

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ НАСЫЩЕНИЯ СЕРДЕЧНИКОВ ИЗ АМОРФНОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА 2НСР

Д. С. Фарафонов, Б. П. Мироньчев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Аморфные ферромагнитные сплавы в настоящее время широко используются в импульсной технике. Важнейшим свойством этих сплавов является высокое значение магнитной индукции насыщения, благодаря чему стало возможно развитие ускорителей – индукционных сумматоров напряжения [1]. Магнитные коммутаторы, использующие нелинейные свойства ферромагнитных материалов, также получили распространение главным образом благодаря появлению аморфных сплавов.

Целью данной работы является измерение индукции насыщения сердечников, изготовленных из аморфного сплава, при малой длительности импульса напряжения. Последнее особенно важно, потому что свойства этих материалов в области малых и больших времен значительно различаются. Подобным измерениям посвящено достаточно много работ [2, 3]. Методика измерения индукции насыщения, описанная в этих работах, такова: образец аморфного сплава играет роль сердечника нелинейной индуктивности, которая подвергается воздействию импульса напряжения малой длительности. Основной характеристикой сердечника является кривая намагничивания, по которой можно судить о размахе индукции и величине потерь в нем. Импульс напряжения может генерироваться внешним источником, например формирующей линией, либо же он формируется в результате переходного процесса в колебательном контуре, частью которого является нелинейная индуктивность.

В работе проводились измерения индукции насыщения образцов – сердечников из аморфной ленты, изготовленной из сплава 2НСР. Размер этих образцов достаточно небольшой (внешний диаметр 22 мм, внутренний – 15 мм, ширина – 5,2 мм), вследствие чего, с одной стороны, требуется сравнительно невысокое напряжение, а с другой приводит к некоторым неудобствам измерений.

Описание экспериментальной установки

Пусть нелинейная индуктивность подключена к источнику напряжения, причем последнее изменяется по закону $U(t)$. Тогда магнитная индукция в сердечнике определяется из соотношения, известного как «вольт-секундный интеграл»:

$$B(t) = \frac{1}{S} \int_0^t U(\tau) d\tau + B_0, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения сердечника; $B(t)$ – магнитная индукция; B_0 – магнитная индукция до приложения напряжения. Если на индуктивность подается прямоугольный импульс напряжения с длительностью T , то из выражения (1) можно получить напряжение, требуемое для достижения заданной магнитной индукции. Из ряда работ и по данным производителей известно, что индукция насыщения для сплава 2НСР составляет порядка 1,6 Тл. Важно отметить, что сердечники не полностью состоят из ферромагнитного материала. Из-за того, что этот материал обладает достаточно высокой проводимостью, для уменьшения потерь сердечники выполнены из тонкой ленты с изоляцией между слоями.

Для эксперимента была выбрана схема, основанная на колебательном разряде конденсатора через нелинейную индуктивность (рис. 1).

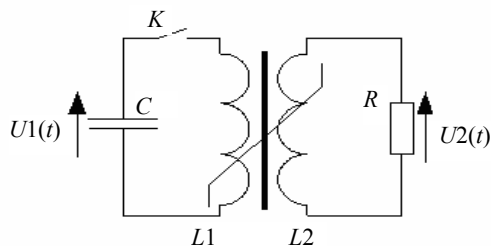


Рис. 1. Эквивалентная схема стенда

Конденсатор, разряжаясь, формирует на обмотке $L1$ трансформатора импульс напряжения $U1(t)$, вторичная (измерительная) обмотка $L2$ нагружена на сопротивление R . Если сопротивление достаточно велико, то режим работы трансформатора близок к режиму холостого хода, и значит $U2(t) \approx U1(t)$. Тогда, после измерения $U2(t)$, мы можем найти значение магнитной индукции, произведя интегрирование согласно (1).

