

Научная статья

УДК 621.384.658

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33

Источник высоковольтного питания ускорителя ЭЛВ-15

Николай Константинович Куksанов¹

Денис Сергеевич Воробьев²

Рустам Абельевич Салимов³

Сергей Николаевич Фадеев⁴

¹⁻⁴ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹ N.K.Kuksanov@inp.nsk.su

² djdenson@mail.ru

³ rsalimov41@mail.ru

⁴ S.N.Fadeev@inp.nsk.su

Аннотация

Статья описывает моделирование высоковольтного источника питания для ускорителя ЭЛВ-15. Рассматриваются электромагнитные параметры выпрямителя, оцениваются пульсации и стабильность ускоряющего напряжения. Рассчитана напряженность электрического поля в источнике.

Ключевые слова

высоковольтный выпрямитель, ускоритель электронов, ЭЛВ

Для цитирования

Куksанов Н. К., Воробьев Д. С., Салимов Р. А., Фадеев С. Н. Источник высоковольтного питания ускорителя ЭЛВ-15 // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 23–33. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33

The High Voltage Source for the ELV-15 Accelerator

Nikolay K. Kuksanov¹, **Denis S. Vorobev**²

Rustam A. Salimov³, **Sergey N. Fadeev**⁴

¹⁻⁴ Budker Institute of Nuclear Physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

¹ N.K.Kuksanov@inp.nsk.su

² djdenson@mail.ru

³ rsalimov41@mail.ru

⁴ S.N.Fadeev@inp.nsk.su

Abstract

The article describes modelling of the high voltage source of the ELV-15 accelerator. The electromagnetic parameters of the rectifier, the magnet field distribution, the parameters of primary and secondary winding are considered. Ripples and stability of the accelerating voltage are evaluated. The strength of the electric field in the source is considered.

Keywords

high voltage rectifier, particle accelerator, ELV

© Куksанов Н. К., Воробьев Д. С., Салимов Р. А., Фадеев С. Н., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 23–33
Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 23–33

For citation

Kuksanov N. K., Vorobev D. S., Salimov R. A., Fadeev S. N. The High Voltage Source for the ELV-15 Accelerator. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 23–33. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33

Введение

Основой создаваемого источника высокого напряжения является класс ускорителей ЭЛВ (источники высокого напряжения ускорителей), таким образом, наследуется концепция, лежащая в основе конструкции этих ускорителей и все ее преимущества. Ускорители ЭЛВ достаточно подробно описаны [1–3].

Наиболее важными являются электромагнитные параметры и напряженность электрического поля в колонне высоковольтного выпрямителя. Для определения параметров высоковольтного генератора решено использовать метод подобия электромагнитных процессов в высоковольтных генераторах, иными словами, метод параметрической экстраполяции. Суть метода заключается в расчете одним и тем же способом параметров нового генератора и существующего аналогичного устройства с последующим сравнением результатов расчетов. Полагаем, что корреляция реальных параметров с расчетными будет одинаковой для обоих случаев. При использовании упрощенной модели, погрешности расчетов программы не окажут влияния на соотношение реальных параметров. Такой подход являет собой дальнейшее развитие метода расчета высоковольтных генераторов на основе реальных физических полей.

Другой подход, основанный на эквивалентной индуктивной схеме, не является в полной мере адекватным, поэтому мы и вернулись к физическим методам. Действительно, высоковольтный генератор состоит из 80 выпрямительных секций, имеющих различные коэффициенты связи с первичной обмоткой и друг с другом. Помимо этого, сама катушка вторичной обмотки состоит из 50 слоев с различными внутренними емкостными коэффициентами. Расчет становится неоправданно сложным, и, следовательно, можно воспользоваться пусть и менее точными, но достаточно адекватными оценочными методами.

Электромагнитные параметры высоковольтного выпрямителя

За основу берется высоковольтный выпрямитель ускорителя ЭЛВ-8, с максимальной энергией 2,5 МэВ и мощностью 100 кВт. Чертежи выпрямителя ЭЛВ-8 и нового высоковольтного выпрямителя, который в дальнейшем будет именоваться ЭЛВ-15, приведены на рис. 1. Ускорители ЭЛВ представляют собой сосуд высокого давления, заполненный элегазом. Внутри сосуда расположены: первичная обмотка, состоящая из двух частей, высоковольтный выпрямитель со встроенной внутрь ускорительной трубкой, высоковольтный электрод и блок управления инжектором. К днищу котла прикреплены элементы вакуумной и электронно-оптической системы. Электроны, эмитированные катодом, расположенным на верхнем конце ускорительной трубки, на выходе из ускорительной трубки имеют полную энергию eU_0 . Величина тока пучка определяется температурой катода. Его нагрев обеспечивается блоком управления инжектором.

