

**К. А. Брызгин, Е. В. Домаров, А. И. Корчагин, Н. К. Куksанов
П. И. Немытов, Р. А. Салимов, С. Н. Фадеев**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

Email: N.K.Kuksanov@inp.nsk.su

ПУЛЬСАЦИИ ЭНЕРГИИ В УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ ЭЛВ-4 ДЛЯ СКОРОСТНОЙ РЕНТГЕН-ТОМОГРАФИИ*

Анализируются пульсации ускоряющего напряжения в модернизированном промышленном ускорителе электронов УЭВТ-1.0-100-Т-160 (ЭЛВ-4), предназначенном для скоростной рентгеновской томографии. Параметры электронного пучка: 1 МэВ, 100 мА. Проведены измерения на упрощенном варианте машины. Для измерения пульсаций был сконструирован специальный датчик, проведена его калибровка двумя способами. Прделано спектральное разложение и рассмотрены основные составляющие.

Ключевые слова: ЭЛВ, пульсации энергии.

Введение

В 2010 г. на ускорителе ЭЛВ-6 была проведена серия экспериментов по скоростной рентгеновской томографии. Электронный пучок, сканируя вдоль танталовой мишени, генерирует тормозное излучение, которое, проходя сквозь исследуемый объект с разных направлений, позволяет получить информацию об объекте. Одной из проблем при проведении экспериментов были пульсации ускоряющего напряжения, которые приводят как к нежелательным флуктуациям положения и размера пучка, так и к модуляции интенсивности рентгеновского излучения. В конечном счете это снижает разрешающую способность и делает невозможным обнаружение слабоконтрастных объектов, таких как, например, пластиковые включения и пустоты [1]. Уменьшение уровня пульсаций ускоряющего напряжения является также актуальным для технологических экспериментов, проводимых на

стенде УСУ ЭЛВ-6 на базе промышленного ускорителя ЭЛВ-6 [2].

Ускоритель для полномасштабной рентгеновской установки, изображен на рис. 1. Эта машина имеет следующие параметры: энергия электронов 1МэВ, максимальный ток пучка 100 мА, величина пульсаций не должна превышать 5 %, дальнейшая стабилизация размера и положения пучка должна осуществляться средствами электронной оптики. В выпрямительной колонне этого ускорителя увеличена емкость фильтрующих конденсаторов. Ускорительная трубка расположена в отдельном котле и соединяется с высоковольтным выпрямителем с помощью газового фидера. Сосуды высокого давления изготавливаются германской стороной, поэтому измерения пульсаций в ИЯФ СО РАН проводились на стандартном ускорителе ЭЛВ-4, являющемся упрощенной моделью ускорителя для томографии. Основное отличие заключается в том, что высоковольтный выпрямитель имеет мень-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ГК № 14.518.11.7029).

Авторы выражают благодарность Анатолию Наумовичу Самойловичу за помощь в проведении экспериментов.

