

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.318.435.1

МАГНИТОПРОВОДЫ ИЗ АМОРФНОЙ ЛЕНТЫ
ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

© 2012 г. А. В. Акимов, П. В. Логачев, А. А. Корепанов, Ф. В. Аверин*,
О. В. Савинова*, Г. Л. Мамаев**, С. Л. Мамаев**

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11
E-mail: a.a.korepanov@inp.nsk.su*

**ОАО “Ашинский металлургический завод” (АМЗ)
Россия, 456010, Аша, ул. Мира, 9
E-mail: las@amet.ru*

*** Московский радиотехнический институт РАН (МРТИ)
Россия, 117519, Москва, Варшавское ш., 132
E-mail: mamaev_g@mtu-net.ru*

Поступила в редакцию 31.08.2011 г.

В линейном индукционном ускорителе для импульсной рентгенографии предлагается использовать индукционные ячейки с сердечниками, намотанными тонкой лентой из аморфного сплава на основе железа. Приведено сравнение характеристик импульсного намагничивания тороидальных сердечников, выполненных с межслойной изоляцией и без нее. Представлены результаты включения инжектора, созданного на основе изготовленных сердечников.

ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН ведутся работы по созданию линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) для импульсной рентгенографии со следующими проектными параметрами: энергия электронов 20 МэВ; амплитуда тока пучка 2 кА; длительность полки импульса 200–300 нс; нестабильность энергии $\pm 1\%$; частота следования импульсов ≤ 0.1 Гц; интервал между импульсами в двухимпульсном режиме 2–10 мкс.

В качестве первого этапа работы был создан инжектор электронного пучка на энергию 2 МэВ и ток 2 кА. Для формирования импульсов ускоряющего напряжения на ускоряющих трубках инжектора используются индукторы на напряжение 21 кВ.

Габариты и стоимость всего ускорителя определяются в значительной степени объемом индукторов. В то же время потери в сердечниках являются дополнительной нагрузкой системы импульсного питания ускорителя. Поэтому основными требованиями, предъявляемыми к сердечникам индукторной системы ускорителя, являются максимальный перепад индукции и малые потери на перемагничивание.

В настоящее время наиболее доступным материалом, обладающим низкими потерями в импульсном режиме, является тонкая лента (20–30 мкм) из аморфных сплавов на основе железа или нанокристаллических сплавов [1–3]. Известно, что в

режиме импульсного перемагничивания сильное влияние на магнитные характеристики сердечников оказывают межслойные вихревые токи, если не обеспечена качественная изоляция соседних слоев ленты. Напряжение между соседними слоями сердечника, работающего на полном размахе индукции $\sim 2\text{--}3$ Тл и длительности импульса < 0.5 мкс, может составлять от единиц до десятков вольт.

Сложность нанесения изоляции усугубляется необходимостью отжига при температуре 400–550°C. Изоляция должна не только выдерживать данную температуру, но и не приводить к механическим напряжениям в ленте при остывании магнитопровода. В практике используется несколько способов нанесения изоляции [4], например навивка ленты одновременно с тонкой изолирующей пленкой (майлар, полиамид, слюдяная бумага). Однако такой способ не позволяет получить большой коэффициент заполнения сердечника лентой из-за сравнительно большой толщины изоляции (несколько микрометров). Другой способ заключается в протягивании ленты через раствор с изолирующим материалом (метилат магния, жидкое стекло), сушке и затем навивке сердечника.

Подобная технология используется в МРТИ [5]. Она показала хорошие результаты при изготовлении магнитопроводов, работающих в наносекундном и микросекундном диапазонах. Из недостатков этого способа можно отметить относительно низкую скорость навивки (несколько

