

УДК 621.385

Проблемы оптимизации электронно-оптических систем электронно-лучевых вентиляей

П. М. Стальков

ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

Рассмотрены проблемы проектирования электронно-оптических систем (ЭОС) электронно-лучевых вентиляей (ЭЛВ) с точки зрения повышения удельных объемных параметров приборов. Предложен новый критерий качества ЭОС ЭЛВ. Рассмотрен подход к увеличению удельной коммутируемой мощности ЭЛВ. Проведено сравнение метода увеличением числа катодных узлов и увеличения токоотбора с катода с помощью коэффициента эффективности ЭОС. Приведены примеры разработанных ЭОС с их преимуществами и недостатками.

Работа является первым шагом в создании методики инженерного расчета и оптимизации параметров ЭЛВ с использованием целевой функции при решении задач траекторного анализа. В результате должна быть получена система решений, позволяющая при выборе основного критерия электрических характеристик найти оптимальные геометрические формы и размеры электродов.

Цель данной работы — найти вид целевой функции и значения весовых коэффициентов и проанализировать с ее помощью разработанные и разрабатываемые приборы.

При разработке приборов в силу противоречивости физических закономерностей часто сложно бывает определить, достигнуто ли улучшение параметров прибора в целом, так как рост одних параметров вызывает снижение других. Для комплексной оценки качества ЭЛВ необходимо ввести коэффициент, учитывающий все наиболее важные параметры прибора.

Коэффициент эффективности ЭЛВ может быть использован как для комплексной оценки качества приборов, так и в качестве целевой функции для решения задачи оптимизации при разработке ЭОС ЭЛВ.

Исходя из поставленной задачи можно сформулировать требования к формуле вычисления коэффициента эффективности:

- 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 коэффициент эффективности целесообразно пред-

ставлять как сумму коэффициентов, учитывающих различные группы параметров: электрические, массогабаритные, удельные.

В силу разнородности учитываемых параметров коэффициент эффективности не имеет физического смысла, исчисляется в баллах и определяется по формуле

$$K_{eff} = K_{el} + K_{mas-gab} + K_{spec}, \quad (1)$$

где

$$K_{el} = \sum_i k_i p_i,$$

где 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).

$$K_{mas-gab} = \sum_i \frac{k_i}{p_i},$$

где k_i — весовой коэффициент;

p_i — массогабаритный параметр.

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

$$K_{spec} = \sum_i k_i p_i,$$

где k_i — весовой коэффициент;

p_i — удельный параметр.

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

Пример расчета K_{eff} и значения весовых коэффициентов приведены в таблице.

Технические характеристики

Параметр	Коэф.	ЭЛВ 4/40		ЭЛВ 4/40М		ЭЛВ 4/40М2		ЭЛВ 2/200		ЭЛВ 50/100	
		Параметр	Сумма	Параметр	Сумма	Параметр	Сумма	Параметр	Сумма	Параметр	Сумма
Электрические параметры											
I , А	10,0	8,0	80,0	8,0	80,0	8,0	80,0	2,0	20,0	50,0	500,0
P , мка/ $V^{3/2}$	10,0	83,0	830,0	64,0	640,0	178,0	1780,0	5,0	50,0	113,0	1130,0
Торм., %	-10,0	23,0	-230,0	23,0	-230,0	14,5	-145,0	30,0	-300,0	20,0	-200,0
$U_{из}$, В	-0,1	2102,0	-210,0	2500,0	-250,0	1264,1	-126,4	5428,8	-542,9	5806,7	-580,7
$U_{а}$, В	-0,1	483,5	-48,4	575,0	-57,0	183,3	-18,3	1628,7	-162,9	1161,3	-116,1
$U_{сост}$, кВ	6,0	60,0	360,0	60,0	360,0	60,0	360,0	200,0	1200,0	120,0	720,0
$U_{ем}$, В	0,1	-300,0	-30,0	-300,0	-30,0	-800,0	-80,0	-300,0	-30,0	-300,0	-30,0
Перехват, %	-10,0	3,9	-39,0	5,6	-56,0	5,6	-56,0	5,0	-50,0	5,0	-50,0
Коэф. эффективн. по электрическим парам.		712,4		456,5		1794,3		184,3		1373,2	
Массогабаритные параметры											
Объем, м ³	30,0	0,1	224,5	0,1	448,0	0,0	897,9	0,1	375,0	0,4	78,4
Масса, кг	30,0	30,0	1,0	21,4	1,4	15,3	2,0	30,0	1,0	65,0	0,5
Коэф. эффективн. по массогабаритным пар.		225,5		450,3		899,8		376,0		78,9	
Удельные параметры											
Уд. ком. напр., кВ/кг	30,0	2,0	60,0	2,8	84,0	3,9	117,6	6,7	200,0	1,8	55,4
Уд. ком. напр., кВ/м ³	0,3	448,9	134,7	897,9	269,4	1795,7	538,7	2500,0	750,0	313,7	94,1
Уд. ком. ток, А/кг	50,0	0,3	13,3	0,4	18,7	0,5	26,1	0,1	3,3	0,8	38,5
Уд. ком. ток, А/м ³	1,0	59,9	59,9	119,7	119,7	239,4	239,4	25,0	25,0	130,7	130,7
Уд. ком. мощн., кВт/кг	1,0	16,0	16,0	22,4	22,4	31,4	31,4	13,3	13,3	92,3	92,3
Уд. ком. мощн., кВт/м ³	0,1	3591,5	179,6	7182,9	359,1	14365,9	718,3	5000,0	250,0	15686,3	784,3
Коэф. эффект. по удельным парам.		463,4		873,3		1671,5		1241,7		1195,3	
Коэф. общий		1401,3		1780,1		4365,6		1801,9		2647,4	