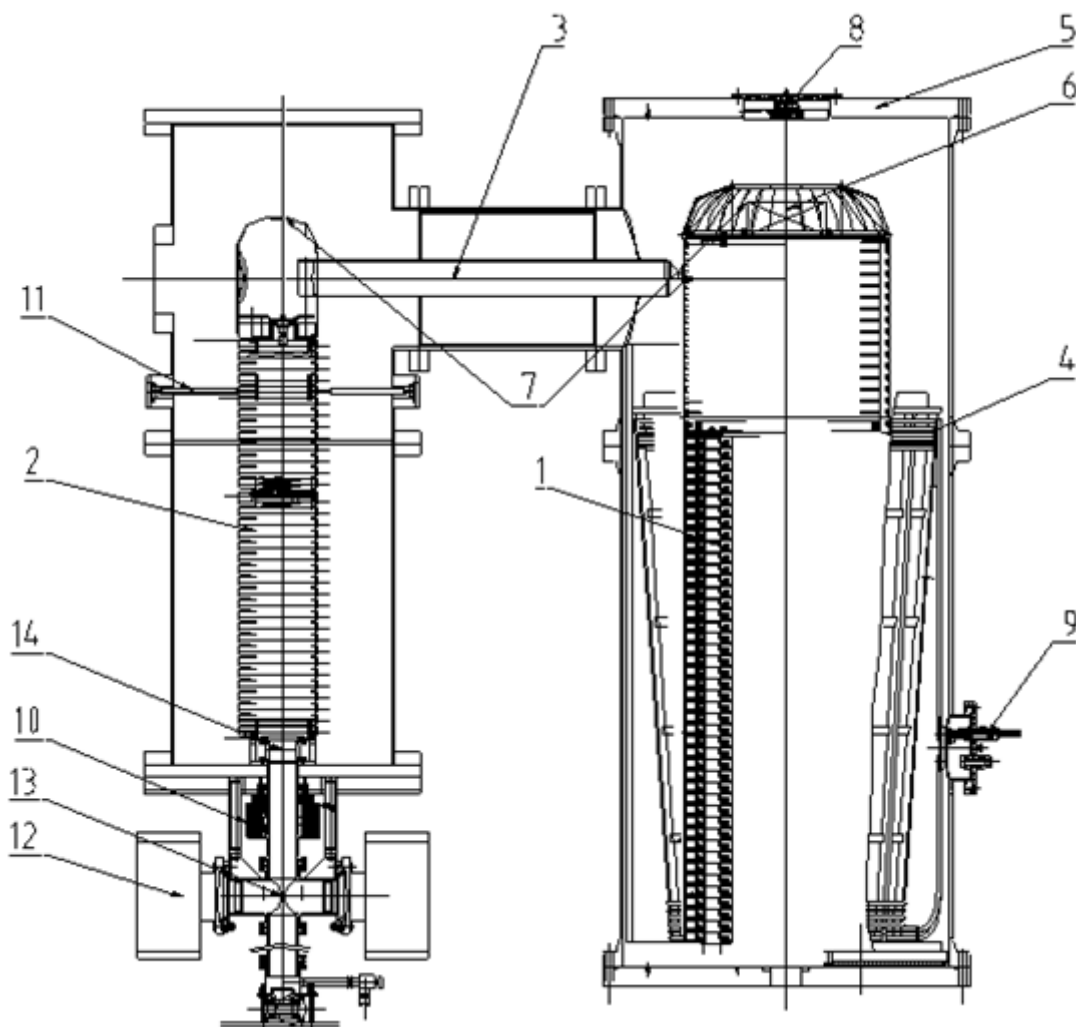


Рис. 1. Общий вид ускорителя для быстрой томографии: 1 – колонна выпрямительных секций; 2 – ускорительная трубка; 3 – газовый фидер; 4 – первичная обмотка; 5 – корпус сосуда высокого давления; 6 – блок управления инжектором; 7 высоковольтные электроды; 8 – оптические элементы системы управления током пучка; 9 – вводы первичной обмотки; 10 – линза; 11 – опоры для поддержки трубки; 12 – магнитоэрозийный насос вакуумной системы; 13 – стыковочный узел вакуумной системы; 14 – сильфон для крепления ускорительной трубки

шую выходную емкость, а ускорительная трубка расположена внутри высоковольтного выпрямителя.

Устройство ускорителя

Общий вид ускорителя УЭВТ-1.0-100-Т-160 (ЭЛВ-4) и схема электропитания представлены на рис. 2, 3. Внутри котла, заполненного элегазом, расположены первичная обмотка и колонна из 44 выпрямительных секций. В обмотках секций наводится переменное напряжение частотой 420 Гц, которое впоследствии выпрямляется. Секции соединяются последовательно-параллельно,

в результате чего реализуется двухполупериодная схема выпрямления, и пульсации выходного напряжения имеют частоту 840 Гц. Суммарное напряжение колонны выпрямительных секций прикладывается к ускорительной трубке.

Электропитание ускорителя осуществляется от транзисторного преобразователя частоты. Конструктивно преобразователь находится внутри отдельно расположенного силового шкафа. Регулирование выходного напряжения ускорителя осуществляется широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения инвертора. На входе инвертора установлен шестифазный выпрямитель

с фильтрующей емкостью C_{ϕ} . Пульсации напряжения этого выпрямителя с частотой 300 Гц будут вносить свой вклад в пульсации ускоряющего напряжения. Увеличение фильтрующей емкости приводит к уменьшению пульсаций с этой частотой. Величина емкости C_{ϕ} изменялась в пределах 1 800–4 000 мкФ.

