

## ПЕРЕДАЧА МОЩНОСТИ В УСТАНОВКЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ СИНХРОТРОНА COSY

© 2015 г. М. И. Брызгунов, А. Д. Гончаров, В. М. Панасюк,  
В. В. Пархомчук, В. Б. Рева, Д. Н. Скоробогатов

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

*E-mail: V.B.Reva@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 30.05.2014 г.

На немецком синхротроне COSY (г. Юлих, Германия) в 2013 г. заработала установка электронного охлаждения, созданная в ИЯФ СО РАН. Целью создания установки было подавление влияния рассеяния пучка на внутренней мишени вплоть до максимальных энергий протонного пучка 3 ГэВ. При ее создании пришлось решить ряд сложных электротехнических проблем, одной из которых являлась передача электрической мощности большому числу устройств, находящихся под высоким потенциалом. В данной работе описаны несколько практических вариантов, которые рассматривались и практически проверялись при проектировании установки для решения данной задачи. Окончательная конструкция основана на принципе действия каскадного трансформатора, содержащего 33 секции, соединенные последовательно. Описанные решения могут быть использованы не только для будущих установок электронного охлаждения (проект НИКА-ОИЯИ, Россия; FAIR, Германия; MEIC, США), но и для других высоковольтных установок, требующих передачи мощности на устройства под высоким потенциалом. В настоящее время, после вывода из эксплуатации установки электронного охлаждения в лаборатории Фермилаб (США), данная установка является самой высоковольтной установкой электронного охлаждения в мире.

DOI: 10.7868/S0032816215020160

### ВВЕДЕНИЕ

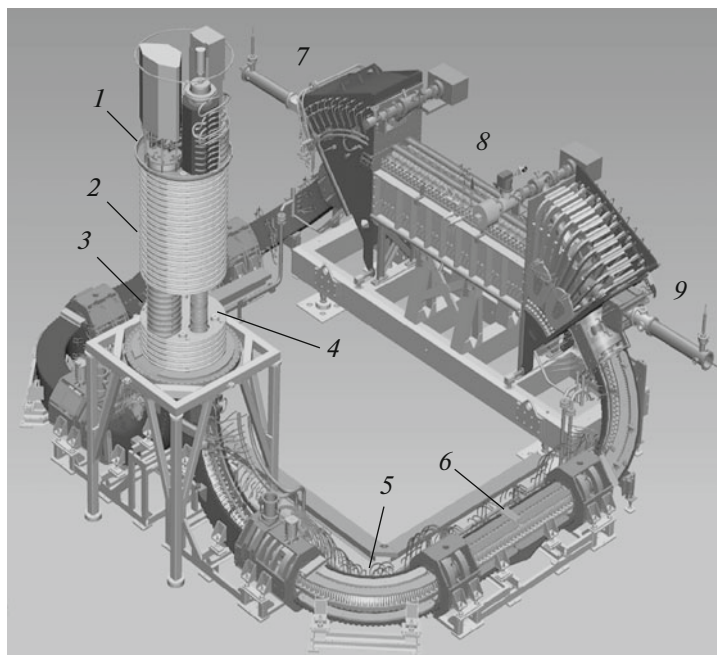
При эксплуатации ускорителей заряженных частиц прямого действия нередко возникает потребность в передаче электрической мощности на устройства, находящиеся под потенциалом до нескольких мегавольт. Существует несколько способов решения этой задачи. Рассмотрим некоторые из них применительно к установкам электронного охлаждения.

В установках напряжением до 300 кэВ, как правило, применяют системы передачи мощности, выполненные по трансформаторному принципу. Это либо обычные электротехнические трансформаторы с усиленной изоляцией между обмотками, расположенные на едином магнитопроводе [1], либо трансформаторы с большим зазором между обмотками, когда часть пути магнитный поток проходит вне магнитопровода по изолирующей среде (масло или элегаз) [2, 3]. На прототипе электронного охладителя “Силуэт” [4] на 1 МВ использовалась аналогичная конструкция, но при большой величине рассеянных

полей и относительно низкой частоте преобразователя возникают проблемы с достижением высокой стабильности высокого напряжения, требуемой для установок электронного охлаждения ( $10^{-4}$  или лучше).

В установке электронного охлаждения, созданной в лаборатории Фермилаб (США), для передачи энергии использовалась механическая связка: мотор – непроводящая ось – электрический моторогенератор [5]. С помощью такой системы передача энергии осуществлялась до потенциала 4.3 МВ.

При проектировании системы передачи мощности для установки электронного охлаждения на 2 МэВ (COSY, Германия) было рассмотрено несколько возможностей с учетом специфики конкретной установки. Специфика заключалась в необходимости обеспечить мощностью не только высоковольтный терминал, но также и большое количество изолированных друг от друга секций (34 шт.), содержащих электронику для создания однородного магнитного поля вдоль ускоритель-