В табл. 1 приведены данные ускорителей ЭЛВ-8 и ЭЛВ-15.

Как следует из рис. 1 и табл. 1, отличие рассматриваемых высоковольтных выпрямителей состоит в следующем:

- увеличены диаметр и высота первичной обмотки;
- увеличено количество витков первичной обмотки;
- увеличен диаметр катушек вторичной обмотки (секций);
- увеличено число выпрямительных секций (т. е. высота колонны).

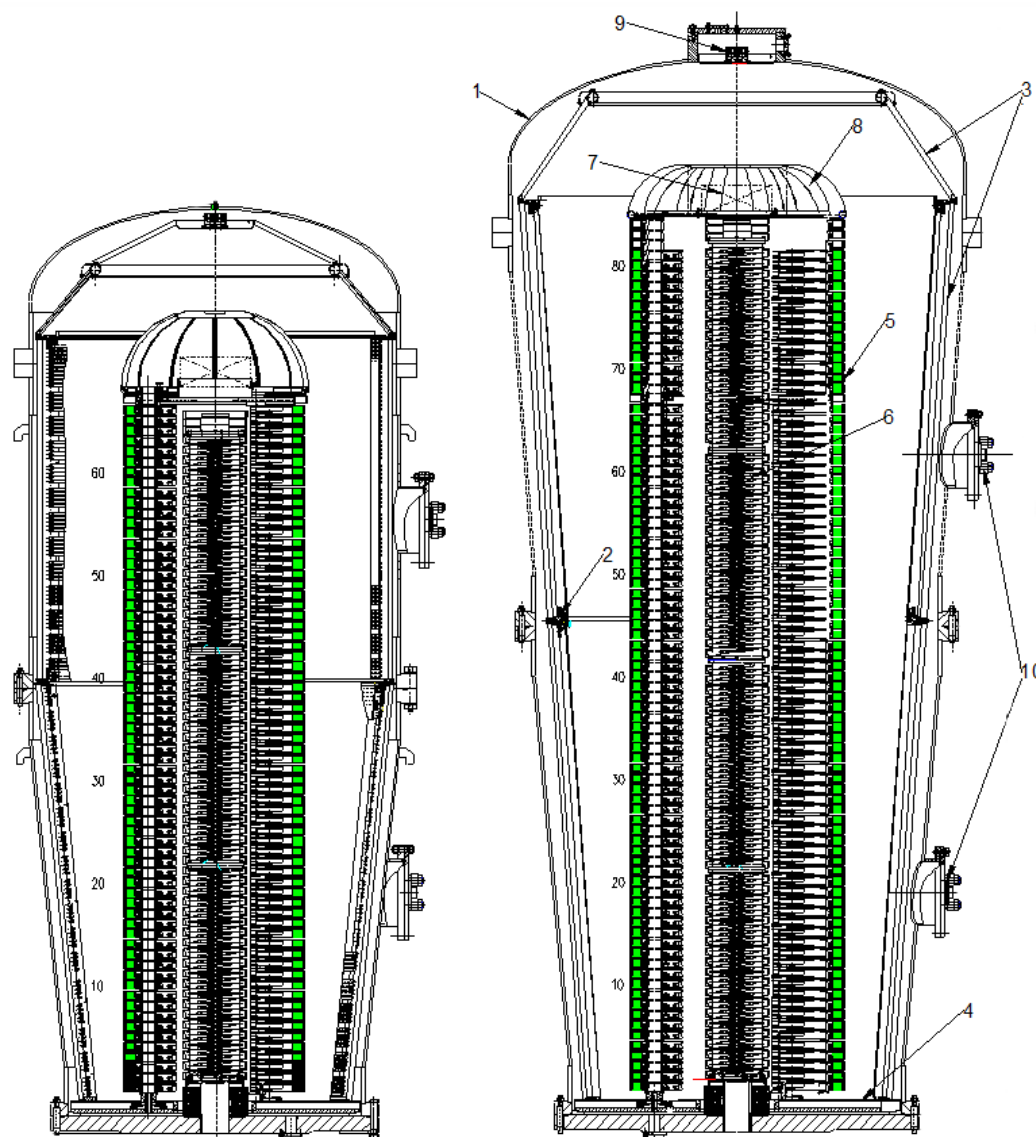


Рис. 1. Выпрямители ЭЛВ-8 (слева) и ЭЛВ-15 (справа):

