

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Шеметова Анастасия Алексеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Определение параметров магнитопроводов из аморфных сплавов в  
импульсном режиме**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19314

**Научный руководитель:**

Живанков Кирилл Игоревич

Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Преподаватель практикума**

Капуста Дмитрий Николаевич

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Куратор практикума:**

к. т. н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Целью работы является изучение работы магнитопроводов из аморфных сплавов и определение их магнитных параметров в импульсном режиме. Рассмотрены основные характеристики магнитопроводов, их влияние на работу импульсного трансформатора и способы их определения из кривой гистерезиса. Проведен ряд экспериментов на высоковольтном импульсном стенде, в ходе которых осциллографировались ток в обмотке возбуждения кольцевого магнитопровода и напряжение на измерительном витке, охватывающем его сечение при подаче на обмотку возбуждения прямоугольного высоковольтного импульса. Экспериментальные данные обработаны, построены и проанализированы кривые намагничивания (зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля) для каждого случая. Определены магнитные параметры исследуемых магнитопроводов и сделаны выводы относительно возможности их применения в индукторах создаваемого в ИЯФ высоковольтного модулятора - индукционного сумматора напряжения.

Ключевые слова: магнитопровод, аморфная лента, петля гистерезиса, импульсное перемангничивание.

## Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть.....	4
3. Методика проведения измерений.....	6
4. Измерительный стенд.....	8
5. Измерение импульсных кривых намагничивания и обработка полученных результатов.....	9
6. Выводы.....	14
7. Список литературы.....	14
8. Приложения.....	15

## 1. Введение

В настоящее время в ИЯФ СО РАН ведутся работы по созданию нескольких крупных физических установок, требующих разработки источников питания (модуляторов) с высокой импульсной мощностью. В лаборатории 5-1 спроектирован модулятор, принцип действия которого основан на индукционном суммировании импульсов напряжений с десяти индукторов на общей нагрузке. К качеству прямоугольного импульса напряжения на нагрузке предъявляются высокие требования: неоднородность плоской вершины импульса должна быть не более 0.5% (при  $U_{\max} = 23$  киловольт,  $I_{\max} \sim 6$  кА,  $\tau \sim 5$  микросекунд), а длительности фронта и спада не должны превышать 700 наносекунд. Соблюдение данных требований не в последнюю очередь зависит от магнитопроводов, используемых в индукторах. Они должны обеспечивать возможность передачи соответствующих высоковольтных импульсов с достаточно крутыми фронтами и малым спадом вершины, при этом иметь низкие потери и минимально возможные габариты. Наиболее полно таким требованиям отвечают магнитопроводы из аморфных сплавов.

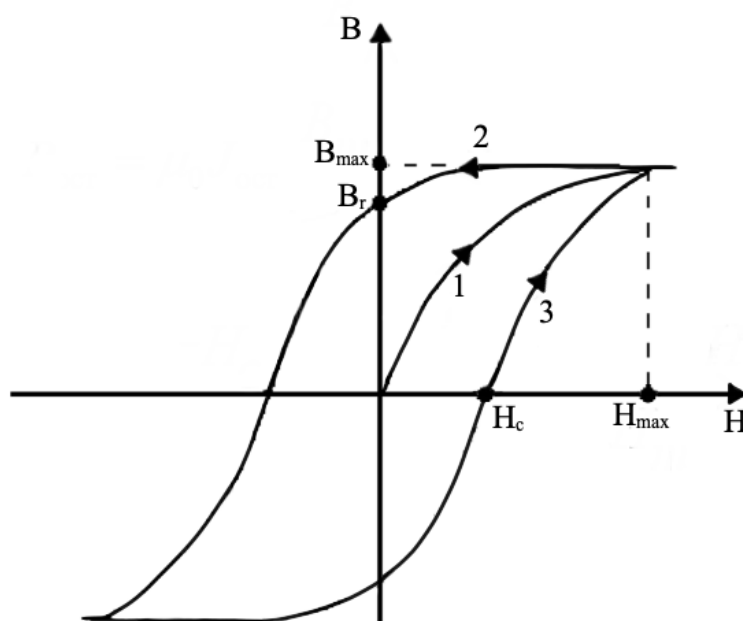
Данная работа посвящена экспериментальному определению магнитных параметров магнитопроводов из аморфной ленты, предлагаемых для установки в индукторы прототипа модулятора.