Выбранная схема выгодно отличается от генератора на длинных линиях своей компактностью, но импульс напряжения в такой схеме уже не будет прямоугольным. Но, как установлено в эксперименте, при достаточно больших значениях емкости конденсатора и зарядного напряжения форма импульса приближается к прямоугольной. В этом случае импульс формируется не только за счет разрядки конденсатора, но и за счет процесса насыщения в нелинейной индуктивности.

При разработке экспериментального стенда необходима минимизация паразитной индуктивности колебательного контура, иначе значительная часть энергии конденсатора переходит в энергию магнитного поля в паразитных индуктивностях, что особенно проявляется в связи с малыми размерами сердечника, и для достижения его насыщения необходимо повышение напряжения. Радиально-симметричная компоновка стенда (рис. 2) позволила в значительной степени снизить паразитную индуктивность колебательного контура.

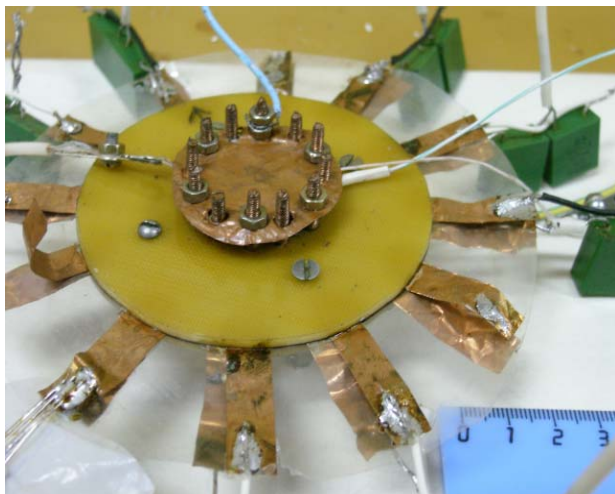


Рис. 2. Общий вид стенда

Конструкция стенда схематически показана на рис. 3. Основу составляют две круглые пластины 1 и 2, изготовленные из фольгированного текстолита, проводящие слои которых разделены слоем изоляции 3. Сердечник 4 размещен внутри полости, образованной внутренним проводником 6 и крышкой 5, изготовленной из медной фольги и соединенной посредством проводящих винтов с пластиной 2. Проводник, в свою очередь соединен с пластиной 1, а с другой

стороны он заострен, образуя таким образом с крышкой 5 искровой промежуток. К проводникам пластин 1 и 2 присоединены конденсаторы 7, объединенные в 8 конденсаторных сборок. После зарядки конденсаторов разряд в искровом промежутке инициируется нажатием на гибкую крышку 5, для безопасности крышка заземлена. Имеется также вторичная (измерительная) обмотка сердечника с единственным витком, а также обмотка для размагничивания (на рис. 3 не показаны).

На рис. 4 изображена эквивалентная электрическая схема стенда.

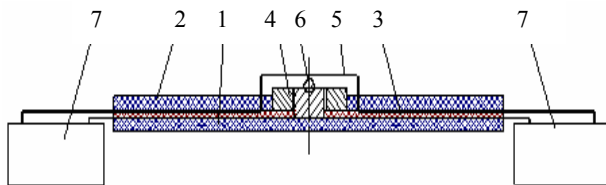


Рис. 3. Конструкция стенда

Емкость конденсаторной сборки составляет 25 нФ, каждая из них состоит из двух конденсаторов К71-7, соединенных последовательно; то есть общая емкость $C = 200$ нФ. В одну из сборок встроен шунт с сопротивлением $R_{ш} = 0,325$ Ом для измерения тока, протекающего через обмотку сердечника. С одной стороны, наличие такого шунта вносит некоторую асимметрию в протекание токов, но математическое моделирование показало, что погрешность, вносимая шунтом, незначительна. Паразитные параметры контура – сопротивление проводников R_n и индуктивность L_n определяются экспериментальным способом: получением переходного процесса в колебательном контуре при отсутствии сердечника. Значения сопротивлений делителя (R_1 и R_2) равны соответственно 57,6 Ом и 5,65 кОм. Низковольтное плечо делителя посредством кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом подключено к осциллографу.