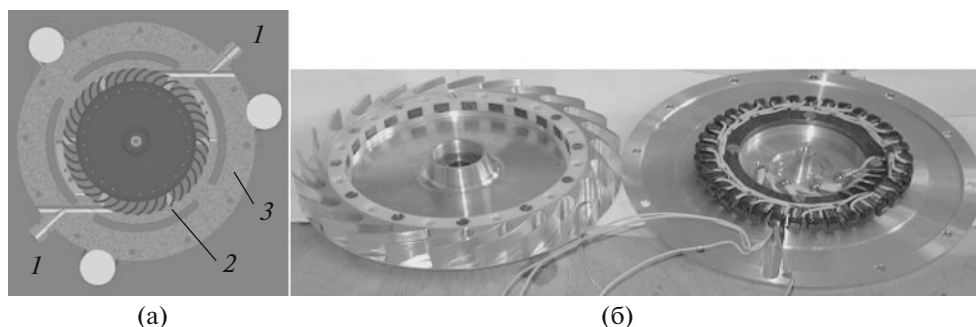
**Рис. 1.** Трехмерная модель 2-МэВ системы электронного охлаждения для COSY. 1 – высоковольтный терминал, содержащий электронную пушку, коллектор и систему электроники; 2 – высоковольтные секции; 3 – каскадный трансформатор; 4 – ускорительная трубка; 5 – поворотные соленоиды транспортного канала; 6 – прямолинейные соленоиды транспортного канала; 7 – тороиды; 8 – секция охлаждения; 9 – канал транспортировки ионного пучка.

ной трубки и высоковольтные выпрямители для генерации высокого напряжения. Характерные величины мощностей составляют 5–10 кВт для высоковольтного терминала и около 300 Вт на секцию. Необходимость большого числа секций обусловлена жесткими требованиями на диапазон перестройки энергии электронного пучка от 25 кэВ до 2 МэВ. В этих условиях крайне затруднительно сформировать оптику электронного пучка, аналогичную использовавшейся в Фермилаб [6], которая была ориентирована, главным образом, на фиксированную энергию. В оптическом тракте ускорительной колонны в Фермилаб использовалось относительно малое число соленоидов, служащих магнитными фокусирующими элементами. Предварительная проработка варианта с использованием непроводящего вала для передачи мощности в случае большого числа секций выявила существенные технические сложности, связанные с креплением вала и электрогенератора, механическими напряжениями и вибрациями [5], возникающими между секциями, прохождением вала через секцию, первоначальной выставкой и сборкой всей системы.

### УСТАНОВКА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА 2 МЭВ

В 2009–2012 гг. в ИЯФ СО РАН была создана установка электронного охлаждения на энергию электронов до 2 МэВ для синхротрона COSY [7, 8]. Синхротрон COSY предназначен для экспериментов с поляризованными или неполяризованными протонами в области энергий до 2600 МэВ на внутренней мишени или с выводом пучка на внешнюю мишень. При проведении экспериментов с внутренней мишенью очень важна возможность “охлаждения” используемого пучка (т.е. уменьшения разброса импульсов частиц) для подавления “греющих” эффектов. Основой метода электронного охлаждения является “теплообмен” между пучком ионов, циркулирующим в накопителе, и пучком электронов, движущихся с той же средней скоростью. На общем участке траектории в системе покоя пучков “горячие” протоны охлаждаются за счет кулоновских столкновений в газе “холодных” электронов. Процесс охлаждения продолжается до тех пор, пока температура протонов в системе центра масс не станет равной эффективной температуре.

Схема установки электронного охлаждения показана на рис. 1. На вершине ускорителя в вы-



**Рис. 2.** Конструкция (а) и внешний вид пневмогенератора (б). 1 – сопло для подачи газа; 2 – ротор пневмогенератора; 3 – элемент корпуса.

соковольтном терминале 1 под потенциалом до 2 МВ расположены устройства электронной пушки и коллектора. Стационарный электронный пучок с током до нескольких ампер ускоряется вдоль электростатической колонны, состоящей из высоковольтных секций 2, и далее по транспортной системе направляется в секцию охлаждения 8, где движется совместно с ионным пучком 9. В результате совместного движения происходит передача тепловой энергии от более горячих ионов холодным электронам. Покинув секцию охлаждения, электронный пучок возвращается обратно и по транспортному каналу снова попадает в колонну, где практически полностью теряет накопленную энергию и поглощается в коллекторе. На протяжении всего пути пучок находится в сопровождающем магнитном поле. Все элементы электростатического ускорителя (1–4) помещены в бак с элегазом высокого давления.

Электростатический ускоритель прямого действия на энергию до 2 МэВ состоит из 33 одинаковых секций (2), каждая из которых содержит две катушки магнитного поля для фокусировки ускоряемого и замедляемого пучков, высоковольтный блок для генерации высокого напряжения между секциями 60 кВ, блок управления и связи. Каждая секция питается от своего источника энергии в виде секции каскадного трансформатора.

### ПНЕВМОГЕНЕРАТОР

Одно из предложений для передачи энергии под высокий потенциал основывалось на использовании сжатого газа. По сравнению с использованием вала сильно упрощается система подведения энергии к конкретной секции, исчезают жесткие требования на точность крепления электрогенератора, существенно улучшается ситуация с механическими вибрациями, так как ско-

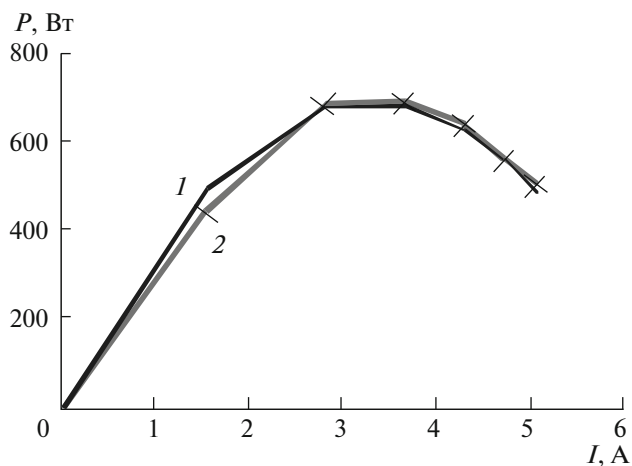
рость вращения пневматической турбины может быть достаточно велика и отсутствует жесткая механическая связь между секциями.