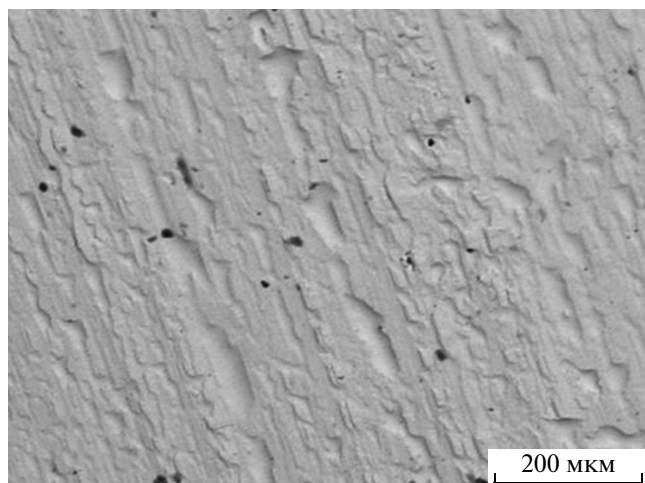


Рис. 1. Вид поверхности ленты из сплава 9КСР.

сантиметров ленты в секунду) из-за необходимости сушки покрытия. В качестве альтернативного, более дешевого варианта был рассмотрен способ изготовления магнитопроводов без изоляции по технологии АМЗ. В работе приведены данные измерений магнитных характеристик в импульсном режиме для магнитопроводов, изготовленных с изоляцией по технологии МРТИ и без изоляции.

1. ВЫБОР МАТЕРИАЛА. МАГНИТОПРОВОДЫ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ЛЕНТЫ

Результаты исследования различных магнитных материалов для сердечников, изготовленных с разным типом изоляции ленты, представлены в [6]. На конечные свойства магнитопроводов кроме марки ленты влияет много технологических параметров — тип изоляции ленты, способ намотки ленты, режим термообработки, корпусировка сердечника. Поэтому наиболее корректным является сравнение свойств магнитопроводов, изготовленных по одинаковой технологии.

В работе [7] приведено сравнение основных марок аморфных и нанокристаллических сплавов, производимых в России (АМЗ), и аморфной ленты производства США (AlliedSignal), причем все образцы были изготовлены по технологии МРТИ. Вкратце она включает следующие этапы: покрытие ленты жидким стеклом, предварительная сушка, контроль качества изоляционного покрытия и затем намотка на оправку с контролируемым натяжением. Отжиг магнитопровода проводится в продольном магнитном поле для получения высокого коэффициента прямоугольности петли гистерезиса.

В результате можно сделать выводы: 1) из аморфных сплавов наименьшими потерями на

перемагничивание обладают сплавы 2605SC (AlliedSignal) и 2НСР (АМЗ); 2) нанокристаллический сплав 5БДСР (АМЗ) и его зарубежные аналоги Finemet и Vitroperm при меньшем размахе индукции (~1 Тл) имеют потери в 2 раза меньше, чем лучшие аморфные сплавы.

За время проведения работ на АМЗ был разработан новый сплав АМЕТ-1СР, имеющий характеристики, близкие к сплаву 2НСР, но отличающийся большей индукцией насыщения (1.56 Тл).

Необходимо отметить, что качество поверхности и геометрия ленты производства АМЗ уступают качеству ленты AlliedSignal. Непрямоугольность сечения ленты и повышенная шероховатость, заставляющая использовать более толстые изоляционные покрытия, приводит к снижению коэффициента заполнения магнитопровода металлом. Несмотря на этот недостаток и принимая во внимание то, что индукторная система является одной из ключевых в ЛИУ, было принято решение использовать ленту российского производителя.

Для инжектора индукционного ускорителя в МРТИ были изготовлены магнитопроводы из ленты толщиной ~30 мкм марки 2НСР размерами 1000 × 630 × 25 мм (внешний диаметр × внутренний диаметр × высота). Для получения хорошей механической прочности после термомагнитной обработки торцевые поверхности магнитопроводов покрывались тонким слоем оксидного компаунда, а по внешнему диаметру накладывался бандаж из полосок тонкого стеклотекстолита.