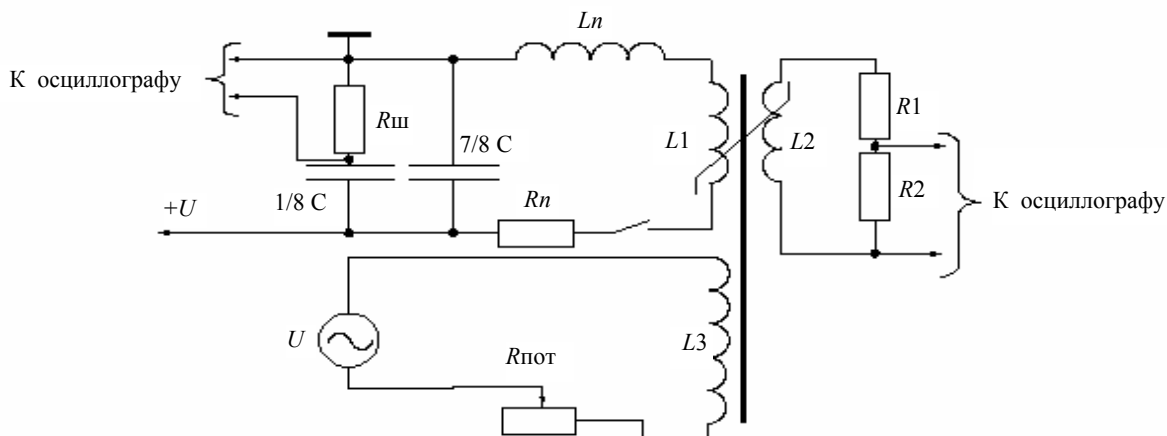


Рис. 4. Эквивалентная схема стенда: $R_{ш} = 0,325$ Ом – сопротивление шунта для измерения тока в обмотке сердечника; $C = 200$ нФ – суммарная емкость конденсаторов; L_n, R_n – паразитные индуктивность и сопротивление проводников; L_1 – индуктивность обмотки сердечника; L_2 – индуктивность вторичной обмотки; R_1, R_2 – делитель напряжения вторичной обмотки; $R_{пот}$ – потенциометр; L_3 – обмотка для размагничивания; U – источник переменного напряжения

Измерение магнитной индукции насыщения

Были произведены три серии экспериментов при различных зарядных напряжениях конденсаторов: 200 В (3 эксперимента), 400 В (10 экспериментов) и 660 В (3 эксперимента). После каждого эксперимента сердечник размагничивался.

На рис. 5 показана осциллограмма сигнала с делителя вторичной обмотки при зарядном напряжении 200 В. Длительность фронта импульса составляет около 10 нс, форма импульса близка к прямоугольной. Согласно выражению (1), площадь под кривой напряжения пропорциональна магнитной индукции, и в момент, когда напряжение становится равным нулю, индукция достигает максимума. Фрагмент кривой $B(H)$ (петли гистерезиса) для данного импульса показан на рис. 6. Видно, что индукция насыщения для данного сердечника в данном импульсе равна 1,2 Тл. С учетом того, что не весь объем сердечника занят ферромагнетиком (коэффициент заполнения равен 70–80 %), и заявленная производителем индукция насыщения равна приблизительно 1,5 Тл, полученное значение можно считать достоверным.

К сожалению, в экспериментах удалось получить только фрагмент петли гистерезиса, характер колебаний, происходящих после основного импульса, не позволяет получить недостающий участок петли.

Более точно значение индукции насыщения определялись при зарядном напряжении 400 В. Было произведено 10 экспериментов, в которых было получено значение индукции насыщения, равное $B = 1,24 \pm 0,01$ Тл. Далее, так как зарядное напряжение конденсаторов выше, то для насыщения требуется меньшее время, и выходной импульс становится более коротким. На рис. 7 приведены осциллограммы импульсов напряжений, полученных при зарядных напряжениях 400 и 660 В.