- 1 – сосуд; 2 – первичная обмотка; 3, 4 – магнитопроводы; 5 – выпрямительные секции;
6 – ускорительная трубка; 7 – блок управления инжектором; 8 – высоковольтный электрод;
9 – оптические каналы управления инжектором; 10 – выводы первичной обмотки

Fig. 1. Rectifiers of ELV-8 (left) and ELV-15 (right):

- 1 – vessel; 2 – primary winding; 3, 4 – magnetic guides; 5 – rectifying sections; 6 – accelerating tube;
7 – injector control unit; 8 – high voltage electrode; 9 – optical channels for injector control;
10 – feedthrough connectors of the primary winding

Частота остается прежней – 400 Гц ($\omega = 2,5 \cdot 10^3$), хотя вопрос ее выбора может быть рассмотрен отдельно.

Численное моделирование производится в комплексе программ SAM [4], предназначенном для расчета аксиально-симметричных электромагнитных и электронно-оптических систем. В каждом горизонтальном сечении трансформатора магнитный поток внутри витка первичной обмотки состоит из потока внутри вторичной обмотки и потока в зазоре между обмотками.

Таблица 1

Данные ускорителей ЭЛВ-8 и ЭЛВ-15

Table 1

ELV-8 and ELV-15 parameters

	W_{11}/W_{12}	W_2	R_{2cp}	N	U_{2cp}	R_{1min}	R_{1max}	$L_{низ}/L_{верх}$	K
ЭЛВ-8	17/15	3000	337	65	38,5	525	680	1670/1382	0,28
ЭЛВ-15	17/16	3000	410	80	37,5	588	845	1900/1700	0,29

На рис. 2 показано расчетное распределение магнитного поля по высоте колонны. Витковое напряжение вторичной обмотки в режиме холостого хода или при малой нагрузке в каждом сечении будет

$$U_{2вит} = U_{1вит} \frac{R_2^2 - R_{тр}^2}{R_1^2 - R_{тр}^2},$$

где

$U_{1вит}$, $U_{2вит}$ – витковое напряжение первичной и вторичной обмоток, В;

R_1 , R_2 – текущий радиус первичной и вторичной обмоток, мм;

$R_{тр}$ – радиус экранирующих колец ускорительной трубки, мм.

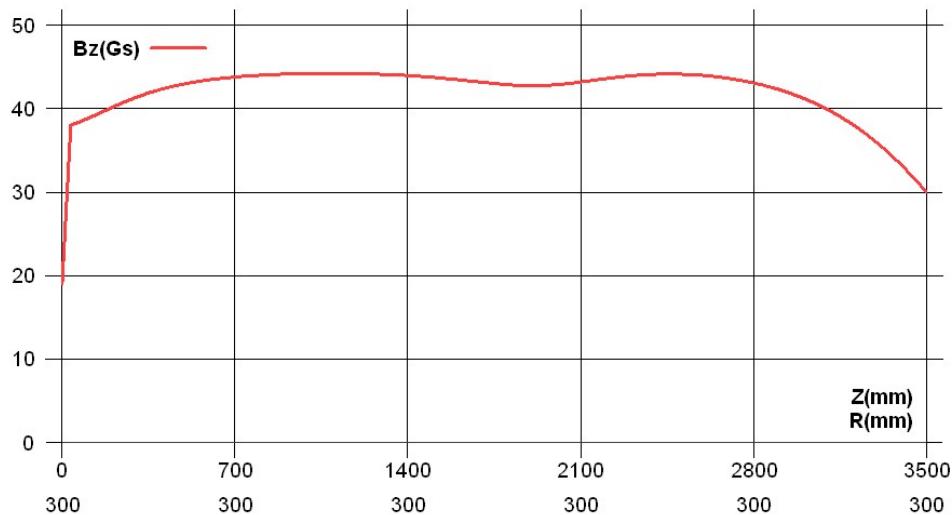
Рис. 2. Распределение по Z магнитного поля B_z