Коэффициент заполнения магнитопроводов лентой варьировался от 0.69 до 0.74 при его среднем значении $k_3 = 0.71$ по 8 изготовленным образцам. Коэрцитивная сила, измеренная на частоте 50 Гц и амплитуде магнитного поля 85 А/м, составила ≈7 А/м. Коэффициент прямоугольности петли гистерезиса лежал в диапазоне от 0.76 до 0.81. Это примерно на 10% заниженное значение для материала 2НСР, термообработанного в продольном магнитном поле, что можно объяснить влиянием более раннего насыщения внутренних слоев магнитопровода из-за относительно большего отношения внешнего диаметра к внутреннему — ~1.6.

2. МАГНИТОПРОВОДЫ БЕЗ ИЗОЛЯЦИИ МЕЖДУ СЛОЯМИ

На ОАО «АМЗ» был предложен способ изготовления магнитопроводов без изоляции между слоями. Так как поверхность аморфной ленты не является идеально ровной, а содержит достаточно большие микронеровности, то несмотря на отсутствие изоляции замыкание соседних слоев происходит не по всей поверхности, а только в местах микровыступов (на рис. 1 показан вид поверхности ленты 9КСР). Это может значительно увели-

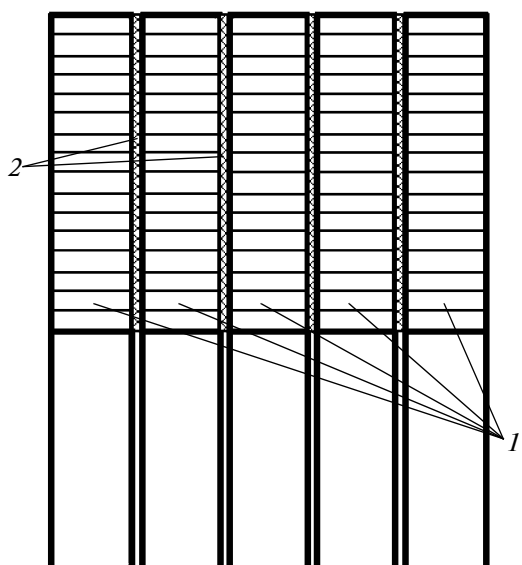


Рис. 2. Составной магнитопровод. 1 – сердечники без изоляционных слоев; 2 – изоляционные кольца.

чить эффективное сопротивление поверхности ленты и уменьшить потери от межслойных вихревых токов. Слабое влияние изоляции аморфной ленты на потери было отмечено в ранних исследованиях аморфных сплавов [8]. Этот эффект объяснялся сильной шероховатостью поверхности ленты, изготовленной по старой технологии, и, как следствие, относительно большим контактным сопротивлением между слоями ленты. Уменьшения межслойных вихревых потерь в сердечниках без покрытия ленты можно добиться, секционировав магнитопровод на отдельные части, намотанные более узкой лентой (рис. 2). С уменьшением ширины ленты уменьшается площадь отдельных контуров, в которых наводятся вихревые токи, и соответственно уменьшается влияние вихревых токов на магнитные характеристики магнитопроводов.

Такой подход был использован при производстве магнитопроводов на ОАО «АМЗ» из ленты 2НСР шириной 5 мм. После намотки и термообработки сердечников размерами $1000 \times 630 \times 5$ мм для получения механической прочности каждый сердечник проходил пропитку в два этапа: сначала слабым раствором бакелитового лака, затем покрывался тонким слоем эпоксидного компаунда. Однако из-за отсутствия изоляции между слоями ленты лак и компаунд хорошо проникают в глубь сердечника и при высыхании создают механические напряжения на поверхности ленты. Это приводит к уменьшению остаточной индукции и наклону петли гистерезиса, т.е. придание прочности сердечнику ухудшает магнитные характеристики.