Датчик измерения пульсаций

Основная трудность измерения пульсаций заключается в том, что источник высокого напряжения находится внутри сосуда под высоким давлением, а место для емкостного датчика имеет ограниченные размеры. Схема измерений показана на рис. 4. В качестве датчика использовалась медная, изолированная от земли пластина, диаметром 300 мм. Она установлена на расстоянии 180 мм от высоковольтного электрода. Определение емкости датчик – высоковольтный электрод непосредственным измерением невозможно. Оценка величины этой емкости:

$$C_{\text{дат}} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,14 \cdot 0,3^2}{0,184} = 3,4 \text{ пФ.}$$

Емкостной делитель образован емкостями $C_{\text{дат}}$ и $C_{\text{изм}}$. Емкость низковольтного плеча делителя $C_{\text{изм}} = C_{\text{доп}} + C_{\text{каб}}$ является суммой дополнительной емкости (подключаемой параллельно емкости кабеля для изменения коэффициента передачи) и емкости кабеля (которая равняется 4,3 нФ). Коэффициент передачи равен отношению емкостей $C_{\text{дат}} / C_{\text{изм}}$ если выполняется условие $\tau \ll \ll RC_{\text{изм}}$. Здесь τ – характерное время изменения потенциала на высоковольтном электроде. В режиме пульсаций τ составляет порядка 1 мс (сотни герц), а при включении или изменении потенциала с помощью системы управления – десятки секунд.

Калибровка датчика проводилась двумя способами. Первый заключается в том, чтобы искусственно подать переменный сигнал известной амплитуды на высоковольтный электрод и измерить соответствующий ему сигнал на осциллографе. Характерное значение $RC_{\text{изм}}$ при использовании осциллографа составляет более 40 мс. Калибровка вторым способом производится на собранном ускорителе, готовом к использованию.

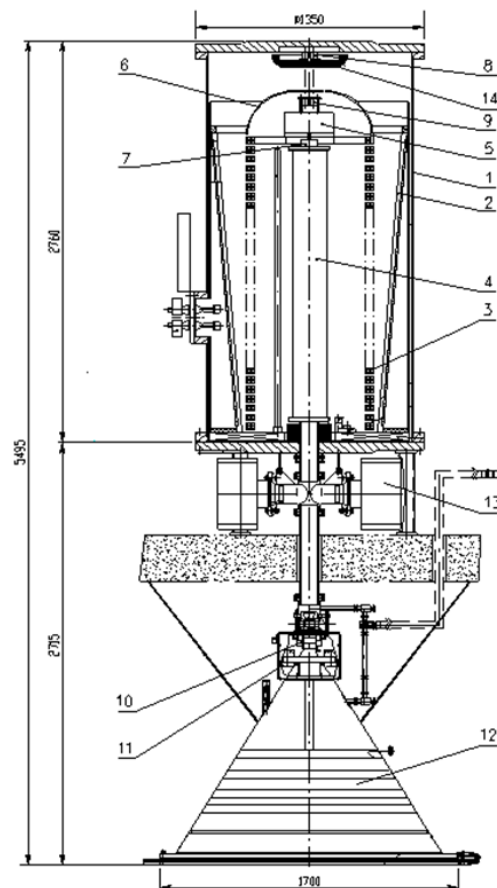


Рис. 2. Общий вид ускорителя электронов УЭВТ-1.0-100-T-160 (ЭЛВ-4): 1 – корпус сосуда высокого давления; 2 – обмотка первичная; 3 – колонна выпрямительных секций; 4 – трубка ускоряющая; 5 – блок управления инжектором; 6 – электрод высоковольтный; 7 – инжектор электронов; 8, 9 – оптические элементы системы управления током пучка; 10, 11 – электромагниты сканирования; 12 – выпускное устройство; 13 – магниторазрядные насосы вакуумной системы; 14 – емкостной датчик для измерения пульсаций