Fig. 2. SAM's model

Чтобы перейти от виткового напряжения к выпрямленному, число витков вторичной обмотки умножим на число секций, на 2 (поскольку выпрямитель построен по схеме удвоения напряжения) умножим на $\sqrt{2}$ (среднеквадратичное значение) и разделим на число витков первичной обмотки. Тем самым получаем выходное напряжение для высоковольтного выпрямителя с трансформатором без магнитного сердечника со схемой удвоения:

$$U_0 = KU_1 \frac{3000 * 65 * \sqrt{2} * 2}{32},$$

или, иначе:

$$U_1 = U_0 \frac{32}{K * 3000 * 65 * \sqrt{2} * 2},$$

где

U_0 – полное напряжение выпрямителя, В;

U_1 – напряжение первичной обмотки, В;

K – геометрический коэффициент, определяемый зависимостью R_1 от Z .

В случае однородного распределения потока внутри витка первичной обмотки (работа в режиме холостого хода или малого тока)

$$U_{2\text{вит}} = U_{1\text{вит}} \frac{R_2^2 - R_{\text{тр}}^2}{R_1^2 - R_{\text{тр}}^2} = U_{1\text{вит}} K.$$

Отсюда получаем

$$K = \frac{R_{2\text{ср}}^2 - R_{\text{тр}}^2}{R_{1\text{ср}}^2 - R_{\text{тр}}^2}.$$

Обозначения те же, что и в табл. 1, $R_{1\text{ср}}^2$ – среднее значение квадрата радиуса первичной обмотки по высоте (пропорционально средней площади витка этой обмотки). Значение K приведено в табл. 1, оно составляет 0,29 для ЭЛВ-15 и 0,28 для ЭЛВ-8.

Напряжение первичной обмотки для ускоряющего напряжения 3 МВ в режиме холостого хода, рассчитанное вышеуказанным способом, составляет 517 В. Рабочее напряжение секции при напряжении 3 МВ – 37,5 кВ, что соответствует среднему полю по колонне 38 Гс. В режиме холостого хода ток первичной обмотки для этого поля равен 380 А. Вклад тока вторичной обмотки, рассчитанный в виде соотношения витков первичной и вторичной обмоток с учетом схемы удвоения, составляет $\frac{1 * 2 * 80 * 3000}{33} = 14,5$ А / мА тока пучка.

При расчете тока первичной обмотки необходимо учитывать фазовый сдвиг между током намагничивания первичной обмотки и током нагрузки. Принимаем его близким к 90° . Это вносит некоторую погрешность, но не оказывает значительного влияния на результат. Значения тока первичной обмотки для холостого хода и при нагрузках 50, 75, 100 и 125 кВт электронного пучка приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения тока первичной обмотки ЭЛВ-15

Table 2

ELV-15 Accelerator

Параметр	Холостой ход	Нагрузка, кВт			
		50	75	100	125
Ток пучка, мА	0	16,6	25	33,3	41,6
Максимальная мощность, кВт	0	50	75	100	125
Ток первичной обмотки, А	380	450	525	614	705
Напряжение первичной обмотки, В	508	574	645	730	816

Для расчета напряжения первичной обмотки в рабочем режиме (под нагрузкой) рассмотрим структуру магнитного потока в сечении ее витка. Магнитный поток внутри первичной обмотки состоит из магнитного потока внутри вторичной обмотки и потока в зазоре между обмотками. При этом напряжение первичной обмотки U_1 будет

$$U_1 = U_{\text{лхх}} \frac{I_1}{I_{\text{лхх}}} (1 - K) + U_{\text{лхх}} K,$$

где $U_{\text{лхх}}$ – ее напряжение в режиме холостого хода, В.

Используя данные табл. 1 и значения тока первичной обмотки, рассчитаем U_1 и дополним табл. 2, тем самым получив параметры ЭЛВ-15 (напряжение и ток первичной обмотки).

Для проверки метода рассчитаем ускоритель ЭЛВ-8, параметры которого известны. Для этой машины K оказывается равным 0,28, т. е. выпрямители достаточно близки.