Из приведенных осциллограмм видно, что длительность импульса убывает при увеличении зарядного напряжения, и значение индукции насыщения не уменьшается с уменьшением длительности импульса по крайней мере до пределов, полученных в эксперименте. Длительность фронта импульса не превышает 5 нс, что, по-видимому, частично обусловлено реактивностью измерительной цепи.

Если продифференцировать выражение (1), то видно, что скорость нарастания индукции пропорциональна приложенному напряжению. На рис. 8 приведены кривые намагничивания сердечника для различных зарядных напряжений. Из графиков видно, что ширина петли гистерезиса, а значит, и потери в сердечнике, увеличиваются с увеличением скорости нарастания индукции. Однако определение зависи-

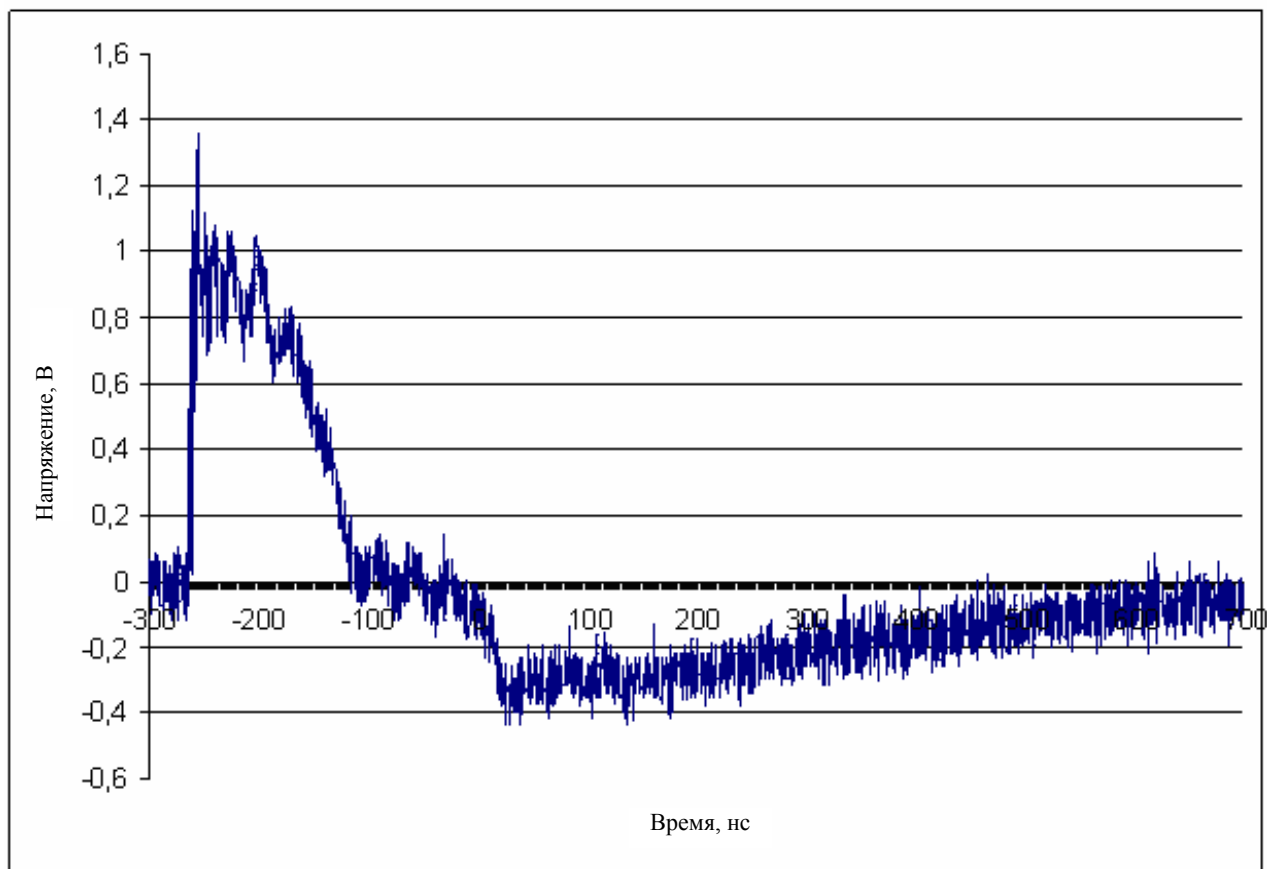


Рис. 5. Выходной импульс (зарядное напряжение – 200 В)