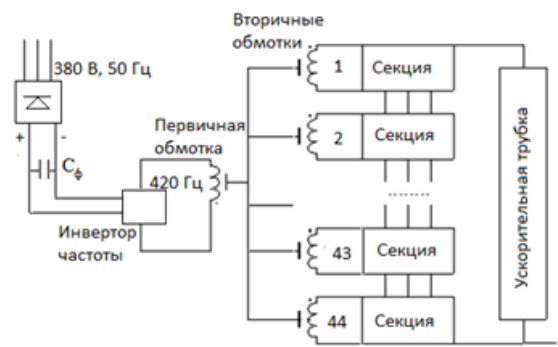


Рис. 3. Схема электропитания ускорителя

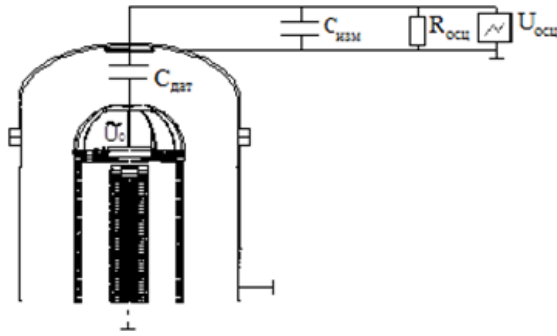


Рис. 4. Схема датчика для измерения пульсаций

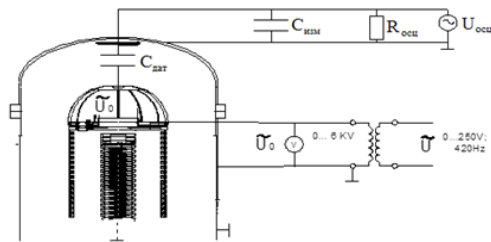


Рис. 5. Схема калибровки датчика имитацией пульсаций

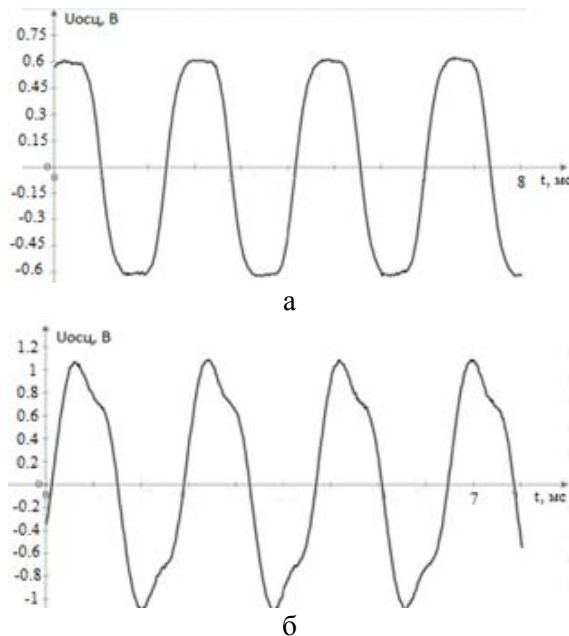


Рис. 6. Сигналы с осциллографа при калибровке с отключенными (а) и подключенными (б) секциями

Суть метода заключается в том, чтобы быстро изменить величину ускоряющего

напряжения. В качестве измерительного прибора здесь использовался электростатический вольтметр, входное сопротивление которого составляет тысячи мегаом.

Калибровка имитацией пульсаций

На высоковольтный электрод от повышающего трансформатора подавался сигнал частотой 450 Гц. Напряжение на выходе трансформатора измерялось статическим вольтметром, т. е. определялось среднеквадратичное значение. Схема приведена на рис. 5.

Данная калибровка проводилась для двух случаев: когда высоковольтный электрод оторван от выпрямительных секций и когда он соединен с выпрямительными секциями. Сигналы с осциллографа для разных схем подключения приведены на рис. 6.