В случае ЭЛВ-8 для холостого хода находим

$$U_1 = U_0 \frac{32}{K * 3000 * 65 * 1,4 * 2} = 517 \text{ В.}$$

Реальное напряжение для 2,5 МэВ составляет 480 В. Небольшая разница в 7,5 % объясняется краевыми эффектами, разностью длин первичной и вторичной обмоток, и, кроме того, резонансная частота собранного выпрямителя составляет 400 Гц, т. е. отношение $\omega_{\text{раб}}/\omega_{\text{рез}} = 0,28$.

Наличие резонансной частоты эквивалентно увеличению площади вторичных обмоток. Для ЭЛВ-8 эта величина равна 1,09. Таким образом, мы имеем достаточно хорошее совпадение. Отметим также, что даже небольшая нагрузка устраняет эффект резонанса и расчетные параметры под нагрузкой близки к реальным. В табл. 3 приведено сравнение расчетных и реальных параметров для ускорителя ЭЛВ-8.

Таблица 3

Значения тока первичной обмотки ЭЛВ-8

Table 3

ELV-8 Accelerator

Параметр	Холостой ход	Нагрузка, кВт			
		50	75	100	125
Ток пучка, мА	0	20	30	40	50
Максимальная мощность, кВт	0	50	75	100	125
Ток первичной обмотки, А					
Расчетный	500	556	620	700	790
Реальный	419	540	600	722	820
Напряжение первичной обмотки, В					
Расчетное	517	557	605	665	732
Реальное	480	588	631	702	760

Пульсации ускоряющего напряжения

Обычно в ускорителях ЭЛВ, за исключением некоторых специфических применений, как, например, машин с выводом в атмосферу концентрированного пучка, величина пульсаций и стабильность энергии на уровне $\pm 5\%$ являются приемлемыми. В данном ускорителе электронный пучок выводится в атмосферу через окно из титановой фольги, и дополнительных требований к вышеуказанному параметру не предъявляется.

Токи 30 и 40 мА являются достаточно большой нагрузкой для высоковольтного выпрямителя, поэтому угол отсечки зарядного тока конденсаторов высоковольтного выпрямителя является большим. Для оценки примем: разрядное время $1/3$ полупериода, рабочая частота 400 Гц, напряжение выпрямителя 3 МВ. Тогда

$$\Delta U = \frac{I_0 T}{2C_{\text{экв}}^3} = \frac{40 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot 3} = 80 \cdot 10^3 = 40 \text{ кВ},$$

$$\frac{\Delta U}{U} = 2,6\% = \pm 1,3\%,$$

где

I_0 – ток высоковольтного выпрямителя, мА;

T – период питающего напряжения;

$C_{\text{экв}}$ – эквивалентная емкость высоковольтного выпрямителя.

Конструктивная емкость верхних секций составляет 3,6 пФ/секцию, фильтрующая емкость составляет 5100 пФ. Емкость высоковольтного электрода составляет 60 пФ. Поэтому $C_{\text{экв}} = (3,6 \cdot 5100)^{1/2} + 66 = 200$ пФ.

Как видно из результата – величина пульсаций составляет 1,3 %, что является приемлемым. Заметим, что в случае нулевого угла отсечки пульсации не превысят 4 %, что подтверждает правильность оценки.

Стабильность ускоряющего напряжения

Очевидно, такого же рода требования предъявляются и к стабильности энергии, т. е. среднему значению ускоряющего напряжения. Измерение энергии производится с помощью роторного вольтметра, расположенного над высоковольтным электродом. Роторный вольтметр, его устройство и принцип работы хорошо описаны в [3]. Существует две причины для неверного измерения энергии: изменение расстояния между высоковольтным электродом и вольтметром, и нестабильность вращения крыльчатки вольтметра.

Исходя из того, что температура в помещении ускорителя будет около 20 °С, а рабочая температура ускорителя 45 °С, разница температур составит $\Delta T = 45 - 20 = 25$ °С. Увеличение зазора за счет линейного расширения сосуда будет компенсироваться линейным расширением опор секций: $\Delta d = \Delta d_{\text{колонны}} - \Delta d_{\text{бака}}$. Численная оценка дает величину 0,14 мм, следовательно, $\Delta E/E = 1,9 \cdot 0,139 = 0,26$ %, что нас вполне устраивает.