На рис. 2 показана конструкция электрического пневмогенератора, который был изготовлен в ИЯФ СО РАН. Пневмогенератор состоит из статора с закрепленными на нем 36 катушками и ротора с 24 постоянными магнитами. Катушки соединены последовательно тремя группами так, что генератор вырабатывает трехфазное переменное напряжение. Номинальная частота генератора зависела от нагрузки и составляла ~2 кГц. Конкретное значение частоты было не очень существенным, так как питаемая электроника содержала преобразователь напряжения с предварительным выпрямлением. Высокая частота переменного напряжения облегчала возможность получения стабильного питающего напряжения для электронных модулей высоковольтной секции. Данный пневмогенератор испытывался при рабочем входном давлении 4.6 атм, рабочее тело – воздух. Для создания потока газа использовались два сопла Ø4 мм. Напряжение генератора на холостом ходу составляло 400 В. Максимальная мощность около 600 Вт достигалась при нагрузке 65 Ом, и напряжение при этом составляло 200 В. По высоте генератор занимал 4 см.

Поток газа из сопла можно оценить по формуле из [9] для атмосферного воздуха в случае, когда противодавление  $p_2 < 0.5p$ :

$$S = 0.38F \frac{p}{\sqrt{T}}, \quad (1)$$

где  $F$ , см<sup>2</sup> – сечение сопла;  $p$ , кгс/см<sup>2</sup> – давление;  $T$  – абсолютная температура в напорном резервуаре. Для номинального режима расход газа  $S = 0.031$  кг/с.

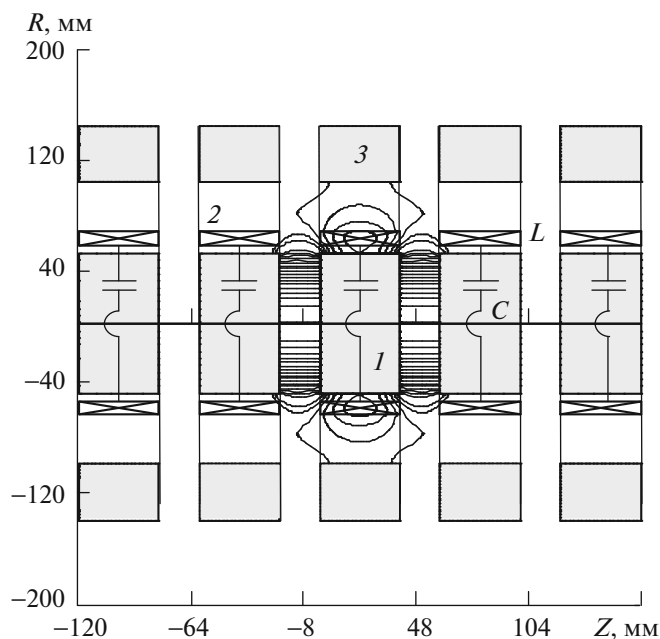


**Рис. 3.** Зависимость мощности, выдаваемой пневмогенератором, от тока нагрузки. 1 – ток нагрузки для генератора с максимальным напряжением 420 В и собственным сопротивлением 65 Ом, 2 – измеренные значения.

При оценке энергетической целесообразности необходимо учитывать, что это система именно передачи мощности, поэтому формально возможна утилизация энергии расширяющегося газа, не использованной для вращения турбины. При обычном подходе получения сжатого газа в компрессоре он изотермически или адиабатически сжимается с отводом избыточного тепла от рабочего тела. В этом случае даже при использовании идеального компрессора возникают потери, связанные с работой на получение сжатого газа. Под идеальным понимается компрессор, у которого отсутствуют потери энергии в клапанах, утечки и перетечки газа через неплотности и сила трения равна нулю.

Если при адиабатическом сжатии газа тепло не отводится и полученный горячий газ используется для вращения турбины, то потери энергии на термодинамический цикл могут быть сведены к минимуму. Но возникают вопросы, связанные с работой всей газовой системы при высокой температуре. Если для самой электротурбины эта техническая проблема может быть решена за счет выбора материалов и конструкции, то для газотранспортной системы эта проблема может быть существенна. В силу расположения турбины под высоким потенциалом элементы газотранспортной системы должны быть изготовлены из диэлектрического и, желательно, гибкого материала.

В данных экспериментах использовался первый вариант, так как оценочная температура газа при адиабатическом сжатии составляет 200°С



**Рис. 4.** Схема последовательной передачи мощности на трансформаторах с большим зазором. 1 – магнитопровод для передачи магнитного потока от секции к секции; 2 – катушка; 3 – магнитопровод, уменьшающий магнитный поток за пределами трансформатора. 1–3 образуют индуктивность L, содержащую собственную индуктивность  $L_0$  (магнитный поток остается внутри секции) и индуктивности связи  $L_1$  (магнитный поток передается от одной секции другой); C – конденсатор колебательного контура.

(для воздуха взято значение показателя адиабаты 1.4). На рис. 3 приведена зависимость мощности, выдаваемой пневмогенератором, от тока нагрузки. Работа, затраченная на привод идеального компрессора при изотермическом сжатии, может быть оценена по формуле [10]

$$A = \frac{S}{\mu} RT \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right) = 4.6 \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – молярная масса воздуха;  $R$  – газовая постоянная;  $p_2$  и  $p_1$  – входное и выходное давления компрессора, и эффективность передачи мощности оказывается на уровне 10%.