Различия в форме сигнала объясняются резонансными свойствами использованного повышающего трансформатора. Величина емкости, подключаемой к обмотке трансформатора, различна в случаях, когда высоковольтный электрод соединен с колонной выпрямительных секций и когда этого соединения нет. Заметим, что отношение амплитуды сигнала к его среднеквадратичному значению у этих сигналов различно: 1,26 с отключенными секциями; 1,46 с подключенными секциями. При одинаковых напряжениях статического вольтметра (см. рис. 5) амплитуды напряжения на высоковольтном электроде будут различными в зависимости от подключения колонны выпрямительных секций, поскольку статический вольтметр измеряет среднеквадратичное напряжение.

Была проведена серия измерений зависимости двойной амплитуды напряжения на осциллографе $2U_{осц}$ (размах колебаний) от напряжения на статическом вольтметре $\langle \tilde{U}_0^2 \rangle$ (вольтметр подсоединен к повышающему трансформатору), при разных $C_{доп}$. По данным зависимости была вычислена емкость высоковольтного электрода на датчик $C_{дат}$. Вычисление проводилось линейной аппроксимацией зависимости

$$2U_{осц} [В] = \sqrt{\langle \tilde{U}_0^2 \rangle} [кВ] \cdot k_l,$$

где k_l – линейный коэффициент аппроксимации:

$$k_l = \frac{C_{\text{дат}}}{C_{\text{изм}}} \cdot \frac{2000}{h},$$

$$\text{где } h = \frac{U_0}{\sqrt{\langle \tilde{U}_0^2 \rangle}}, \quad C_{\text{дат}} = \frac{h \cdot k_l}{2000} \cdot \frac{1}{C_{\text{изм}}}.$$

Величина емкости датчика, рассчитанная по данной калибровке (табл. 1):

$$C_{\text{дат}} = 3,88 \pm 0,02 \text{ пФ.}$$

Калибровка при включении и выключении

Быстрое изменение потенциала в этом методе обеспечивалось включением и выключением ускорителя. Для достижения ускоряющего напряжения 1 МэВ ускорителю требуется порядка 10 с и около сотни секунд требуется на его разрядку при выключении. Поэтому, чтобы соблюсти условие $\tau \ll RC_{\text{изм}}$, в качестве вольтметра использовался электростатический вольтметр с большим внутренним сопротивлением. Это позволило увеличить время $RC_{\text{изм}}$ до нескольких минут.

При включении ускорителя на вольтметре устанавливается напряжение, вычисляемое по формуле

$$U_{\text{стат}} = E \frac{C_{\text{дат}}}{C_{\text{изм}}},$$

где E – ускоряющее напряжение ускорителя. При выключении ускорителя на вольтметре (предварительно разряженном до нуля) устанавливается такое же напряжение. Была проделана серия измерений для разных параметров при включении и выключении ускорителя, и для каждого вычислена $C_{\text{дат}}$. Средняя полученная данные, получаем

вычисленную емкость $C_{\text{дат}} = 3,7 \pm 0,1$ пФ, что вполне согласуется с данными первого метода калибровки. Причина различия результатов может заключаться в нелинейности сопротивлений делителя энергии, который используется для измерения ускоряющего напряжения. Первый метод считается более точным, поскольку диапазон калибровки ближе к значениям пульсаций энергии, поэтому во всех расчетах используется первая калибровка.

Измерение пульсаций энергии

Было проведено три группы измерений на энергии 1 МэВ при разных значениях фильтрующих конденсаторов сетевого выпрямителя преобразователя частоты. Как видно на рис. 7, форма пульсаций имеет сложный характер. В качестве численного значения принимались максимальные отклонения питающего напряжения в обе стороны, наблюдаемые в течение нескольких периодов (до 10). В каждой группе пульсации энергии измерялись при разных токах пучка, таким образом, была сформирована табл. 2.