Оценка точности роторного вольтметра в зависимости от нестабильности скорости вращения крыльчатки приведена в [2]. Здесь будет достаточно сказать следующее: для достижения точности измерений в 1 % необходимо поддерживать скорость вращения с точностью не хуже чем 20 % [2]. Асинхронный двигатель привода роторного вольтметра обеспечивает стабильность вращения в 5 %, следовательно, точность измерения составит 0,25 %.

Необходимо отметить, что дополнительно контроль напряжения высоковольтного выпрямителя можно проводить по напряжению первичной обмотки, поскольку оно, как и полное напряжение, не зависит от температуры бака и скорости вольтметра.

Напряженность электрического поля в высоковольтном генераторе

Геометрия высоковольтного выпрямителя является аксиальной, поэтому SAM позволяет легко и корректно проводить расчеты электрического поля. Проблема здесь заключается в том, что реальная поверхность может содержать отклонения и неровности, обусловленные процессом изготовления. Исходя из одинаковой технологии изготовления элементов выпрямителя метод параметрической экстраполяции также оказывается полезным.

Счет секций в колонне начинается снизу. Их полное число – 83. Три верхние секции являются «пустышками», т. е. напряжение на них отсутствует, а напряжение на следующих секциях составляет примерно 0,8 от среднего. За счет этого устраняется поперечная разность потенциалов между выпрямительной колонной и ускорительной трубкой, а также уменьшается напряженность поля на экранах верхних секций.

Рассмотрим напряженность электрического поля на элементах выпрямителя посегментно. Рассматриваются 3 версии: ЭЛВ-15, ЭЛВ-8 и ЭЛВ-15 с секциями ЭЛВ-8.

Напряженность на сегментах высоковольтного электрода

Схема расположения сегментов высоковольтного электрода приведена на рис. 3, напряженность на сегментах высоковольтного электрода – в табл. 4.

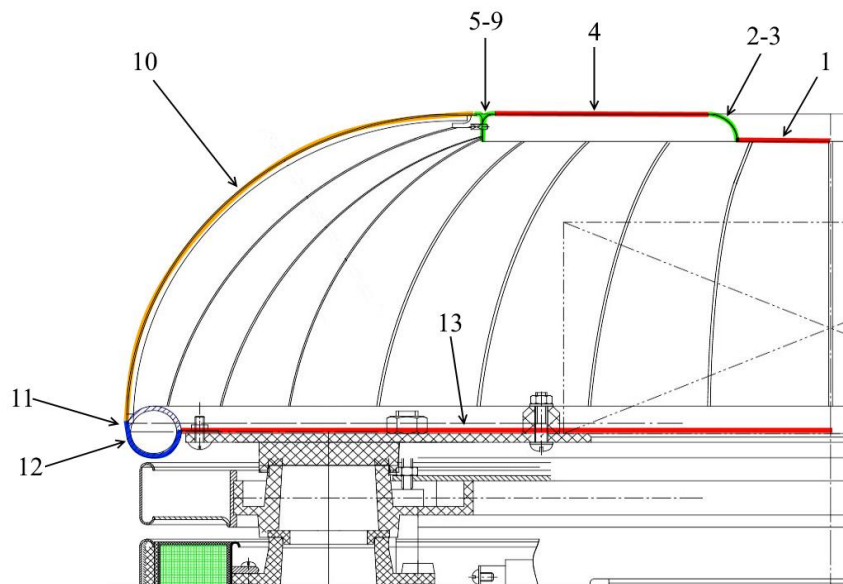


Рис. 3. Схема расположения сегментов высоковольтного электрода
Fig. 3. Segments of high voltage electrode

Таблица 4

Напряженность на сегментах высоковольтного электрода

Table 4

Voltage distribution over column sections

Параметры	Номер сегмента							
	3	4	5	8	9	10	11	12
E , кВ/см ЭЛВ-15, $U = 3$ МВ	120	111	117	129	118	171	180	192
E , кВ/см ЭЛВ-8, $U = 2,5$ МВ	117	112	119	134	125	171	185	196
E , кВ/см ЭЛВ-15, $U = 3$ МВ, секции от ЭЛВ-8	122	123	131	147	138	170	170	180

Как и следовало ожидать, максимальная напряженность находится на нижней кромке высоковольтного электрода. Это сделано во всех ЭЛВ, и этому есть следующее объяснение: газовые пробои на землю должны происходить с верхнего конца колонны, но никак не с нижележащих секций. Максимальная напряженность в ЭЛВ-15, т. е. в рассматриваемой машине – незначительно ниже, чем в ЭЛВ-8.