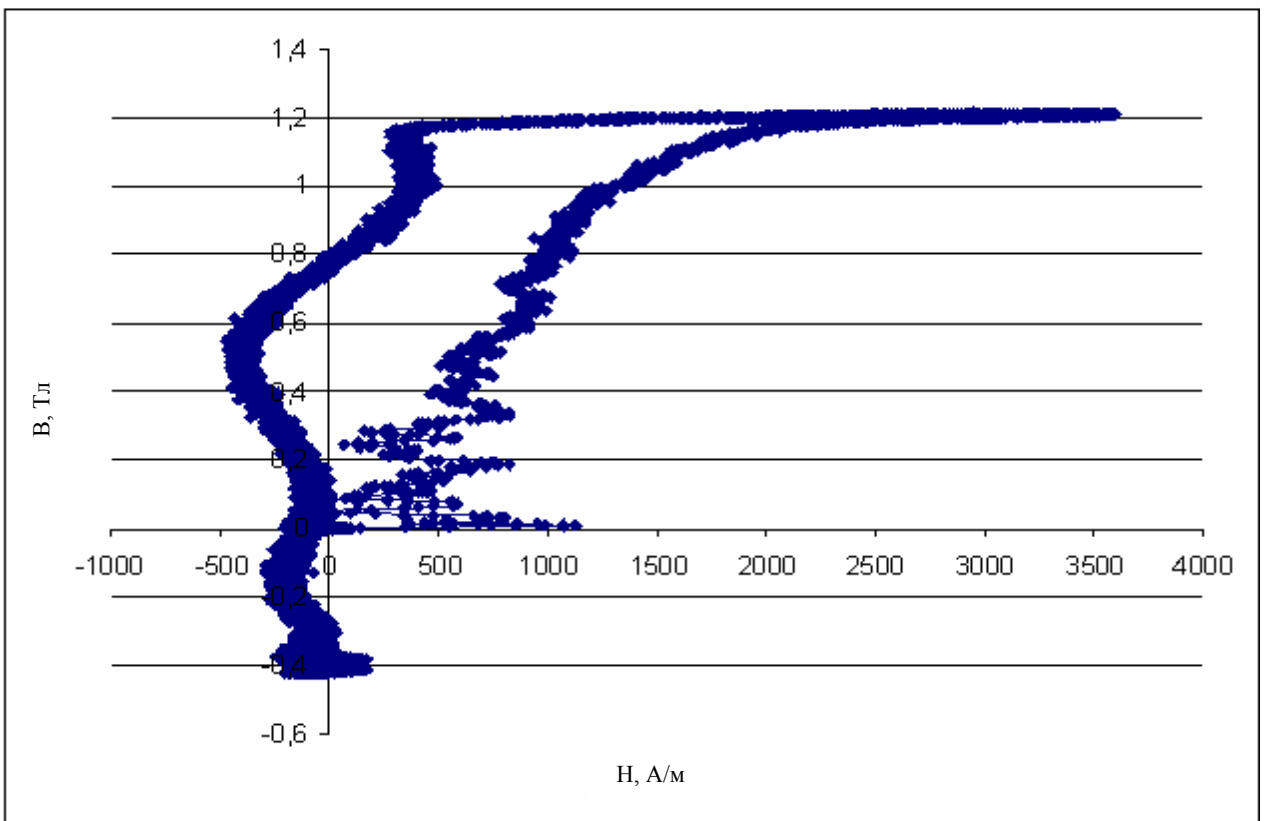


Рис. 6. Петля гистерезиса при зарядном напряжении конденсаторов 200 В

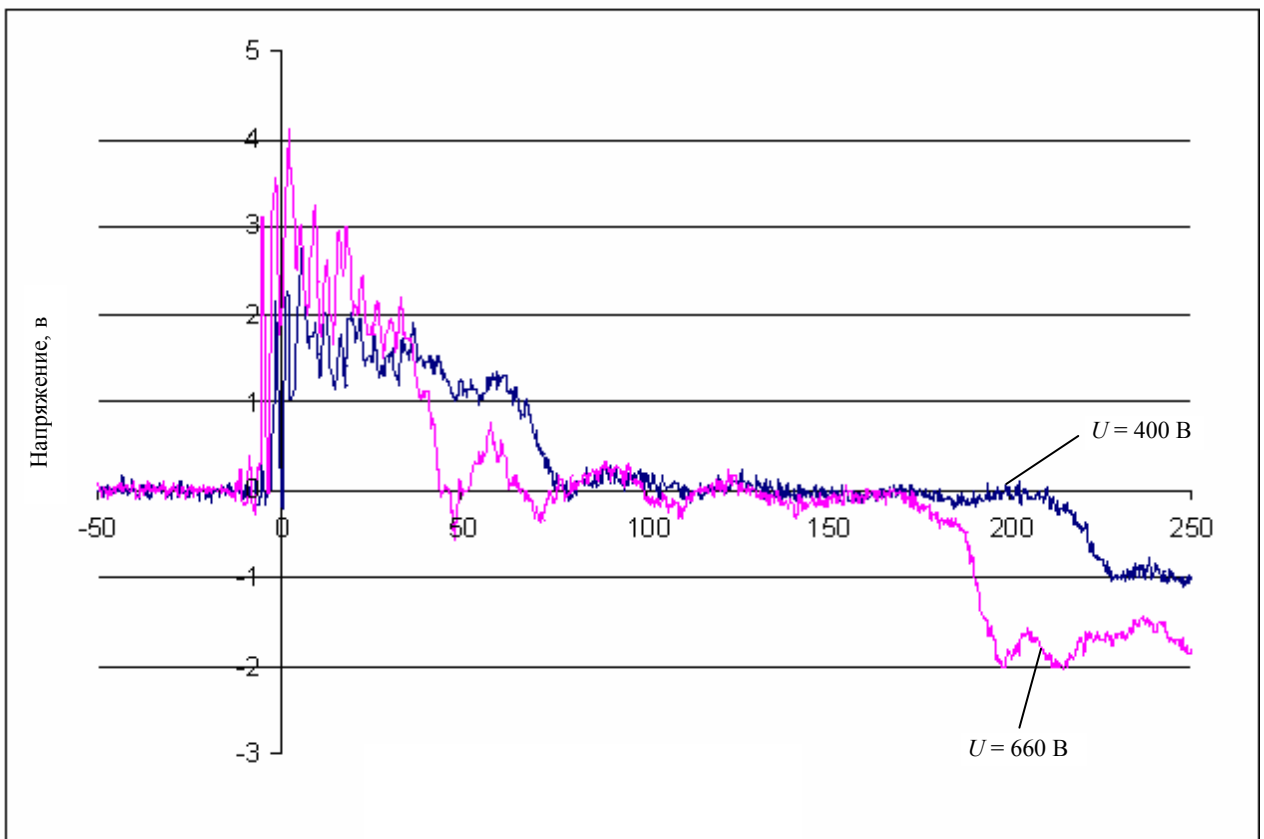


Рис. 7. Осциллограммы импульсов напряжения с делителя вторичной обмотки при зарядных напряжениях конденсаторов 400 В и 660 В