Спектральное разложение сигнала пульсаций приведено на рис. 8. Оно показывает три отчетливых пика. Пик частоты 300 Гц обусловлен пульсациям напряжения сетевого выпрямителя инвертора, пик с частотой 840 Гц (основной) обусловлен двухполупериодным режимом работы высоковольтного выпрямителя, третий пик имеет частоту питающего напряжения 420 Гц. Его появление связано с тем, что конденсаторы выпрями-

Таблица 1

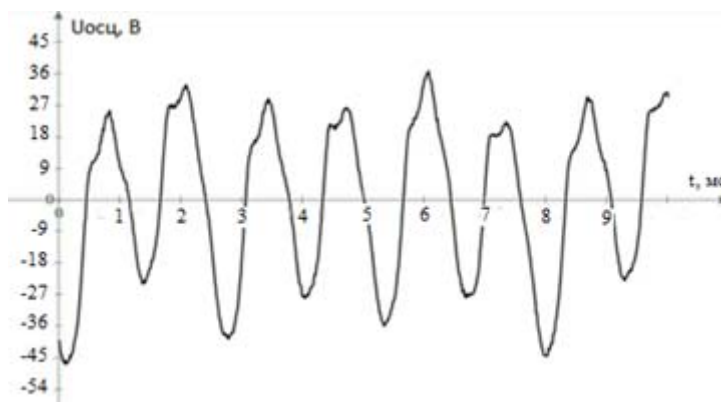
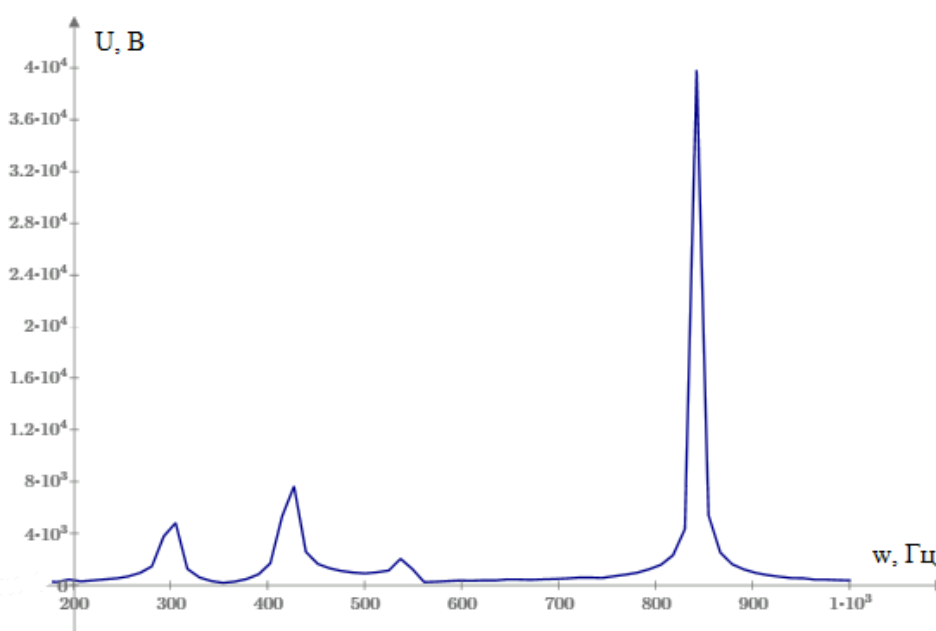
Калибровка датчика имитацией пульсаций

$C_{\text{изм}}$, нФ	Линейный коэффициент, k_l	Отношение амплитуды к среднеквадратичному сигналу, h	Вычисленная емкость датчика $C_{\text{дат}}$, пФ
4,3	2,27	1,26	3,88
7,7	1,26	1,26	3,86
15,5	0,63	1,26	3,88
4,3	2,63	1,46	3,87
7,7	1,48	1,46	3,9
15,5	0,73	1,46	3,87

Таблица 2

Пулсации энергии в \pm кВ при разных токах пучка и C_ϕ , $E = 1$ МэВ

C_ϕ , мкФ	I , мА								
	0	5	10	20	40	50	70	80	100
1 800	0,68	6,8	11,1	16,5	26	30	40,3	44,7	57,1
3 000	0,68	6,8	10,6	16,4	25,2	29,4	36,2	40,7	50,9
4 130	0,68	6,8	10,7	16,1	24,2	27,5	36	38,5	46,6

Рис. 7. Сигнал пульсаций энергии при $E = 1$ МэВ, $I_{\text{пучка}} = 100$ мА, $C_\phi = 4\,130$ мкФРис. 8. Спектр сигнала пульсаций энергии при $E = 1$ МэВ, $I_{\text{пучка}} = 100$ мА, $C_\phi = 4\,130$ мкФ

тельных секций в разные полупериоды питаются от разных обмоток. Распределение напряжения по вторичным обмоткам не совсем равномерно, оно слегка уменьшается от центра колонны к ее верхнему концу. Поэтому в тот полупериод, когда конденсато-

ры заряжаются от верхней обмотки, они получают меньший заряд, и наоборот, когда заряжаются от нижележащей обмотки, получают больший заряд, т. е. появляется пульсация с частотой питающего напряжения.