Целью данной работы является изучение работы магнитопроводов из аморфных сплавов и определение их магнитных параметров в импульсном режиме. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: изучить физику работы магнитопровода в импульсном трансформаторе; ознакомиться с принципом работы измерительного стенда и методикой измерений; провести измерения магнитных параметров магнитопроводов в импульсном режиме.

## 2. Теоретическая часть

Магнитная проницаемость ферромагнетиков зависит от напряженности поля. Если циклически менять напряженность поля, то зависимость  $B(H)$  изображается кривой, называемой петлей гистерезиса (рис. 1). При первоначальном

включении магнитного поля величина  $B$  растет на ветви 1, и уменьшается в соответствии с ветвью 2. При обращении величины  $H$  в ноль, ферромагнетик сохраняет значение намагниченности, которое называется остаточной намагниченностью. Величина индукции  $B$  оказывается равной нулю под действием противоположно направленного поля напряженности  $H_c$ , которая называется коэрцитивной силой. При дальнейшем изменении напряженности магнитного поля, получается ветвь 3.



**Рис. 1.** Основные параметры магнитопроводов на петле гистерезиса

Когда индукция  $B$  равна значению  $B_r$ , дальнейшее снижение значения  $B$  до нуля, когда  $H$  достигает величины  $-H_c$ , происходит с запаздыванием. Если при максимальном значении  $H$  намагниченность достигает насыщения, то получается петля, которая называется предельной петлей гистерезиса: при значении  $H$ , большем  $H_{max}$ , ветви 2 и 3 переходят в одну прямую линию [1].

Наклон линии определяется магнитной проницаемостью  $\mu$  ( $B/H$ ). Площадь, заключенная в контур гистерезиса, представляет собой невосстанавливаемую энергию (потери). Площадь между петлей гистерезиса и вертикальной осью — возмещаемая накопленная энергия. Когда обмотка соединена с магнитным

сердечником, отношение электрической энергии к магнитной регулируется законом Фарадея и законом Ампера. Эти законы действуют двунаправленно. Согласно закону Фарадея, изменение потока регулируется напряжением, приложенным к обмотке. Таким образом, электрическая энергия преобразуется в энергию, потерянную или сохраненную в магнитной системе (или сохраненная магнитная энергия преобразуется в электрическую энергию).

На рис. 1 показано, где на петле гистерезиса находятся основные параметры магнитопроводов – коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная намагничённость  $B_r$ , амплитуда напряжённости магнитного поля  $H_{max}$ , максимальная индукция  $B_{max}$ .  $B_r$  – намагничённость ферромагнитного материала при нулевом напряжении,  $H_c$  – напряжённость внешнего магнитного поля, необходимая для полного размагничивания ферромагнетика.

Округление обусловлено неоднородными аспектами материала сердечника и его формы. К аномалиям материала, которые могут наклоняться и округляться, относятся такие факторы, как изменчивость в легкости намагничивания частиц, входящих в состав материала, загрязнение, осаждение металлических составляющих и так далее. Формы сердечников, которые имеют острые углы, будут способствовать круглым углам в магнитной характеристике. Интенсивность поля и плотность потока значительно сконцентрированы вокруг внутреннего пространства. В результате, эти области будут насыщаться раньше, чем остальная часть активной зоны, что вызовет смещение потока на более длинный путь по мере приближения насыщения. Ториодальные формы сердечника относительно свободны от этих эффектов.

### **3. Методика проведения измерений**

Магнитопроводы из аморфной ленты имеют довольно большой разброс параметров, обусловленный, главным образом, технологией производства ленты, способом ее изоляции и режимом отжига. Объём одной отливки обычно составляет 30-40 кг ленты, а масса магнитопровода может достигать сотни килограмм. Получается, что одна партия магнитопроводов (а иногда и один магнитопровод) может состоять из нескольких видов ленты, имеющих отличия

в химическом составе, толщине, клиновидности и чистоте поверхности, что сказывается на качестве металла и коэффициенте заполнения магнитопровода, а значит, и его магнитных свойствах. Производитель проводит выходной контроль магнитопроводов и снабжает их паспортами с указанными в них основными параметрами, измеренными на переменном токе промышленной частоты. Такие измерения не дают полной информации о работе магнитопровода в режимах с большой скоростью перемагничивания, т.е. при передаче коротких импульсов с высокой импульсной мощностью [2].