Подобная турбина в течение ряда лет используется на установке “Ускорительный масс-спектрометр” ИЯФ СО РАН [11] для питания элементов высоковольтного терминала, находящихся под потенциалом 1 МВ. Рабочее тело – воздух в силу простоты использования. Изолирующая среда – смесь воздуха с небольшой добавкой элегаза в пропорции 2–3%. В первое время происхо-

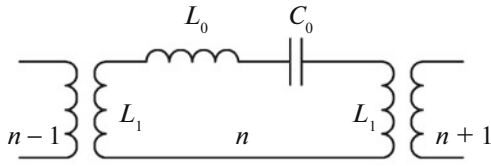


Рис. 5. Схема передачи мощности на последовательности трансформаторов с большим зазором.

дили частые поломки из-за утери масляной смазки из подшипника. После модернизации конструкции, устранившей потери масла, удалось достичь ресурса непрерывной работы более 2 лет при 12-часовой работе в рабочие дни. Одной из проблем при ее использовании оказалось чрезмерное охлаждение трубок газотранспортной системы при расширении газа в пневмогенераторе, что вызвало необходимость дополнительного контроля изолирующего газа на предмет наличия влаги с целью недопущения образования конденсата и искусственного подогрева газа после компрессора. В качестве газотранспортной системы используются трубы из сшитого полиэтилена.

Использование элегаза как рабочего тела пневмогенератора может позволить перейти ко второму варианту. Так как табличное значение показателя адиабаты 1.1, то можно ожидать температуру после адиабатического сжатия на уровне 70°C, что выглядит приемлемо с технической точки зрения. При использовании элегаза в качестве высоковольтной изолирующей среды появляется дополнительное преимущество, связанное с тем, что ослабляются требования на герметичность газотранспортной системы.

Несмотря на успешную эксплуатацию пневмогенератора данное решение не было выбрано для реализации на установке электронного охлаждения в связи с технологическими сложностями обеспечения бесперебойной работы большого количества секций в течение длительного периода.

### КАСКАДНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР С БОЛЬШИМ ЗАЗОРОМ

Для обеспечения хорошей изоляции между обмотками в трансформаторе возможно исключить центральный магнитопровод из его конструкции. Подобная конструкция используется в высоковольтных ускорителях типа ЭЛВ [12], электронном охладителе ЕС-300 [2] и др. Для обеспечения питания большого числа секций данная идея может быть расширена путем использования большого количества одинаковых секций, передаю-

щих энергию по принципу бегущей волны. Схематично конструкция показана на рис. 4. Элемент индуктивности  $L$  состоит из участка магнитопровода 1 с намотанной на него катушкой 2. Совместно с конденсатором  $C$  он создает элементарный колебательный контур.

Связь ячеек осуществляется по магнитному потоку. Предполагается, что связаны только соседние ячейки, связь через ячейку пренебрежимо мала. Для минимизации возбуждения вихревых электрических полей за счет рассеянных магнитных полей каждая ячейка помещена во внешний элемент магнитопровода 3.

Эквивалентная схема такой системы показана на рис. 5, где  $L_1$  – индуктивность связи,  $C_0$  – конденсатор элементарного колебательного контура,  $L_0$  – собственная индуктивность,  $R_0$  – сопротивление эквивалентных потерь.

Уравнение Кирхгофа для элементарной ячейки может быть записано в виде

$$L_0 \frac{dI_n}{dt} + R_0 I_n + \frac{q_n}{C_0} = L_1 \frac{dI_{n-1}}{dt} + L_1 \frac{dI_{n+1}}{dt} \quad (3)$$

( $n$  – порядковый номер ячейки,  $q_n$  – заряд на конденсаторе  $C_0$ ), которое при  $R_0 = 0$  допускает решение в виде бегущей волны

$$I_n = I_0 \exp(-i\omega t) \exp(in\varphi) \quad (4)$$

при условии

$$\cos \varphi = \frac{1}{2} \frac{L_0}{L_1} \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right), \quad -1 < \cos \varphi < 1, \quad (5)$$

$$\frac{\omega_0^2}{1 + 2 \frac{L_1}{L_0}} < \omega^2 < \frac{\omega_0^2}{1 - 2 \frac{L_1}{L_0}},$$

где  $\omega_0^2 = \frac{1}{L_0 C_0}$ ,  $\varphi$  – сдвиг фаз между соседними секциями.

Поток мощности может быть оценен по формуле

$$S_0 = \omega L_1 I_0^2 \sin \varphi. \quad (6)$$

Видно, что он линейно растет с ростом частоты и индуктивности связи и максимален при резонансной частоте  $\omega = \omega_0$ , когда сдвиг фаз между секциями равен  $\varphi = \pi/2$ .



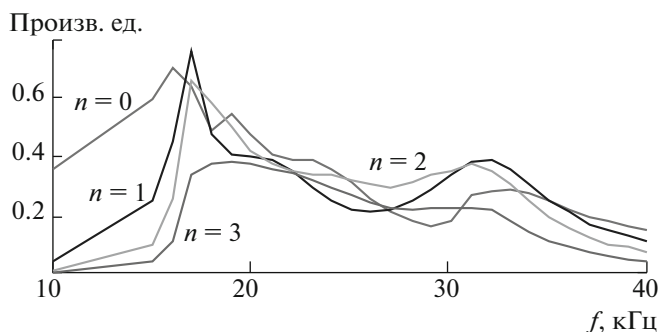


Рис. 6. Напряжение на секциях в зависимости от частоты.