Гистограмма расчета коэффициента эффективности для различных моделей ЭЛВ приведена на рис. 1.

Из приведенного примера расчета видно, как полно коэффициент эффективности учитывает особенности каждого прибора. Так, например, для одних приборов наибольший вклад в сумму вносят электрические параметры, для других — удельные и массогабаритные.

Благодаря этому можно сравнивать между собой приборы различных назначений (высоковольтные и сильноточные) по единому параметру. Например, высоковольтный ЭЛВ 2/200 имеет малый перванс, но обеспечивает коммутацию

напряжения до 200 кВ. Сильноточный ЭЛВ 50/100 способен коммутировать токи до 50 А при коммутируемом напряжении до 100 кВ. Однако по удельным характеристикам приборы близки. Также по коэффициенту эффективности возможно сравнение ЭЛВ с приборами-аналогами других типов.

Особенно удобно сравнивать с помощью коэффициента эффективности однотипные приборы. При этом коэффициент качества является универсальным критерием оптимизации приборов. Примером является оптимизация ЭЛВ 4/40, проводимая для увеличения удельных параметров прибора.

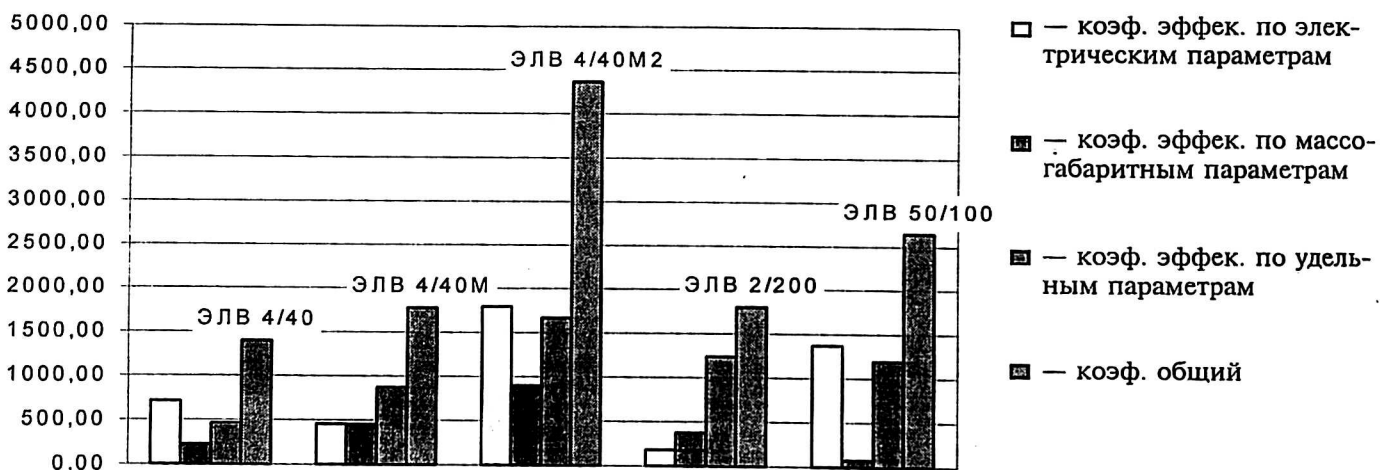


Рис. 1. Пример расчета коэффициента эффективности ЭЛВ

Пути улучшения удельных массовых характеристик ЭЛВ

Наиболее массивным элементом ЭЛВ является водоохлаждаемый анод, следовательно, для повышения удельных параметров ЭЛВ по массе необходимо уменьшение тепловыделения на аноде, что достижимо путем уменьшения анодного потенциала в проводящий период, т. е. увеличение глубины торможения при сохранении величины анодного тока.