Одним из способов получения такой информации является измерение импульсных характеристик магнитопроводов. Импульсные кривые намагничивания – зависимость индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$  при импульсном намагничивании – снимаются в режиме работы магнитопровода, близком к номинальному режиму его работы в установке. Для этого мы поместим тестируемый магнитопровод в одновитковую обмотку возбуждения и будем подавать на нее импульсы высокого напряжения с параметрами, аналогичными номинальным параметрам индуктора модулятора, осциллографируя при этом ток в обмотке возбуждения и напряжение на измерительном витке, охватывающем сечение индуктора.  $B$  и  $H$  в этом случае определяются соотношениями (1) и (2) [3]:

$$B = \frac{\int_0^t U(t) dt}{S_3} \quad (1)$$

$$H = \frac{I(t)}{l_{cp}} \quad (2)$$

где  $U(t)$  – напряжение на измерительном витке,  $S_3$  – эффективная площадь сечения тестируемого образца,  $S_3 = S \cdot k_3$ ,  $S$  – геометрическая площадь магнитопровода,  $k_3$  – коэффициент заполнения магнитопровода металлом,  $l_{cp}$  – длина средней линии тестируемого образца,  $I(t)$  – ток в обмотке возбуждения. Анализ построенной зависимости  $B(H)$  позволит получить такие основные характеристики магнитопровода, как относительная магнитная проницаемость  $\mu$ , остаточная намагниченность  $B_r$ , максимальная индукция  $B_{max}$ , рабочий

диапазон индукции  $\Delta B$  магнитопровода и определить, насколько выбранный сердечник подходит к использованию в определенных условиях.

#### 4. Измерительный стенд

Испытания магнитопроводов проводились на стенде, на котором за последние несколько лет входной контроль прошли более 1000 магнитопроводов для линейного индукционного ускорителя. Имеющаяся на стенде система формирования прямоугольного высоковольтного импульса напряжения создавалась под рабочие параметры индукторов ускорителя ( $U \leq 25$  кВ,  $\tau \sim 500$  нс), что отличается от номинальных параметров индукторов модулятора ( $U \leq 2.3$  кВ,  $\tau \sim 5$  мкс). Тем не менее, она может быть применена в испытаниях, т.к. она позволяет получать импульсы напряжения с требуемым произведением  $U\tau$ .

Измерительный стенд состоит из следующих частей (рис. 2):

- измерительный стол;
- импульсный модулятор;
- зарядное устройство;
- стойка импульсного питания и управления.