Напряженность на экранах выпрямительных секций

Рассматриваем 3 вышеуказанных варианта. Распределение напряжения по верхним секциям в случае ЭЛВ-15 с секциями ЭЛВ-8 такое же, как и у ЭЛВ-15, т. е. 3 верхние секции «пустышки». В случае ЭЛВ-8 верхним секциям присвоены номера такие же, как и у ЭЛВ-15, т. е. секции с одинаковыми номерами имеют одинаковую позицию относительно высоковольтного электрода. Поэтому, несмотря на то, что в колонне ЭЛВ-8 65 секций, верхние секции имеют номера 83 и т. д. Это было сделано для лучшего понимания.

Профиль внешнего экрана секции и расположение сегментов приведены на рис. 4. Наибольшая напряженность электрического поля находится на сегментах 3, 4, и 5. Результаты приведены в табл. 5.

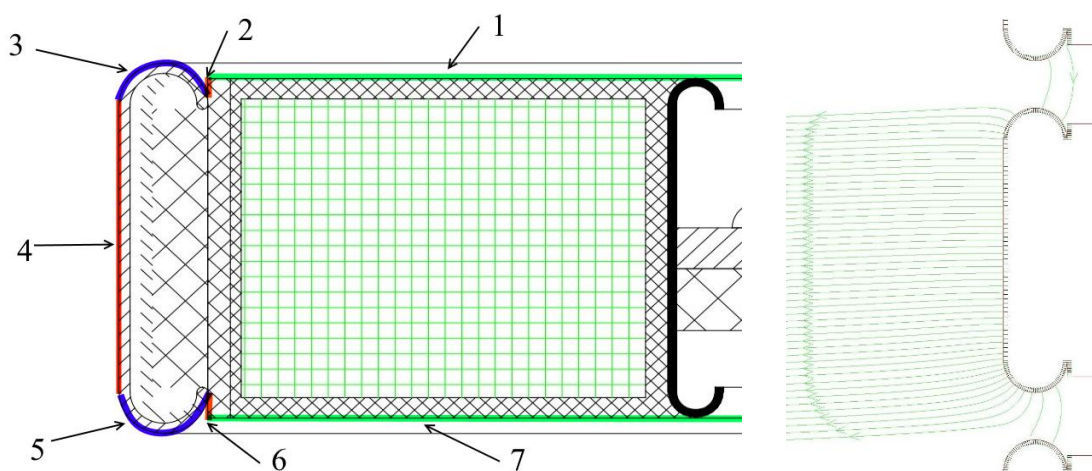


Рис. 4. Схема расположения сегментов секции выпрямителя и электрическое поле на поверхности сегментов секции

Fig. 4. Segments of rectifier section and the electric field on the surface of the section segments

Таблица 5

Напряженность сегментов секции, кВ/см

Table 5

Filed strength on the high voltage electrode segments

Сегмент	Номер секции								
	83	82	81	80	79	78	77	76	75
Сегмент 3 ЭЛВ-15	141	166	167	155	140	136	135	130	124
Сегмент 3 ЭЛВ-15/8	151	161	160	157	131	126	124	119	113
Сегмент 3 ЭЛВ-8	151	148	143	140	133	125			
Сегмент 4 ЭЛВ-15	151	153	162	169	166	164	165	165	162
Сегмент 4 ЭЛВ-15/8	148	148	155	161	157	154	155	155	152
Сегмент 4 ЭЛВ-8	180	174	170	170	169	165			
Сегмент 5 ЭЛВ-15	165	167	179	190	186	184	187	188	185
Сегмент 5 ЭЛВ-15/8	161	160	171	181	177	174	176	177	174
Сегмент 5 ЭЛВ-8	201	195	191	191	192	187			

Как видно из сравнения, максимальные напряженности на секциях примерно равны (у ЭЛВ-8 незначительно выше). На высоковольтном электроде в случае ЭЛВ-8 напряжен-

ность также немного выше. Поэтому для новой машины ЭЛВ-15 напряженность не превышает значения для реальных ЭЛВ-8.