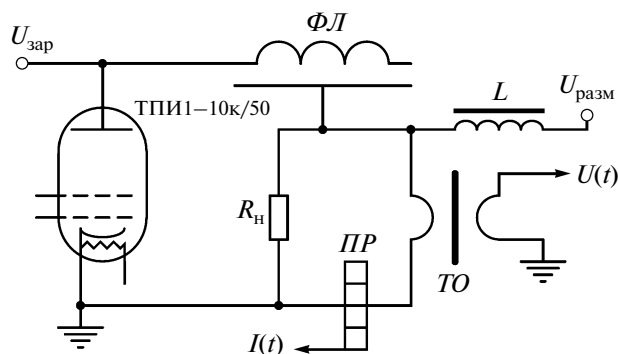


Рис. 3. Схема измерения импульсной характеристики $B(H)$ магнитопроводов инжектора ЛИУ. $\Phi Л$ – формирующая линия, $ПР$ – пояс Роговского, $ТО$ – тестируемый образец; $U(t)$ – напряжение на измерительном вилке, $I(t)$ – ток пояса Роговского.

Был подобран режим пропитки и покрытия, который незначительно влиял на статическую петлю сердечников. С учетом того, что размагничивающее поле в индукторах ЛИУ составляет $100\text{--}200$ А/м, коэффициент прямоугольности петли на размах индукции почти не влияет. Поэтому при термообработке сердечников было решено исключить относительно сложный этап наложения продольного магнитного поля при остывании.

В итоге, на ОАО «АМЗ» было изготовлено 570 сердечников высотой 5 мм. Из них после измерения потерь в импульсном режиме было отбраковано $\sim 9\%$. Для усреднения магнитных характеристик оставшиеся сердечники были скомбинированы по 5 штук в 104 составных магнитопровода. В качестве изоляции между соседними сердечниками использовалась лакоткань толщиной 0.15 мм в 2 слоя. Средний коэффициент заполнения лентой у получившихся магнитопроводов составил 0.82. Этот факт можно объяснить как отсутствием изоляции, так и уменьшением влияния неоднородности толщины ленты на упаковку слоев ленты в отдельном сердечнике.

3. ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОПРОВОДОВ

Импульсные кривые намагничивания (зависимость индукции B от напряженности поля H при импульсном намагничивании) изготовленных магнитопроводов снимались в их номинальном режиме работы в инжекторе ЛИУ. Для этого использовался импульсный генератор, разработанный для питания индукторной системы инжектора. На рис. 3 приведена схема измерения импульсных кривых намагничивания. Генератор на основе одинарной формирующей линии ($\Phi Л$), заряжаемый от источника $U_{зар}$, обеспечивает на эквиваленте нагрузки прямоугольный импульс

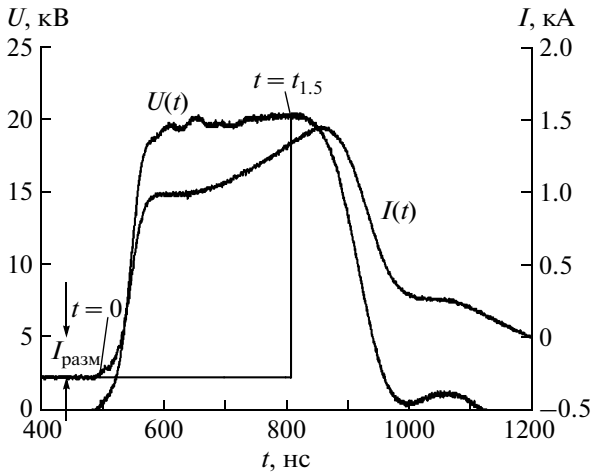


Рис. 4. Формы тока и напряжения в схеме измерения импульсных характеристик магнитопроводов.

амплитудой 20 кВ с фронтом длительностью 100 нс и плоской вершиной длительностью 200–220 нс. Индукция B и напряженность поля H определяются соотношениями: $B(t) = \int_0^t U(t)dt / Sk_3$,

$H(t) = I(t)/l_{cp}$, где S – площадь сечения испытуемого образца, l_{cp} – длина средней магнитной силовой линии магнитопровода.

Импульсное размагничивающее поле $H_{разм}$ длительностью ~ 300 мкс, формируемое от источника напряжения $U_{разм}$ через развязывающий дроссель, составляет до 200 А/м. Такая большая величина поля обусловлена двухимпульсным режимом работы генераторов ускорителя. Для формирования на индукторе последовательности из двух импульсов с интервалом от 2 мкс необходимо в промежутке между импульсами перемагнитить сердечник. Большой ток перемагничивания обеспечивается за счет тока цепи размагничивания [9].