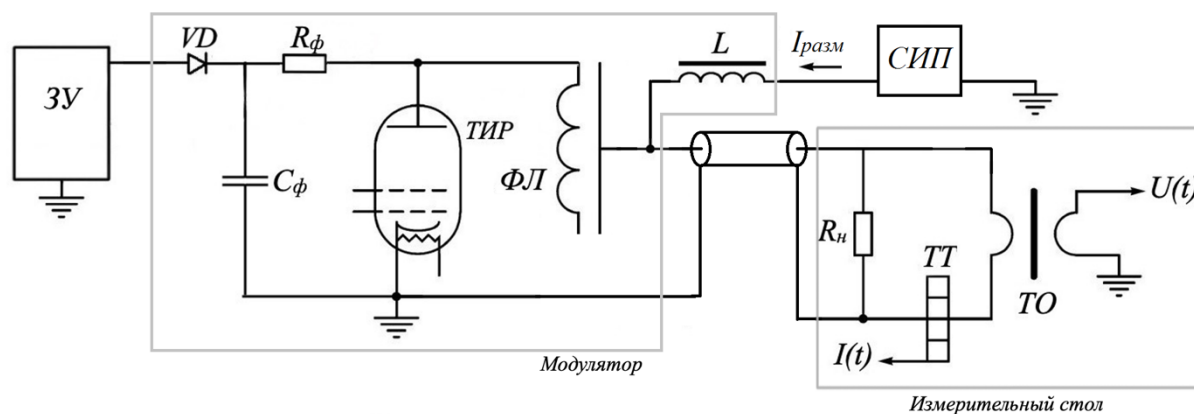


Рис. 2. Схема измерительного стенда

Принцип работы стенда следующий. Зарядное устройство ЗУ производит импульсный заряд формирующей линии ФЛ модулятора до напряжения 10...45 кВ; диод VD предотвращает разрядку формирующей линии по окончании зарядного импульса, а R<sub>ф</sub> и C<sub>ф</sub> являются элементами RC-фильтра на входе формирующей линии. Примерно через одну миллисекунду с момента окончания



заряда ФЛ на обмотку возбуждения тестируемого образца магнитопровода ТО, установленного на измерительный стол, подается импульс тока размагничивания  $I_{\text{разм}}$  в виде одного полупериода синусоиды длительностью 500 мкс. В момент максимума тока размагничивания подается синхроимпульс на управляющий электрод коммутатора ТИР и происходит разрядка формирующей линии на обмотку возбуждения. В качестве коммутирующего устройства на стенде использован псевдоискровой тиратрон ТПИ1-10к/50, позволяющий коммутировать импульсные напряжения до 50 кВ и токи до 10 кА. Дроссель L защищает источник тока размагничивания от высоковольтного импульса разряда ФЛ. Модулятор соединен с измерительным столом кабельной трассой, состоящей из 16 параллельно подключенных высоковольтных кабелей РК-50 длиной  $\sim 8$  м. Такое количество кабелей необходимо для согласования волнового сопротивления кабельной трассы с волновыми сопротивлениями модулятора и нагрузки, имеющими характерные величины  $\rho \sim 3.2$  Ом. Параллельно тестируемому образцу подключено сопротивление нагрузки  $R_n$ , необходимое для согласования одного тестируемого магнитопровода с модулятором, предназначенным для питания двух параллельно включенных индукторов. Источники тока размагничивания и тока накала тиратрона, а также формирователи импульсов синхронизации и прочая управляющая электроника расположены в стойке импульсного питания и управления (СИП). Измерения тока в обмотке возбуждения  $I(t)$  производятся при помощи трансформатора тока ТТ (Pearson 7427) с коэффициентом трансформации 100 А/В; измерения напряжения  $U(t)$  проводятся с измерительного витка высоковольтным делителем производства ИЯФ с коэффициентом деления 2136. Измерители подключены к осциллографу Teledyne LeCroy WaveJet 334-A с полосой пропускания 350 МГц, быстродействие 2 Гвыб/с.