Убывание амплитуды напряжения от секции к секции описывается декрементом

$$\delta = \frac{\gamma}{2\omega_0} \frac{L_0}{L_1} \frac{1}{\sin \varphi}, \quad (7)$$

где  $\gamma = R_0/L_0$ .

Видно, что для обеспечения качественной передачи мощности на большое число секций (~30) необходимо обеспечивать достаточно хорошую добротность элементарного колебательного контура на уровне  $Q = \gamma/\omega_0 \sim 100$ , что является сложной технической задачей. Другой технической проблемой является необходимость поддерживать сопротивление нагрузки равной волновому сопротивлению линии  $\rho = L_1\omega_0$ , где  $L_1$  — индукция связи. Отличие сопротивления от этого значения приведет к возникновению отраженных волн, что отрицательно скажется на распределении напряжения по секциям.

Для проверки этой идеи был создан макет, состоящий из 4 секций, со следующими параметрами элементов:  $L_0 = 0.58$  мГн, коэффициент связи между секциями  $L_1/L_0 = 0.44$ , резонансная частота единичного контура  $f_0 = 21$  кГц, добротность контура  $Q = 34$ . Сопротивление нагрузки 25 Ом равно волновому сопротивлению линии на резонансной частоте. На рис. 6 приведена зависимость амплитуды колебаний от частоты для различных секций  $n$ , а на рис. 7 — сдвиг фаз по напряжению между соседними секциями. Видно, что при частоте 21 кГц токи в соседних секциях сдвинуты на  $90^\circ$ , а амплитуды напряжений на различных секциях примерно одинаковы, что соответствует случаю бегущей волны. Убывание амплитуды напряжения от секции к секции хорошо соответствует формуле (7).

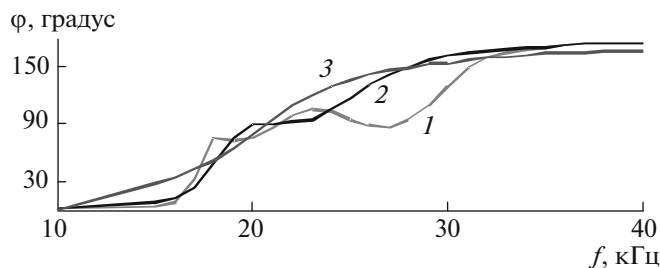


Рис. 7. Зависимость сдвига фаз от частоты между соседними секциями. 1 — сдвиг фаз между секциями  $n = 0$  и 1; 2 —  $n = 1$  и 2; 3 —  $n = 2$  и 3. В случае  $\omega = \omega_0$ , когда нет отраженной волны, это соответствует  $\varphi$  из формулы (4).

Таким образом, данная идея имеет право на существование, но все упирается в технические проблемы, связанные с созданием технически осуществимых элементарных осцилляторов на большую мощность с большой добротностью. К достоинствам данной схемы следует отнести возможность достижения хорошей высоковольтной изоляции между секциями, так как они не имеют совместных электрических компонентов.

### КАСКАДНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Более традиционным подходом является создание каскадного трансформатора на основе обычного трансформатора с общим магнитопроводом. В этом случае получается хорошая связь между соседними трансформаторами и низкая индуктивность рассеяния. Но в этом случае возникает необходимость гарантировать высоковольтную изоляцию между первичной и вторичной обмотками, а также их изоляцию от магнитопровода. При этом индуктивность рассеяния, хотя она и существенно меньше, остается достаточно большой, чтобы возникла необходимость в компенсирующих конденсаторах. Именно эта схема была выбрана в качестве рабочей для установки электронного охлаждения COSY 2 МэВ. Основные технические требования на каскадный трансформатор следующие: передача мощности 300 Вт для каждой из 33 секций и передача мощности порядка 5–10 кВт для высоковольтного терминала. Высоковольтные секции составляют ускорительную колонну с напряжением относительно друг друга от 0.1 до 60 кВ. На вершине ускорительной колонны находится высоковольтный терминал под потенциалом от 5 кВ до 2 МВ относительно земли.

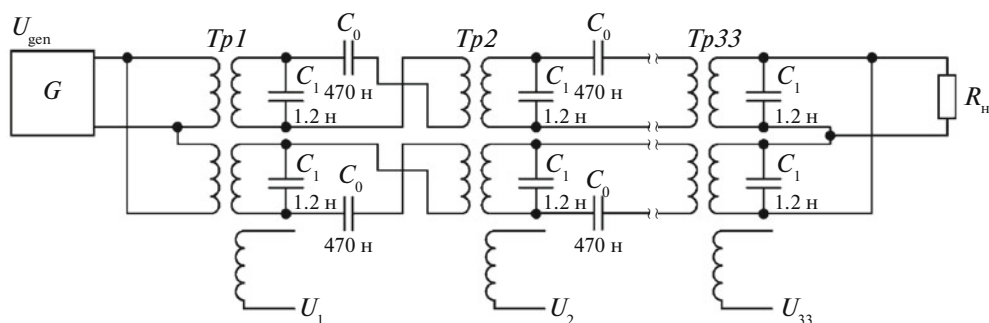


Рис. 8. Принципиальная схема каскадного трансформатора.