Полный размах индукции с учетом спада составляет 2.1 Тл. Небольшой рабочий размах индукции, выбранный для сплава 2НСР, обусловлен несколькими причинами: 1) необходимостью быстрого перемагничивания индукторов (этот процесс затягивается, если магнитопровод начинает насыщаться на спаде импульса); 2) запас по индукции даст возможность в перспективе увеличить длительность импульса ускорителя до 250–300 нс; 3) при малом размахе индукции подгрузка генератора током намагничивания (в том числе нелинейная) невелика. Поэтому упрощается настройка ΦL и ослабляются требования к коммутатору и изолирующему элементу двухимпульсного генератора – магнитному “вентилю” [9].

Величину дополнительной нагрузки, создаваемой индуктором для генератора, можно оценить, вычисляя энергию, потребляемую индуктором за

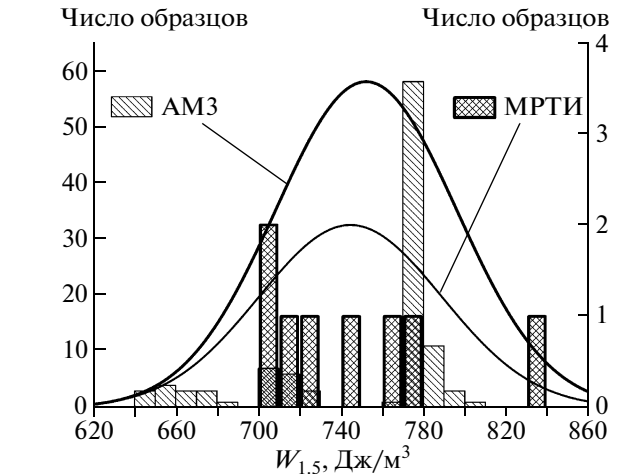


Рис. 5. Распределение удельных потерь $W_{1.5}$ по магнитопроводам индукторов инжектора ЛИУ.

время импульса: $W_{1.5} = \int_0^{t_{1.5}} U(t)(I(t) - I_{разм})dt / Vk_3$, где $I_{разм}$ – ток размагничивания в момент измерения (рис. 4), V – объем магнитопровода. Интегрирование ведется от момента времени, когда напряжение $U(t)$ начинает нарастать, до момента времени $t_{1.5}$, когда размах индукции в сердечнике составит 1.5 Тл (рис. 4). При каждом измерении величина средней скорости нарастания индукции $dB/dt_{cp} = B(t_{1.5})/t_{1.5}$ поддерживалась постоянной ≈ 5 Тл/мкс.

На рис. 5 показано распределение величин $W_{1.5}$ по изготовленным образцам магнитопроводов. Среди магнитопроводов МРТИ можно выделить 2 партии. Образцы из первой партии (4 шт.) имеют большие потери и их разброс, чем магнитопроводы из второй партии. Это связано с обработкой технологии намотки и отжига крупногабаритных изделий.

В расчетах индукции и удельных потерь составных магнитопроводов АМЗ коэффициент заполнения железом принимался равным 0.7. Это позволяет по вычисленным значениям $W_{1.5}$ сравнивать абсолютные потери магнитопроводов. Таким образом, с точки зрения нагрузки генератора магнитопроводы, изготовленные без изоляции, в среднем не отличаются от магнитопроводов с изоляцией (среднее значение энергии потерь примерно одинаково). Однако из-за разброса параметров от поставки к поставке разброс в потерях составных магнитопроводов составил $\sim 25\%$. Нелинейность нагрузки, как и ожидалось, выше из-за низкого коэффициента прямоугольности. На рис. 6 приведены кривые $B(H)$, снятые для двух лучших экземпляров магнитопроводов (с изоляцией и без). Необходимость введения более сильной неоднородности в ΦL генератора для компенсации спада вершины приводит к ухудше-