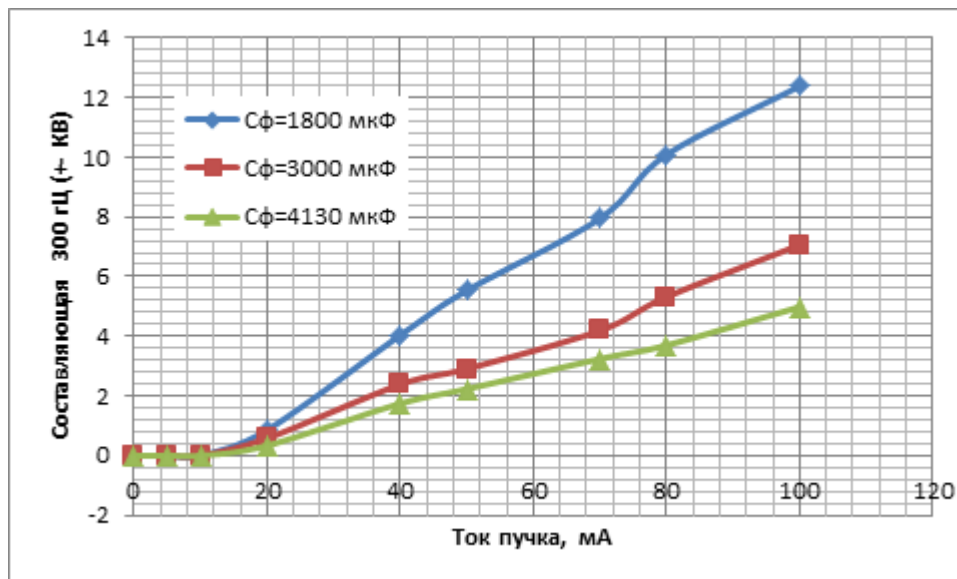


Рис. 9. Составляющая пульсаций 300 Гц при разных C_ϕ в зависимости от тока пучка

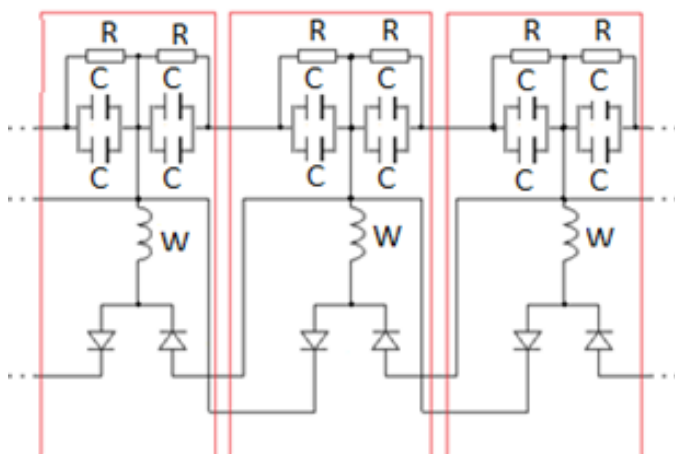


Рис. 10. Схема соединения выпрямительных секций ускорителя:
 W – вторичные обмотки,
 $C = 10\,000$ пФ – фильтрующие конденсаторы,
 $R = 200$ МОм – резисторы, обеспечивающие равномерное распределение напряжения между последовательно соединенными конденсаторами