Принципиальная электротехническая и эквивалентная схемы показаны на рис. 8 и 9. Видно, что величина напряжения, которая будет на конечной нагрузке, сильно зависит от величины индуктивности рассеяния  $L_1$  и индуктивности холостого хода  $L_0$ . Для увеличения коэффициента передачи трансформатора по напряжению в схему включены конденсаторы  $C_0$  (рис. 8), уменьшающие импеданс “короткого замыкания” на резонансной частоте, и конденсаторы  $C_1$ , увеличивающие импеданс “холостого хода”. Сопротивления в эквивалентной схеме (рис. 9) соответствуют потерям в магнитопроводе и в обмотке каскадного трансформатора. Значения сопротивлений оценены по результатам исследований амплитудно-частотных характеристик.

Конструкция трансформатора выполнена по аналогии с конструкцией ускорительной трубки и показана на рис. 10. Трансформатор состоит из чередующихся керамических и металлических колец. Внутри металлического кольца находится магнитопровод с пятью обмотками. Одна пара обмоток служит для передачи мощности наверх, другая пара – для связи с нижним трансформатором, а пятая обмотка служит для отбора мощности для высоковольтной секции. Каждая секция оборудована разрядником для того, чтобы при высоковольтном пробое разряд проходил сквозь

них, а не по конструкции каскадного трансформатора. Потенциал секции каскадного трансформатора задается соответствующим потенциалом высоковольтной секции, для которой он служит источником энергии. Для охлаждения трансформатора используется трансформаторное масло, прокачиваемое снизу вверх. Сверху масло спускается по специальной трубе из сшитого полиэтилена. Полная длина каскадного трансформатора 2.2 м, диаметр колонны 0.4 м. Все секции каскадного трансформатора стягиваются вместе с помощью кевларовых нитей. Основные параметры каскадного трансформатора: геометрический размер (внешний и внутренний диаметры)  $\varnothing 28$  см –  $\varnothing 20$  см; толщина (2 кольца толщиной по 1 см, сложенные вместе) – 2 см; масса железа 4.8 кг; рабочая магнитная индукция 2 кГс; магнитные потери при индукции 2.0 кГс – 12 Вт/кг; рабочий ток – до 35 А (на одну ветвь), полный – до 70 А; рабочее напряжение до 600 В; полная мощность в трансформаторе до 40 кВт; полные потери до 7 кВт; количество витков в силовой обмотке (одна ветвь) – 28; масса меди – 230 г (28 витков); общий вес меди на 4 обмотки – 1 кг; сечение провода силовой обмотки (литцентрат AWG38) 5.8 мм<sup>2</sup>; сопротивление одной обмотки при 0 Гц (28 витков) – 15 мОм.

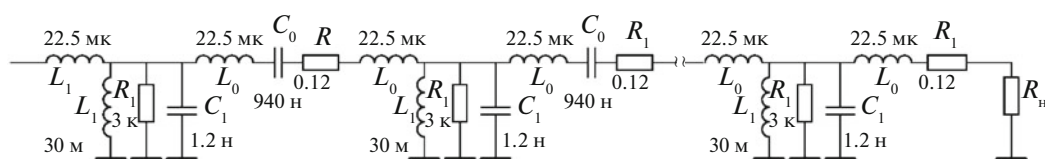
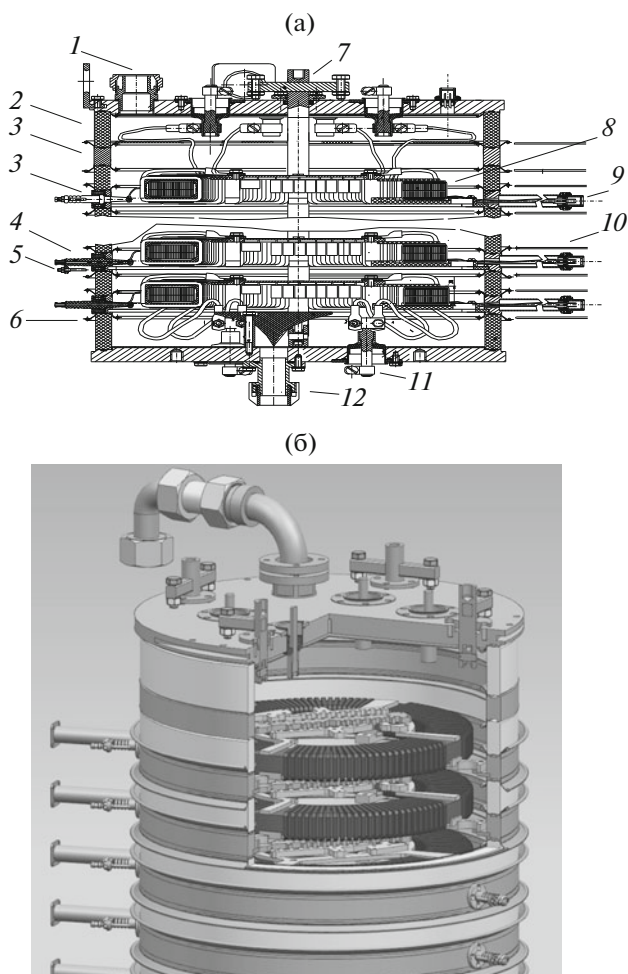


Рис. 9. Эквивалентная электрическая схема каскадного трансформатора.



**Рис. 10.** а – эскиз каскадного трансформатора: 1 – выход охлаждающего масла, 2 – керамическое кольцо, 3 – металлическое кольцо, 4 – ввод высокого напряжения внутрь каскадного трансформатора, 5 – высоковольтный разрядник, 6 – охранные кольца, 7 – механизм стяжки каскадного трансформатора, 8 – секция каскадного трансформатора, 9 – выход обмоток отбора мощности, 10 – металлические поверхности высоковольтной секции, в которой отбирается мощность, 11 – ввод мощности под потенциалом земли, 12 – вход масла; б – его внешний вид.