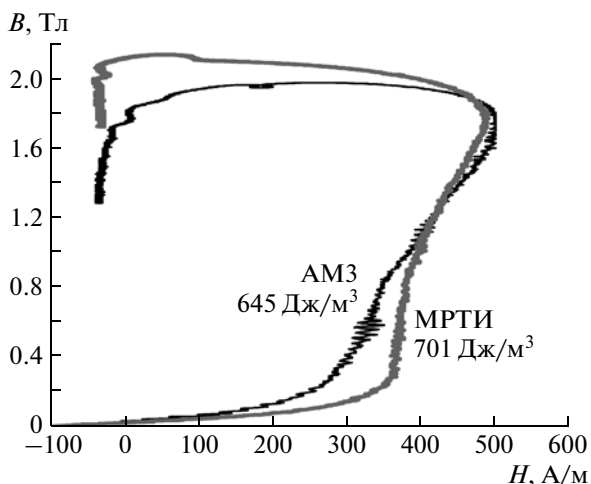


Рис. 6. Импульсные кривые намагничивания лучших образцов магнитопроводов, изготовленных в МРТИ и на АМЗ.

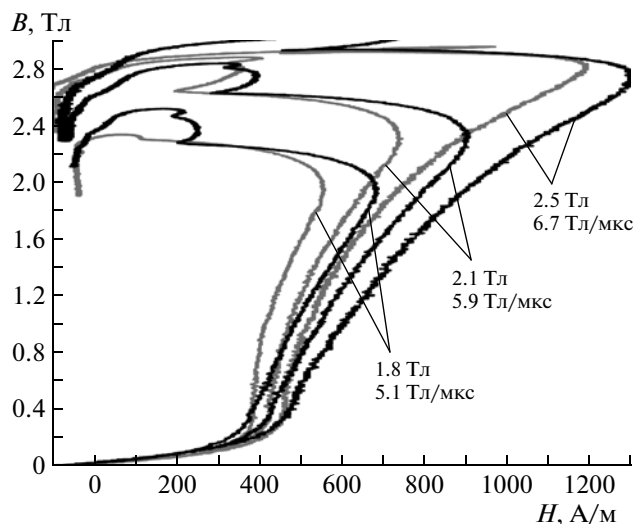


Рис. 7. Кривые импульсного намагничивания магнитопроводов инжектора ЛИУ в режиме с повышенным размахом индукции при размагничивающем поле $H_{разм} = 100$ А/м: серые – магнитопровод МРТИ, черные – составной магнитопровод АМЗ.

нию согласования с нагрузкой и к затягиванию среза импульса.

Для определения возможности увеличения рабочей индукции для формирования импульса длительностью до 300–350 нс были проведены испытания магнитопроводов производства МРТИ и АМЗ в режиме с перепадом индукции до 2.5 Тл при $dB/dt_{ср}$ до 6.7 Тл/мкс (рис. 7). Видно, что магнитопроводы обоих типов имеют полуторакратный запас по индукции и могут быть использованы для формирования более длинных или высоковольтных импульсов.

Один из составных магнитопроводов прошел испытания на долговременную стабильность параметров. Режим работы магнитопровода при испытании был близок к номинальному режиму работы в инжекторе ($\Delta B = 1.6$ Тл, $dB/dt_{ср} = 5.4$ Тл/мкс, $H_{разм} = 200$ А/м). Измерение величины $W_{1.6}$ – энергии потерь в магнитопроводе при $\Delta B = 1.6$ Тл показало, что за $2.5 \cdot 10^5$ импульсов изменение ее величины не превысило погрешности измерений ($\pm 3\%$). Испытания с перенапряжением примерно в 1.5 раза также не привели к увеличению потерь.

Однако при испытаниях сердечников для магнитных вентилях, изготовленных по такой же технологии, было обнаружено необратимое увеличение потерь в магнитопроводе при скорости нарастания индукции ~ 10 Тл/мкс, что составляет двукратное превышение номинального значения. Вероятнее всего деградация параметров связана с электрическими пробоями между слоями и последующим уменьшением сопротивления между слоями ленты. Это явление было обнаружено на образцах размерами $214 \times 76 \times 5$ мм. При таком соотношении диаметров (почти 3) в процессе насыщения внутренних слоев сердечника полное

напряжение перераспределяется между внешними слоями. При этом напряжение между слоями может увеличиться многократно.