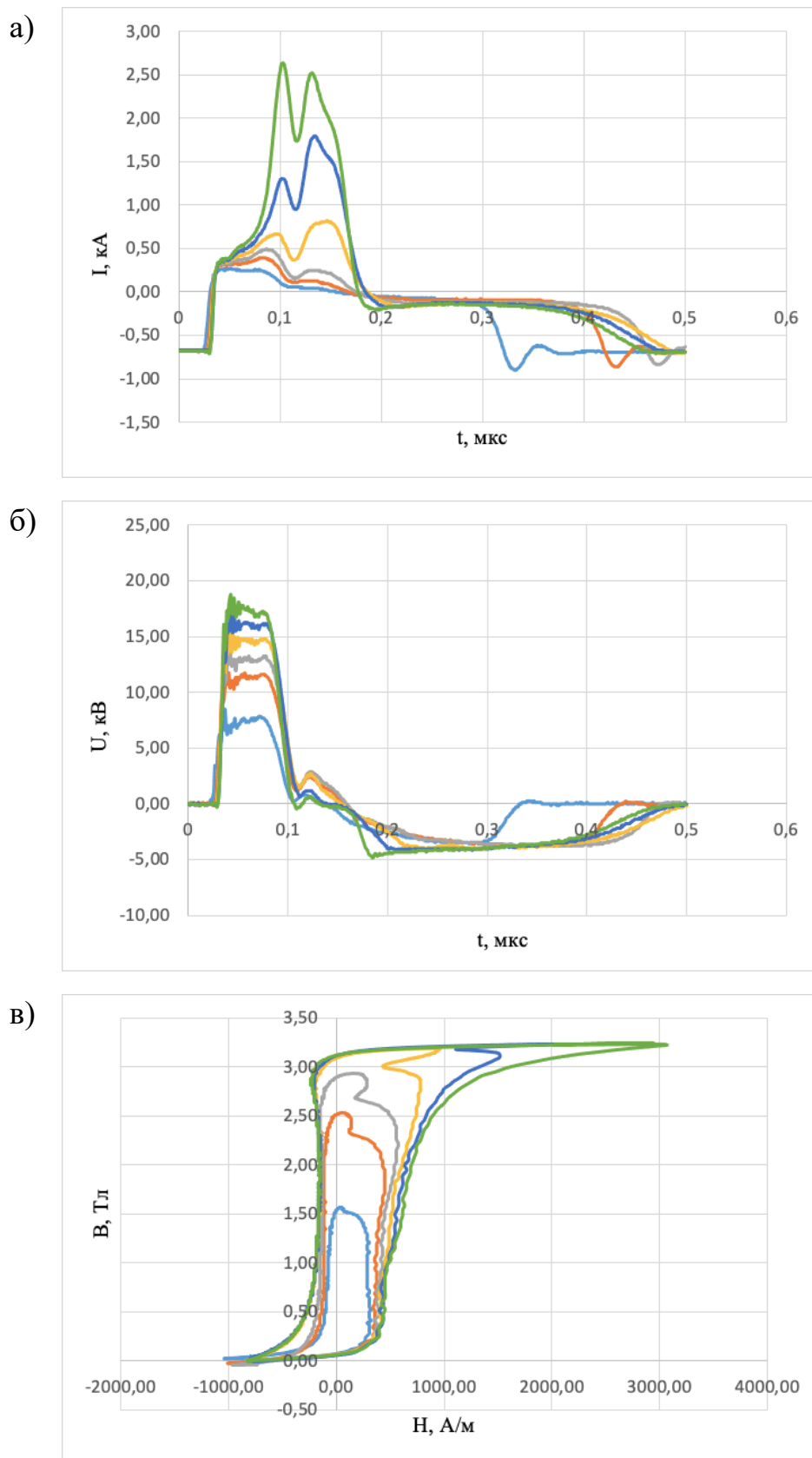
#### **5. Измерение импульсных кривых намагничивания и обработка полученных результатов**

Для прототипа индуктора разрабатываемого в ИЯФ модулятора были поставлены два магнитопровода размерами ( $D_{\text{внеш}} \times D_{\text{внутр}} \times h$ ) 355x190x50 мм из

аморфной ленты 2НСР типа Е [4], отличающейся высокой остаточной магнитной индукцией, высокой магнитной индукцией насыщения и прямоугольной петлей гистерезиса. Каждый магнитопровод состоит из 5 слоев, навитых лентой шириной 10 мм, склеенных между собой через диэлектрические прокладки. Магнитопроводы имеют одинаковые коэффициенты заполнения, равные  $k_z = 0.78$ .

