не столь эффективно, как в ключевых, ввиду того, что уровни напряжения источников анодного напряжения, как правило, не превышают 10—12 кВ. Однако уменьшение потерь даже на несколько процентов в мощных приборах полезно, и, безусловно, преимущество торможения электронного потока будет только

возрастать при создании импульсных ламп большой мощности с напряжением анодного источника до 35 кВ и выше.

Возможность повышения электронного КПД за счет глубокого торможения электронного потока вытекает из структуры выражения для КПД лампового генератора:

$$\eta = \frac{P_{\dot{e}}}{P_0} = \frac{1}{2} g_1 \xi, \quad (5)$$

где P_k — колебательная мощность;
 P_0 — мощность, рассеиваемая на аноде;
 g_1 — коэффициент формы напряжения, определяемый углом отсечки;
 ξ — коэффициент использования анодного напряжения, определяемый по формуле:

$$\xi = 1 - \frac{E_{amin}}{E_a}, \quad (6)$$

где E_a — напряжение анодного источника питания;
 E_{amin} — минимальное значение потенциала анода лампы в колебательном режиме при условии отсутствия существенного тока на управляющей сетке.

Считая, что от конструкции ЭОС лампы зависит в большей мере параметр ξ в случае применения торможения электронного потока на аноде, возможно довести значение этого параметра до 0,9. Для работы в усилительном и генераторном режимах необходимо введение в ЭОС дополнительной управляющей сетки, т. е. сделать ЭОС близкой к тетроду при сохранении преимущества ЭОС с торможением — потенциал экранной сетки может быть выше анодного.

Чтобы сохранить преимущество высокого электронного КПД, необходимо сохранить компоновку электродов, а управление током осуществлять при помощи прикатодного электрода, изолированного от катода. Потенциал же управляющего электрода целесообразно сделать постоянным. Таким образом, при подаче на прикатодный электрод нулевого потенциала распределение потенциала в ЭОС будет соответствовать распределению потенциала в ЭЛВ, а при подаче на прикатодный электрод отрицательного потенциала возможно реализовать управление током пучка. Во избежание путаницы с терминологией по аналогии с классическими тетрами прикатодный электрод необходимо называть первой (управляющей) сеткой, а ускоряющий электрод — второй (экранной) сеткой генераторной лампы с торможением электронного пучка. Такой прибор будет сочетать в себе управление низким потенциалом свойственным тетрам с высоким электронным КПД, свойственным ЭЛВ. Обозначения электродов приведены на рис. 4.

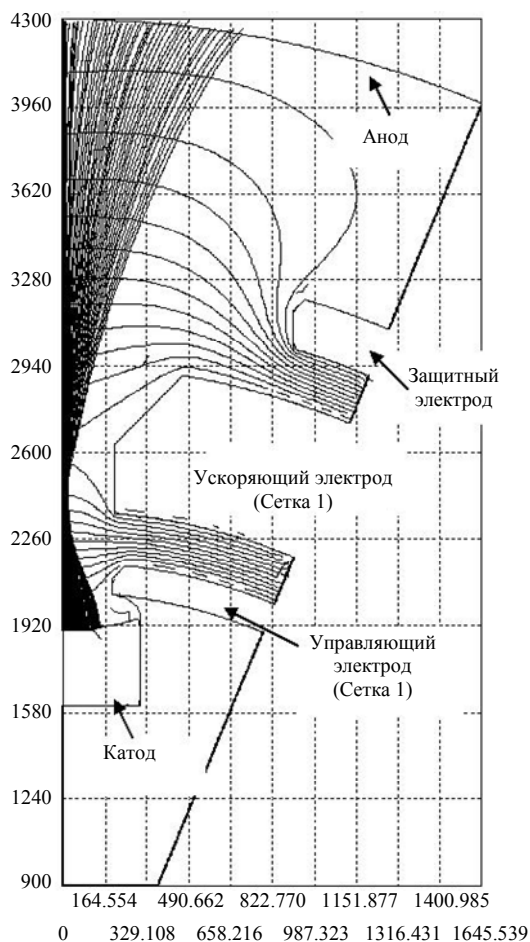


Рис. 4. Генераторные лампы с торможением электронного пучка

Проведенные исследования показали, что очевидные преимущества управления низким по абсолютному значению сигналом отрицательной полярности требуют изменить подход к созданию ЭОС. Для достижения высокого значения крутизны сеточной характеристики необходимо, в частности, изменить форму катода, заменив вогнутый катод плоским. Результаты экспериментальных исследований сеточной характеристики для систем с плоским и вогнутым катодом представлены на рис. 5. Также особенностью ЭОС с управля-

щей сеткой является принципиальное противоречие между ростом первеанса системы и снижением крутизны управляющей характеристики, что диктует необходимость оптимизации формы управляющей сетки и возможному изменению ее конструкции, а также необходимость многофакторной оптимизации ЭОС.

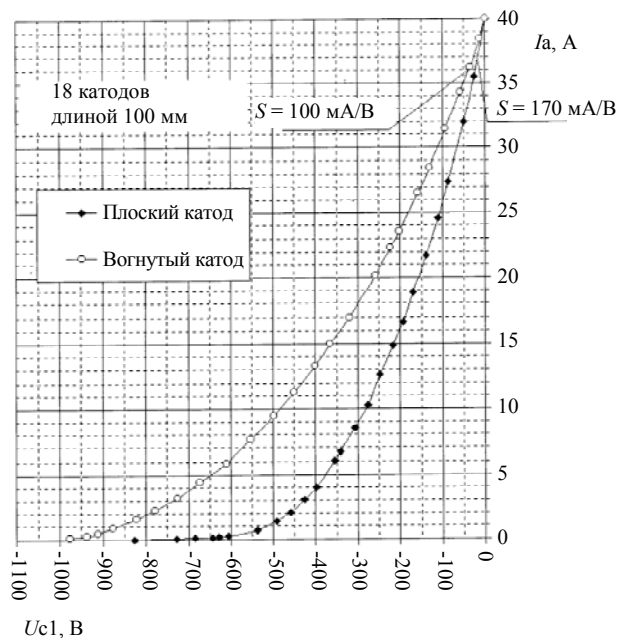


Рис. 5. Сеточные характеристики ЭОС

Заключение

1. Для достижения лучших результатов при создании ЭОС необходимо применение усовершенствованной методики многофакторной оптимизации с использованием коэффициентов качества. При помощи этой методики возможно существенно снизить потери в приборе, что открывает новые возможности применения ЭЛВ.

2. Для использования преимуществ ЭОС с торможением электронного потока при создании генераторных и усилительных ламп в ЭОС ЭЛВ необходимо ввести дополнительный управляющий электрод.

Design of the electron-optic system for high-voltage electron switching tubes with electron breaking at the anode

V. I. Perevodchikov, P. M. Stalkov

All-Russian Electrotechnical Institute,

12 Krasnokazarmennaya str, Moscow, 111250, Russia

E-mail: stalkov@vei.ru

For using high-voltage switching tubes EBV in powerful electronics it is necessary to minimize losses by consideration of many factors. A method of many-factor optimization system in EBV calculation is presented. The calculation is compared with the experimental study of electron beam system. This method is also used in design of the electron optical system of EBV with additional control electrode for using in amplifier and generator regime.

PACS: 41.75.Fr, 41.85.Ne, 41.85.Ja, 07.07.Mp, 07.50.Ek, 07.57.Hm

Keywords: electron beam, electron-optic system, many-factor optimization, electric vacuum device, electron-beam switch.

Bibliography — 0 references.

Received September 22, 2011