В качестве магнитопровода использовались кольца из нанокристаллического железа 5БДСР – нанокристаллического магнитомягкого сплава, являющегося новым материалом, получаемым скоростной закалкой расплава на поверхности быстровращающегося охлаждающего барабана. Его достоинствами являются высокая индукция при низкой коэрцитивной силе, низкие потери на перемагничивание при высоких частотах, близкая к нулю магнитострикция, высокая маг-

нитная проницаемость и высокое удельное электросопротивление. Эффективное сечение магнитопровода  $5.6 \text{ см}^2$ , коэффициент заполнения магнитопровода – 0.7. Магнитопровод пропитан бакелитовым лаком ЛБС-1 и имеет внешнюю изоляцию из нейлоновой пленки 0.1 мм в один слой с коэффициентом перекрытия 1.5. Для уменьшения потерь в силовых обмотках, связанных с высокой частотой, они были выполнены из провода типа литцентрат AWG-38, содержащего 735 проводов  $\varnothing 0.1 \text{ мм}$  каждый.

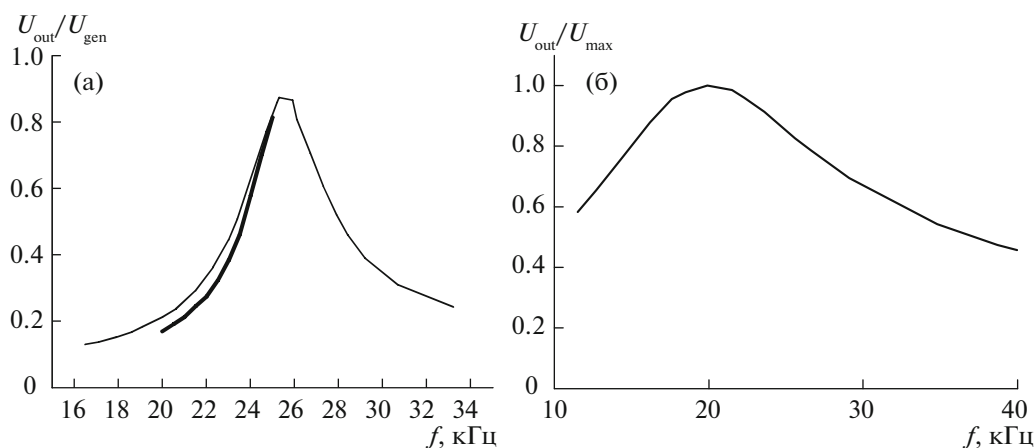
На рис. 11 представлены амплитудно-частотные характеристики для эквивалентных схем короткого замыкания и холостого хода для каскадного трансформатора, состоящего из 33 секций. Видно, что с помощью компенсирующих конденсаторов удалось получить резонансные рабочие частоты на уровне 25 кГц. Данная частота выбрана как компромисс между желанием максимально увеличить частоту для более эффективной передачи энергии и возможностью получить проблемы, связанные с высокочастотными паразитными резонансами на собственной межвитковой емкости. Данные проблемы наблюдались в конструкции каскадного трансформатора, описанной в работе [13], не позволившие ему выйти на рабочие параметры. Экспериментальное исследование амплитудно-частотной характеристики для нашей конструкции показало наличие паразитных резонансов в области частот 60 кГц.

На рис. 12 показано распределение напряжения вдоль каскадного трансформатора на работающей установке электронного охлаждения. Секция 10 соответствует начальной секции каскадного трансформатора рядом с генератором, обеспечивающим питание ускорителя, секция 42 – самой верхней секции рядом с высоковольтным терминалом, секции 0–9 – источникам питания, расположенным внутри высоковольтного терминала. Видно, что полученное распределение напряжения по высоковольтным секциям однородно с хорошей точностью. Перепад напряжения между секциями находится в пределах нормальной работы электронных блоков.

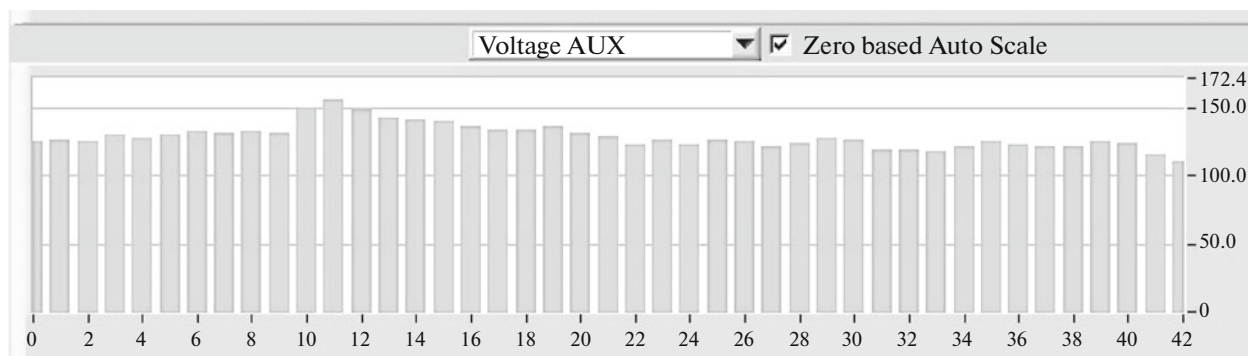
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов и практического использования каскадного трансформатора для снабжения мощностью большого числа секций показали осуществимость и полезность данного решения. Однако опыт показал, что данная реализация близка к своему практическому пределу по длине каскадного трансформатора и по числу секций. Дальнейшее увеличение параметров кас-





**Рис. 11.** Амплитудно-частотные характеристики последовательного (а) и параллельного (б) колебательных контуров. Тонкая линия – значения, измеренные при низком напряжении (генератор звуковой частоты), полужирная – результаты, полученные при использовании мощного генератора (30 А тока).  $R_H = 20$  Ом.