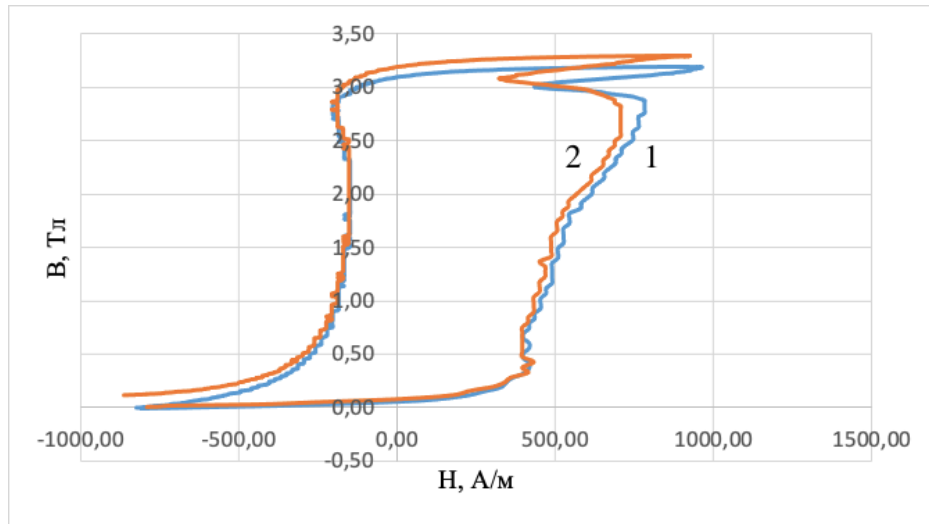
В первых двух измерениях снимались кривые намагничивания отдельно взятых магнитопроводов №1 и №2 для разных значений зарядного напряжения. Измерения показали, что насыщение каждого из магнитопроводов происходит при напряжениях  $U_{\max} \geq 15$  кВ. При насыщении индуктора ток в обмотке возбуждения резко возрастает, а напряжение на измерительном витке падает. Магнитопровод перестает участвовать в передаче энергии в нагрузку, и это выглядит на осциллограмме как укорочение импульса напряжения. Как было указано выше, в номинальном режиме работы проектируемого модулятора произведение  $U\tau$  каждого индуктора составляет 11.5 мВ·с. Это значит, что при длительности испытательного импульса 470 нс магнитопровод должен быть способен без искажений передавать импульсы амплитудой  $U_{\max} \sim 24.5$  кВ. Таким образом, одного такого сердечника недостаточно для работы одного индуктора.

На рис. 3 представлены формы импульсов тока и напряжения, снятые для магнитопровода №1 при различных значениях зарядного напряжения, а также соответствующие им кривые намагничивания. На осциллограммах тока видно, что до начала высоковольтного импульса значение тока не является нулевым. Это смещение на самом деле является током размагничивания  $I_{\text{разм}}$ , который хоть и имеет форму синусоиды, из-за ее большого периода (на 3 порядка большего, чем характерные времена рассматриваемых процессов) на установленном значении временной развертки выглядит как постоянный уровень. В правых частях осциллограмм видно, как сердечник после прохождения высоковольтного импульса возвращается в изначальное, замагниченное в обратном направлении, состояние под действием  $I_{\text{разм}}$ .