Пути улучшения удельных объемных характеристик ЭЛВ

На сегодняшний день наиболее приемлемой схемой компоновки многолучевого ЭЛВ является компоновка на основе пирсовской оптики. При решении задачи получения большего тока возможны два подхода: 1) увеличение числа электронных пучков (пушек) при сохранении тока каждого пучка; 2) увеличение тока каждого пучка при уменьшении их количества. Каждый путь имеет свои преимущества и недостатки.

Положительные свойства 1-го подхода:

- легкость увеличения тока;
- малый коэффициент заполнения пучком диафрагмы ускоряющего электрода, что обеспечивает устойчивость сохранения низкого уровня относительных токовых потерь от различных дефектов сборки прибора, таких как перекосы и т. п.

Недостатки 1-го подхода:

- увеличение габаритов прибора;
- усложнение конструкции из-за увеличения числа катодных узлов;

- низкий первеанс (необходимость управления более высоким потенциалом сетки).

Положительные свойства 2-го подхода:

- уменьшение габаритов прибора;
- уменьшение анодного потенциала (снижение анодных потерь);
- высокий первеанс прибора (снижение потенциала управляющей сетки).

Недостатки 2-го подхода:

- большой коэффициент заполнения пучком диафрагмы ускоряющего электрода (широкий пучок), что выдвигает повышенные требования к юстировке и формоустойчивости системы.

В процессе оптимизации ЭЛВ 4/40 были разработаны три варианта прибора: ЭЛВ 4/40, ЭЛВ 4/40М, ЭЛВ 4/40М2. В первом варианте прибора использована электронно-оптическая система, построенная на принципе "узкого заполнения" пучком диафрагмы ускоряющего электрода, представленная на рис. 2, а. Конструктивно прибор построен с использованием ребристого изолятора ИАКВ-150. Фотография прибора представлена на рис. 3, а. В процессе модернизации ЭЛВ 4/40 была изменена электронно-оптическая система прибора. Вместо индивидуальных прикатодных электродов был применен единый прикатодный электрод, что позволило получить более ламинарный электронный пучок, увеличить глубину торможения. Вместе с тем произошло некоторое снижение первеанса системы.