**Рис. 12.** Распределение напряжения собственных нужд вдоль ускорительной колонны.

кадного трансформатора, т.е. увеличение числа секций и максимального потенциала, требует новых технических решений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Behtenev E., Bocharov V., Bublely V., Vedenev M., Voskoboynikov R., Goncharov A., Evtushenko Yu., Zapiatkin N., Zakhvatkin M., Ivanov A., Kokoulin V., Kolmogorov M., Kondarov V., Konstantinov S., Krainov G., Kozak V., Kruchkov A., Kuper E., Medvedko A., Mironenko L., Panasiuk V., Parkhomchuk V., Reva V., Skrinsky A., Smirnov B., Skarbo B., Sukhina B., Shrainer K., Yang X.D., Zhao H.W., Li J., Lu W., Mao L.J., Wang Z.X., Yan H.B., Zhang W., Zhang J.H. // Proc. RuPAC XIX. Dubna, Russia. 2004. P. 506.
2. Veremeenko V.M., Voskoboynikov R.V., Goncharov A.D., Evtushenko Yu.A., Kolmogorov V.V., Kondarov M.N., Kraynov G.S., Kryuchkov A.M., Medvedko A.S., Parkhomchuk V.V., Petrov S.P., Reva V.B., Tiunov M.A., Karymov B.R. // Proc. RuPAC XX. Novosibirsk, Russia. 2006. P. 97.
3. Валяев Ю.Д., Казарезов И.В., Кузнецов В.И., Остапкин В.П. Препринт № 89-160. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1989.
4. Veis M.E., Korabelnikov B.M., Kuksanov N.K., Salitov R.A. // Proc. EPAC I. Rome, Italy. 1988. P. 1361.
5. Kazakevich G., Burov A., Boffo C., Joireman P., Saewert G., Schmidt C.W., Shemyakin A. Preprint FERMILAB-TM-2319-AD. 2005; <http://lss.fnal.gov/archive/test-tm/2000/fermilab-tm-2319-ad.pdf>
6. Shemyakin A., Burov A., Crawford A.C., Dudnikov V., Kashikhin V., Kroc T., Leibfritz J., MacLachlan J., Markarov A., McGee M., Nagaitsev S., Saewert G., Schmidt C.W., Volk J., Warner A., Vostrikov V. // Proc. EPAC VII. Vienna, Austria. 2000. P. 1265.
7. Alinovsky N., Batrakov A.M., Bedareva T.V., Bekhtenev E.A., Belikov O.V., Bocharov V.N., Borodich V.V., Bryzgunov M.I., Bublely A.V., Chekavinskiy V.A., Cheskidov V.G., Dovzhenko B.A., Erokhin A.I., Fatkin G.A., Fedotov M.G., Goncharov A.D., Gorchakov K.M., Gosteev V.K., Gusev I.A.,

- Ivanov A.V., Karpov G.V., Koisin Yu.I., Kondaurov M.N., Kryuchkov A.M., Lisitsyn A.D., Lopatkin I.A., Mamkin V.R., Medvedko A.S., Panasyuk V.M., Parkhomchuk V.V., Poletaev I.V., Polukhin V.A., Protopopov A.Yu., Pureskin D.N., Putmakov A.A., Reva V.B., Semenov E.P., Senkov D.V., Skorobogatov D.N., Zapiatkin N.P.* // Proc. COOL-11. Alushta, Ukraine. 2011. P. 37.
8. *Reva V.B., Alinovskiy N.I., Bedareva T.V., Bekhtenev E.A., Belikov O.V., Bocharov V.N., Borodich V.V., Bryzgunov M.I., Bublely A.V., Chekavinskiy V., Cheskidov V., Dovzhenko B., Erokhin A., Fedotov M., Goncharov A.D., Gorchakov K., Gosteev V.K., Gusev I., Ivanov A., Karpov G., Koisin Yu., Kondaurov M., Kozak V., Kruchkov A., Lisitsyn A., Lopatkin I., Mamkin V., Medvedko A.S., Panasyuk V.M., Parkhomchuk V.V., Poletaev I., Polukhin V., Protopopov A.Yu., Pureskin D., Putmakov A., Selivanov P.A., Semenov E., Senkov D., Skorobogatov D.N., Zapiatkin N.P.* // Proc. COOL-13. Murren, Switzerland. 2013. P. 79.
9. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. М.: Ижевск, 2002.
10. *Абдурашитов С.А., Тупиченков А.А., Вершинин И.М., Тененгольц С.М.* Насосы и компрессоры. М.: Недра, 1974.
11. *Алиновский Н.И., Булушев А.Ф., Клюев В.Ф., Константинов Е.С., Константинов С.Г., Кожемякин А.В., Крючков А.М., Пархомчук В.В., Петриченко М.В., Растигеев С.А., Рева В.Б., Сухина Б.Н.* // ВАНТ. 2006. Вып. 2. С. 34.
12. *Салимов Р.А.* // УФН. 2000. Т. 170. № 2. С. 197.
13. *Reginato L.* // Proc. PAC-1991. San Francisco, California. 1991. P. 2918.