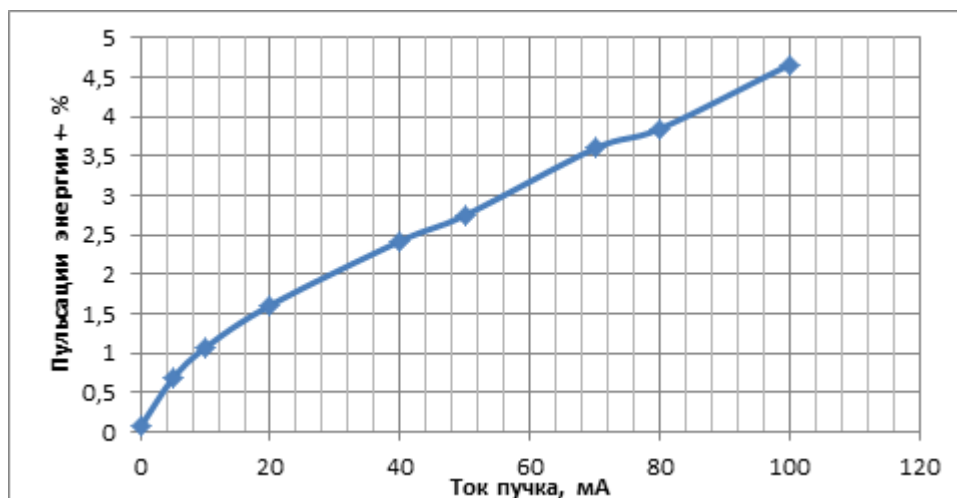


Рис. 11. Итоговая измеренная зависимость пульсаций энергии от тока пучка,
 $E = 1$ МэВ, $C_\phi = 4\,130$ мкФ

На изменение фильтрующей емкости в инверторе частоты реагировала только составляющая 300 Гц, так как увеличение этой емкости уменьшает пульсации трехфазного выпрямителя в инверторе с частотой 300 Гц. На рис. 9 изображена зависимость этой составляющей от величины тока пучка. При малых токах составляющая очень мала, а затем начинает расти примерно обратно пропорционально фильтрующей емкости.

Как и следует ожидать, пульсации с частотами 420 и 840 Гц не зависят от величины емкости сетевого выпрямителя. Первая – потому, что распределение напряжения вторичных обмоток не зависит от величины тока пучка, а вторая зависит только от величины емкости выпрямительной секции.

Заключение

Использование электрической схемы (с последовательно-параллельным соединением выпрямительных секций), приведенной на рис. 10, позволило ограничить пульсации на уровне 6 %. Увеличение фильтрующей емкости на входе преобразователя частоты позволило еще уменьшить пульсации энергии – до $\pm 5\%$ при токе пучка 100 мА, на энергии 1 МэВ, $C_{\phi} = 4\ 130$ мкФ.

Достигнутая зависимость изображена на рис. 11.

Заметим, что во всех экспериментах использовался стандартный ускоритель. В нем ускорительная трубка расположена внутри колонны высоковольтного выпрямителя. В реальной машине, предназначенной для рентгеновской томографии, ускорительная трубка вынесена за пределы выпрямителя: она располагается в отдельном баке и соединяется с ним высоковольтным фидером. Емкость высоковольтных электродов, т. е. элементов, расположенных под высоким потенциалом, в этой конструкции будет выше. Такое конструктивное решение позволит еще вдвое уменьшить пульсации.

Список литературы

1. Hoppe D., Bartling Y. Preliminary Investigations on High Energy Electron Beam Tomography // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. No. 9.
2. Салимов Р. А. Мощные ускорители электронов для промышленного применения // УФН. 2000. Т. 170, № 2.

Материал поступил в редколлегию 17.05.2013

K. A. Bryazgin, E. V. Domarov, A. I. Korchagin, N. K. Kuksanov
P. I. Nemytov, R. A. Salimov, S. N. Fadeev

ELECTRON ACCELERATOR ELV-4 ENERGY RIPPLES

This article deals with modernization of industrial electron accelerator ELV-4 with parameters 1 MeV, 100 mA. The goal of upgrading was to decrease accelerating voltage ripples to $\pm 5\%$. The experiments were performed on a simplified accelerator for tomography. Special sensor was created to measure energy ripples. Calibration of sensor has been done in two ways. Energy ripples signal spectrum was obtained. The main components have been studied.

Keywords: ELV, Energy ripples.