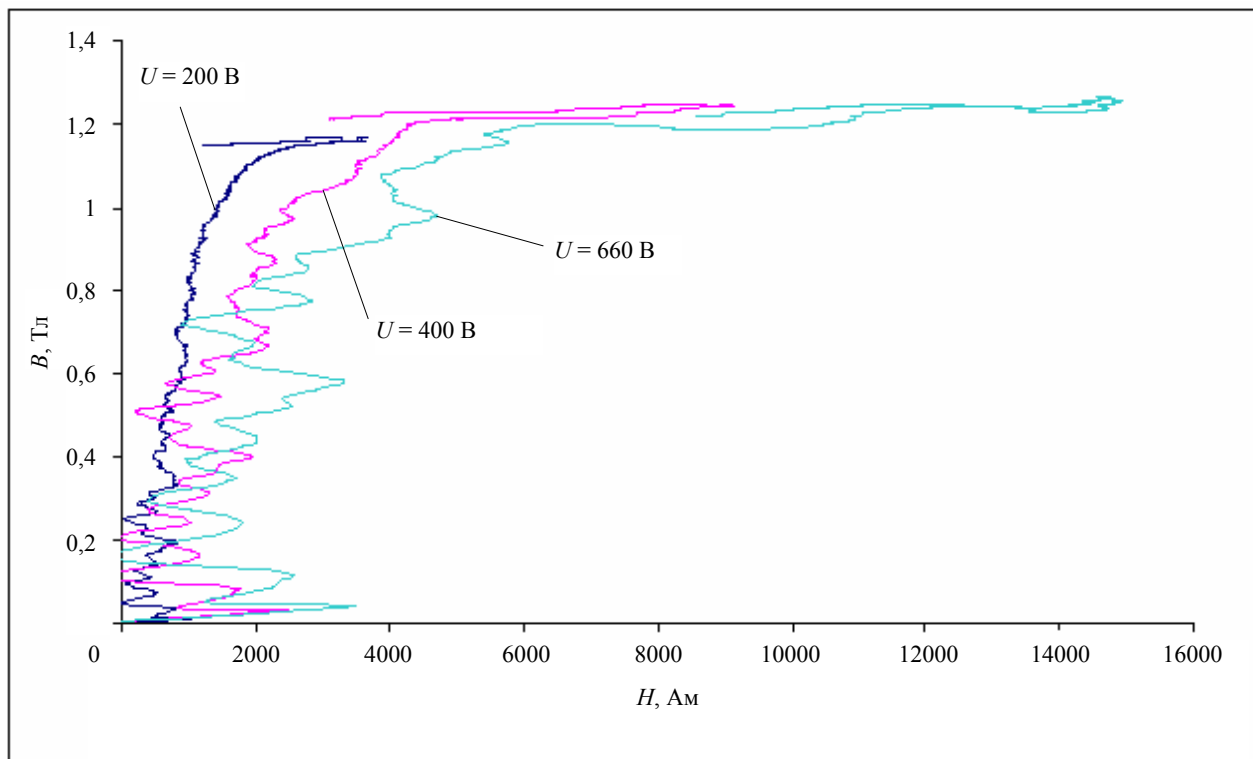


Рис. 8. Кривые намагничивания сердечника в зависимости от зарядного напряжения

мости величины потерь от скорости нарастания магнитной индукции не было целью данной работы.

Заключение

В работе подтверждено, что сердечники из аморфного ферромагнитного сплава обладают заявленными свойствами при временах порядка 10 нс. Это подтверждается малой длительностью фронта импульса (~ 5 нс) и результатами измерений магнитной индукции насыщения. Для исследуемого образца получено значение магнитной индукции насыщения $B = 1,24 \pm 0,01$ Тл, что с учетом коэффициента заполнения, равного 70–80 %, соответствует заявленному значению для сплава 2НСР.

Литература

1. Smith I. D. Induction voltage adders and the induction accelerator family / PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS – ACCELERATORS AND BEAMS, VOLUME 7, 064801, 2004.
2. Burdt R., Curry R. D. Magnetic core test stand for energy loss and permeability measurements at a high constant magnetization rate and test results for nanocrystalline and ferrite materials / REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 79, 094703, 2008.
3. Huddle C. W., Johnson D. L., Denison G. J., Franklin T. L. Testing of the Inductive Cores for HERMES III / 6th IEEE International Pulsed Power Conference. Arlington, Virginia, 1987.