Заключение

Анализируя данные таблиц, можно утверждать, что реальные и расчетные входные параметры ЭЛВ-8 достаточно хорошо совпадают. Поскольку геометрия рассматриваемых источников ЭЛВ-8 и ЭЛВ-15 близка, полагаем, что и для ЭЛВ-15 соотношение расчетных и реальных параметров останется таким же. Малые пульсации напряжения, его высокая стабильность и схожая с ускорителем ЭЛВ-8 напряженность электрического поля (см. табл. 4 и 5), а также то, что под нагрузкой различие реальных и расчетных параметров уменьшается, позволяют считать, что приведенные в табл. 2 параметры машины ЭЛВ-15 являются достойными для проектирования системы силового питания и изготовления ускорителя.

Список принятых обозначений

W_{11}, W_{12}	—	число витков в нижней и верхней частях первичной обмотки
W_2	—	число витков катушки вторичной обмотки
$R_{2\text{ср}}$	—	средний радиус катушки вторичной обмотки, мм
N	—	число выпрямительных секций (катушек вторичных обмоток)
$U_{2\text{ср}}$	—	среднее выпрямленное напряжение секции, кВ
$R_{1\text{мин}}, R_{1\text{макс}}$	—	минимальный и максимальный радиусы первичной обмотки, мм
$L_{\text{низ}}, L_{\text{верх}}$	—	длина нижней и верхней частей первичной обмотки, мм
K	—	геометрический коэффициент, определяемый зависимостью R_1 от Z , безразмерный
ω	—	угловая частота
$U_{1\text{вит}}$	—	витковое напряжение первичной обмотки, В
$U_{2\text{вит}}$	—	витковое напряжение вторичной обмотки, В
R_1	—	текущий радиус первичной обмотки, мм
R_2	—	радиус катушек вторичной обмотки, мм
$R_{\text{тр}}$	—	радиус экранирующих колец ускорительной трубки, мм
U_0	—	полное напряжение выпрямителя, В
U_1	—	напряжение первичной обмотки, В
$U_{1\text{хх}}$	—	напряжение в режиме холостого хода, В
I_0	—	ток высоковольтного выпрямителя, мА
T	—	период питающего напряжения, с
$C_{\text{экв}}$	—	эквивалентная емкость высоковольтного выпрямителя, Ф

Список литературы

1. **Куксанов Н. К.** Электронные ускорители непрерывного действия мощностью сотни киловатт: Дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1993.
2. **Немытов П. И.** Системы питания и управления серии высоковольтных промышленных ускорителей электронов с мощностью выведенного пучка сотни киловатт. Новосибирск, 2010.
3. **Куксанов Н. К., Немытов П. И., Голубенко Ю. И.** Малогабаритный роторный вольтметр, используемый в системах измерения и стабилизации ускоряющего напряжения промышленных ускорителей электронов // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, № 3. С. 84–91.
4. **Тарнецкий В. В., Тиунов М. А., Яковлев В. П.** Комплекс программ SAM. Руководство пользователя. Новосибирск, 2002.

References

1. **Kuksanov N. K.** Electron DC accelerators with power of hundreds kilowatts. Dr. of Tech. Sci. Diss. Novosibirsk, 1993. (in Russ.)
2. **Nemytov P. I.** Power supply and control systems for a series of high-voltage industrial electron accelerators with an extracted beam power of hundreds of kilowatts. Novosibirsk, 2010. (in Russ.)
3. **Kuksanov N. K., Nemytov P. I., Golubenko Yu. I.** Small-sized rotor voltmeter used in systems for measuring and stabilizing of the accelerating voltage of industrial electron beam accelerators. *Vestnik NSU, Series: Physics*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 84–91. (in Russ.)
4. **Tarnetskiy V. V., Tiunov M. A., Yakovlev V. P.** Complex of programs SAM. User's manual. Novosibirsk, 2002. (in Russ.)

Информация об авторах

Николай Константинович Куксанов, доктор технических наук
Денис Сергеевич Воробьев, ведущий инженер
Рустам Абельевич Салимов, доктор технических наук
Сергей Николаевич Фадеев, кандидат технических наук

Information about the Authors

Nikolay K. Kuksanov, Doctor of Technical Sciences
Denis S. Vorobev, Lead-Engineer
Rustam A. Salimov, Doctor of Technical Sciences
Sergey N. Fadeev, Candidate of Technical Sciences

*Статья поступила в редакцию 12.07.2021;
одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021
The article was submitted 12.07.2021;
approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021*