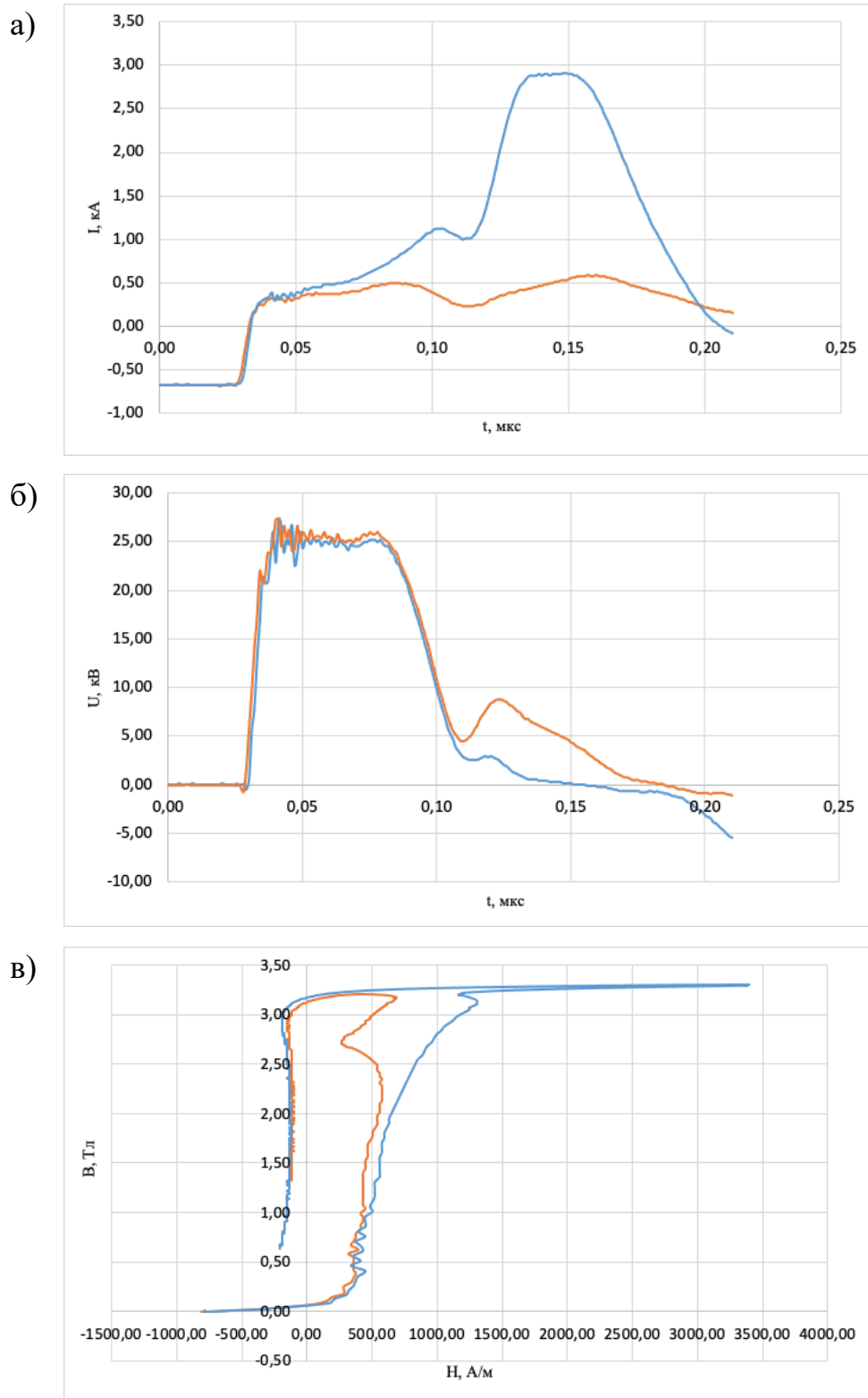
**Рис. 3.** Напряжение на измерительном витке (а), ток в обмотке возбуждения (б) и импульсная кривая намагничивания (в) при различных значениях зарядного напряжения: голубая кривая -  $U_{з\upsilon} = 30$  В; оранжевая - 40 В; серая - 45 В; желтая - 50 В; синяя - 54 В; зеленая - 58 В

На рис. 4 представлены для сравнения импульсные кривые намагничивания для магнитопроводов №1 и №2 при  $U_{3y} = 50$  В. Из рисунка видно, что данные магнитопроводы имеют весьма близкие магнитные параметры. Их значения указаны в приложении 1.



**Рис. 4.** Сравнение импульсных кривых намагничивания магнитопроводов 1 и 2

В следующем эксперименте снимались кривые намагничивания для двух магнитопроводов, сложенных вместе. Здесь были получены результаты, указывающие на то, что при  $U_{max} \sim 25$  кВ сердечник с размерами 355x190x100 мм далек от насыщения и можно несколько уменьшить его сечение. Для этого магнитопровод №1 был разобран по изоляции между 2 и 3 слоями. В четвертом эксперименте испытывался сердечник, состоящий из магнитопровода №2 и трех слоев от магнитопровода №1 с размерами 355x190x80 мм. Результаты экспериментов 3 и 4 приведены на рис. 5.



**Рис. 5.** Напряжение на измерительном витке (а), ток в обмотке возбуждения (б) импульсная кривая намагничивания (в) при зарядном напряжении  $U_{3y} = 78$  В: оранжевая – 3, синяя – 4.

Из рис. 5 видно, что сердечники, испытанные в экспериментах 3 и 4 (высотой

100 и 80 мм соответственно), способны передавать импульс напряжения длительностью 470 нс и амплитудой ~25 кВ. Несмотря на то, что сердечник высотой 80 мм в данном режиме находится на грани насыщения, имеет смысл использовать его в прототипе индуктора модулятора.