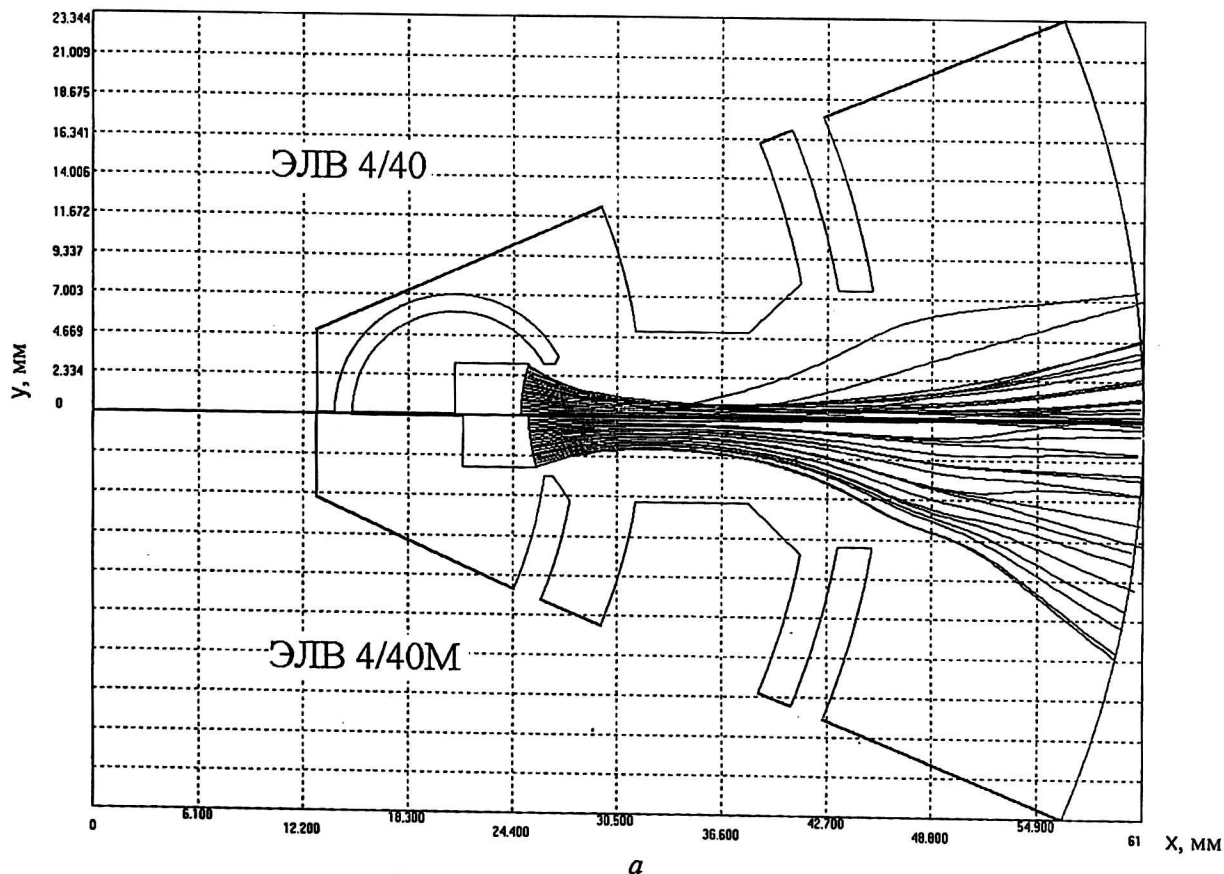


Рис. 2. Электронно-оптическая система:
а — ЭЛВ 4/40 и ЭЛВ 4/40М

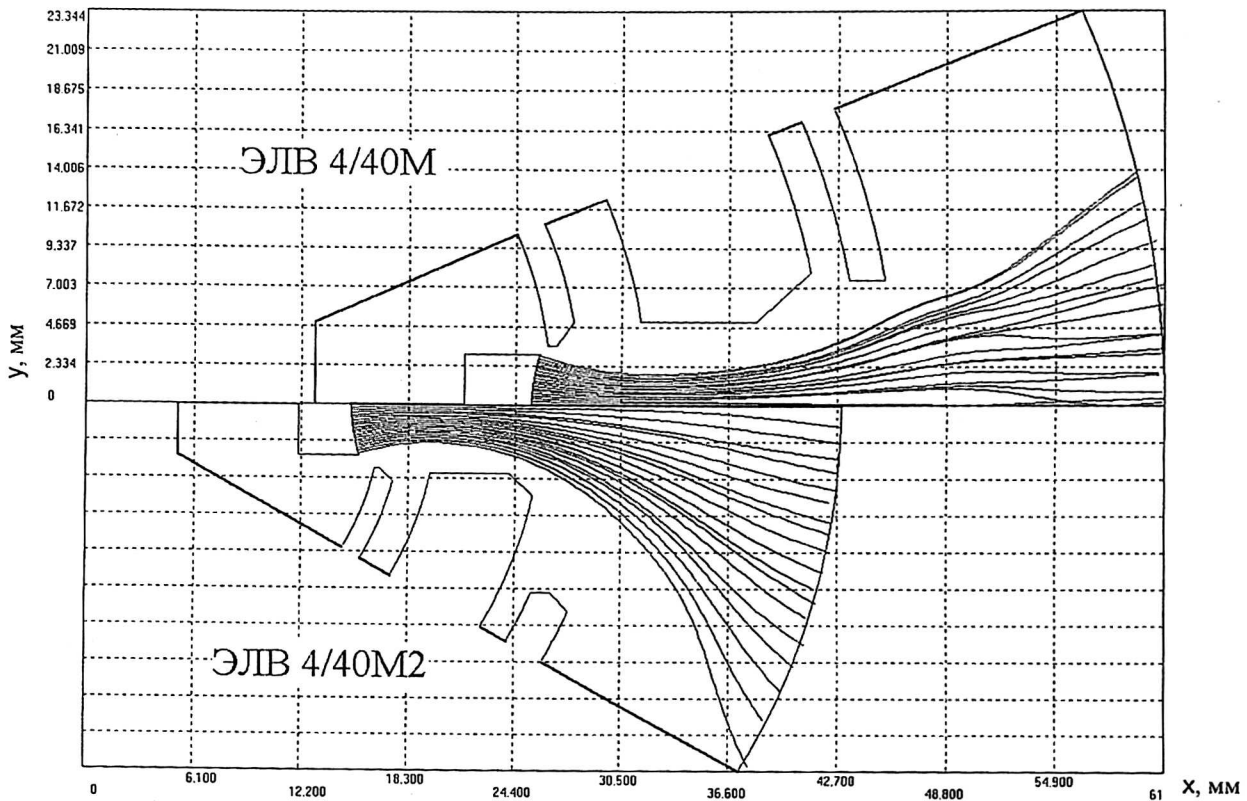


Рис. 2. Окончание:
б — ЭЛВ 4/40М и ЭЛВ 4/40М2

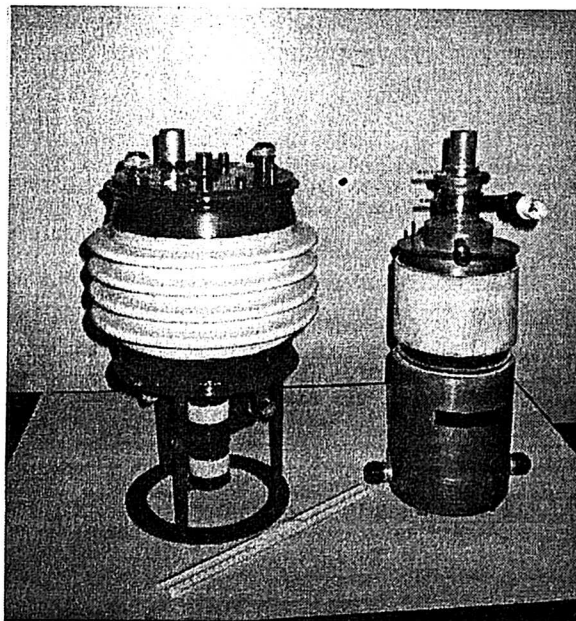


Рис. 3. Общий вид:
а — ЭЛВ 4/40; б — ЭЛВ 4/40М

Также было изменено конструктивное решение прибора, использован небристый изолятор ИАКВ-130 меньшего диаметра, что позволило уменьшить габариты и массу прибора.

При расчете коэффициента эффективности значение для ЭЛВ 4/40 по формуле (1) составило

$$K_{eff} = K_{el} + K_{mas-gab} + K_{spec} = 712,4 + 225,5 + 463,4 = 1401;$$

для ЭЛВ 4/40М

$$K_{eff} = K_{el} + K_{mas-gab} + K_{spec} = 456,5 + 450,3 + 873,2 = 1780.$$

Таким образом, снижение коэффициента эффективности по электрическим параметрам было компенсировано повышением коэффициентов эффективности по массогабаритным и удельным параметрам.

Для дальнейшего улучшения прибора была переработана электронно-оптическая система. Было сокращено количество пучков с 8 до 6, что позволило расположить катоды ближе к оси симметрии прибора, тем самым уменьшив габариты. Применение пучков с меньшей компрессией позволило значительно увеличить первеанс системы и добиться большей ламинарности электронного пучка, что, в свою очередь, позволило увеличить глубину торможения. Электронно-оптические системы ЭЛВ 4/40М и ЭЛВ 4/40М2 представлены на рис. 2, б.

Для прибора ЭЛВ 4/40М2 значение коэффициента эффективности по формуле (1)

$$K_{eff} = K_{el} + K_{mas-gab} + K_{spec} = 1794,2 + 899,8 + 1671,5 = 4357.$$

Очевиден рост значения коэффициента эффективности, отражающий улучшение качества прибора.

Выводы

1. Для оценки качества коммутирующих приборов ЭЛВ введен коэффициент эффективности прибора, учитывающий все наиболее важные параметры прибора.

2. Коэффициент эффективности может быть использован в качестве целевой функции при оптимизации электронно-оптических систем ЭЛВ.

Problems of optimization of electron-optical systems for electron gates

P. M. Stalkov

The All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

Problems of designing the electron-optical systems (EOS) for electron gates (EG) have been surveyed from a point of view of increasing the per-unit-volume parameters of devices. The new measure of quality is offered for EOS. The approach to magnification of commuted power by EG has been surveyed. The matching of a method is done by magnification of number of cathode units and magnification of marking current from the cathode through the EOS effectiveness ratio. The examples of the designed EOS are given with viewing their advantage and deficiencies.