Для индукторных магнитопроводов, с учетом малого рабочего перепада индукции и небольшого соотношения диаметров, этот эффект не проявляется при условии нормального размагничивания. Оценкой на максимально допустимое витковое напряжение индукторных магнитопроводов может быть значение, примерно двукратное от номинального.

Индукторная система инжектора ЛИУ была собрана из 8 индукторов на основе магнитопроводов МРТИ и 88 индукторов с магнитопроводами АМЗ. При пусконаладочных работах было по-

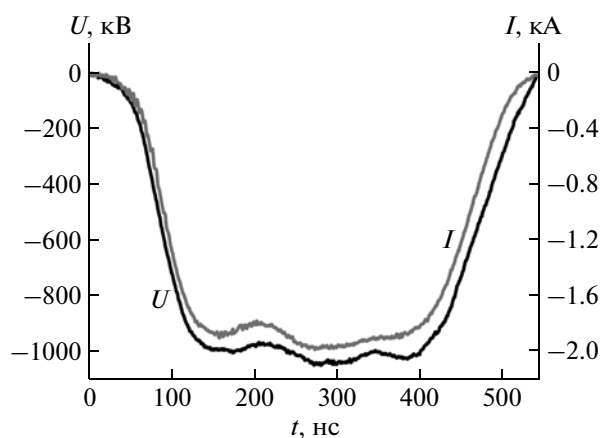


Рис. 8. Осциллограммы напряжения и тока вакуумного диода инжектора ЛИУ.

лучено номинальное напряжение на первой половине инжектора 1 МВ (рис. 8) и примерно 80% от номинала на второй половине инжектора — ограничение, связанное не с параметрами индукторов, а с недостаточной вакуумной электрической прочностью ускоряющей трубки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для инжектора линейного индукционного ускорителя на ОАО “АМЗ” и в МРТИ РАН были изготовлены магнитопроводы индукторной системы. Проверенная ранее технология изготовления импульсных магнитопроводов с изоляцией ленты полностью удовлетворяет требованиям как существующего ускорителя, так и проектируемого ЛИУ с увеличенной длительностью импульса. Была также апробирована более простая технология изготовления составных ленточных магнитопроводов без межслойной изоляции. Средние потери на перемагничивание в них сопоставимы с потерями в магнитопроводах с изоляцией. Обнаруженный недостаток, связанный с ограничением по витковому напряжению для данной технологии, не позволяет использовать ее для магнитопроводов, работающих при скростях нарастания индукции >10 Тл/мкс. В целом, индукторная си-

стема на основе магнитопроводов обоих типов обеспечила проектные параметры и пусконаладочные работы инжектора ЛИУ.

Работа была частично поддержана Министерством образования и науки РФ (контракты 14.740.11.0160, П2493).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.amet.ru>
2. <http://www.metglas.com>
3. <http://www.vacuumschmelze.de>
4. *Smith C.H., Turman B.N., Harjes H.C.* // IEEE Trans. Electron Devices. 1991. V. 38 (4). P. 750.
5. *Mamaev G., Bolotin I., Cicherbakov A., Mamaev S. et al.* // Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference. Vancouver, Canada. 1997. P. 1313.
6. *Molvik A.W., Faltens A.* // Physical review special topics — Accelerators and Beams. 2002. V. 5. Issue 8. P. 080401.
7. *Bolotin I., Mamaev G., Mamaev S. et al.* // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. New York. 1999. P. 1482.
8. *Nathasingh D.M., Smith C.H., Datta A.* // IEEE Trans. Magnetics. 1984. V. MAG-20. № 5. P. 1332.
9. *Акимов А.В., Бак П.А., Корепанов А.А. и др.* // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2008. Т. 3. Вып. 4. С. 68.