Таблицы с результатами измерений параметров магнитопровода расположены в приложении (Таблицы 2-5).

## **6. Выводы**

В ходе выполнения работы был изучен принцип работы магнитопровода в импульсном трансформаторе. Изучен принцип работы стенда для импульсных измерений магнитных параметров магнитопроводов. Проведены измерения двух магнитопроводов из аморфного сплава 2НСР и двух вариантов их комбинации. Экспериментально определены размеры магнитопроводов для установки в индукторы прототипа импульсного модулятора с индуктивным суммированием напряжений. Получены импульсные кривые намагничивания сердечников и определены их магнитные параметры.

## **7. Список литературы**

1. Мешков А. Н., Мизонова В. Г., Шишко В. И., Хорьков С. В., Яшина Н. Ф. – Гистерезис ферромагнитных материалов. – Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева: Н. Новгород, 2012 г. 13 с.
2. Майорец А. И., Пшеничный Г.И. и др. - Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование). Трансформаторы, выпуск 24. - М.: Энергия, 1973 г. 272 с.
3. Акимов А. В., П. В. Логачев, А. А. Корепанов. и др. – Магнитопроводы из аморфной ленты для индукционного ускорителя. Приборы и техника эксперимента, выпуск 2. - Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН: 2012 г. 165 с.
4. Федоров С. В. - ТУ 14-123-149-2009. Лента быстрозакаленная из магнитомягких аморфных сплавов и магнитомягкого композиционного (нанокристаллического) материала. Технические условия ОАО "АМЗ". - Аша, 2009 г. 17 с.

## 8. Приложения

Результаты экспериментов:

U <sub>зу</sub> , В	30	40	45	50	54	58
H <sub>max</sub> , А/М	323	451	579	962	2090	3070
B <sub>max</sub> , Тл	0,78	1,27	1,465	1,595	1,62	1,625
B <sub>r</sub> , Тл	0,77	1,26	1,45	1,55	1,56	1,565
U <sub>max</sub> , кВ	7,471	11,423	12,768	14,22	15,694	17,168
μ	-	-	3930,92	2298,95	-	3549,96

**Таблица 2.** Параметры магнитопровода №1

U <sub>зу</sub> , В	30	40	45	50	54	58
H <sub>max</sub> , А/М	305	415	561	926	2090	2820
B <sub>max</sub> , Тл	0,82	1,285	1,55	1,65	1,66	1,67
B <sub>r</sub> , Тл	0,81	1,28	1,53	1,6	1,605	1,615
U <sub>max</sub> , В	7,869	11,073	13,358	14,683	15,879	17,225
μ	-	-	4324,31	-	2751,34	4523,74

**Таблица 3.** Параметры магнитопровода №2

U <sub>зу</sub> , В	40	50	58	64	70	74	78
H <sub>max</sub> , А/М	286,33	341,26	359,96	414,89	468,65	523,58	688,37
B <sub>max</sub> , Тл	0,63	0,905	1,125	1,28	1,425	1,53	1,605
B <sub>r</sub> , Тл	0,6	0,905	1,105	1,26	1,41	1,505	1,56
U <sub>max</sub> , В	11,284	15,022	17,821	20,084	22,156	23,865	24,721
μ	-	-	-	-	2124,14	3955,62	-

**Таблица 4.** Параметры магнитопроводов №1 и №2, сложенных вместе

U <sub>зу</sub> , В	40	50	58	64	70	74	78
H <sub>max</sub> , А/М	322,56	377,49	486,65	560,98	1414,13	2582,83	3400,92
B <sub>max</sub> , Тл	0,81	1,155	1,385	1,55	1,635	1,655	1,65
B <sub>r</sub> , Тл	0,79	1,14	21,37	1,52	1,58	1,59	1,585
U <sub>max</sub> , В	11,328	15,066	17,736	20,150	21,944	23,266	24,508
μ	-	-	-	4025,48	-	3068,79	2355,45

**Таблица 5.** Параметры сердечника, состоящего из магнитопровода №2 и трех слоев от магнитопровода №1