

УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРОВОДНИКОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

О.Б. Скворцов, В.И. Сташенко, О.А. Троицкий

Впервые экспериментально измерены и изучены механические вибрации, созданные импульсами электрического тока. Разработана методика измерения многомерных вибраций. Величина механического действия тока с высокой достоверностью может быть определена с помощью многокомпонентных пьезоэлектрических преобразователей – акселерометров. Механическое действие импульсного тока длительностью порядка 200 мкс может быть использовано для неразрушающего контроля деформаций в электротехнических конструкциях. Установлено, что вибрационный отклик от силового электродинамического действия магнитного поля импульса тока существенно зависит от фронтов импульсов тока. Экспериментальные результаты должны быть учтены в теоретических расчетах пинч-эффекта в электропроводящих материалах и при эксплуатации электропроводящих элементов оборудования, например, таких как мощные моторы, электрогенераторы, трансформаторы и элементы оборудования для электросварки.

Ключевые слова: импульсы тока, магнитное поле, упругие колебания, векторные акселерометры, скин-эффект, пинч-эффект, датчики Холла.

ELASTIC DEFORMATION OF SEMICONDUCTORS AT CURRENT PULSES

O. Skvortsov, V. Stashenko, O. Troitskiy

Mechanical vibrations created by current pulses were at the first time measured and studied. A method for measuring multidimensional vibrations was developed. Mechanical action value of a current might be determine by means of multi-component piezoelectric convertors – accelerometers – with a high confidence. Mechanical action of pulse current of 200 ms can be used for nondestructive deformation control in electro-technical structures. It was found that vibration response of power electro-dynamic action of current pulse magnetic field significantly depends on current pulse edges. Experimental results should be taken into account in theoretical calculations of pinch-effect in conducting materials and at exploitation of conducting elements of equipment, for instance high power engines, power generators, transformers and welding equipment elements.

Keywords: current pulse, magnetic field, elastic vibrations, skin-effect, pinch-effect, vector accelerometer, Hall generator.

Введение

Силовое электродинамическое действие магнитного поля тока на проводник приводит к упругим напряжениям в нем. Механические напряжения в образце определяются объемными силами, с которыми электромагнитное поле действует на металл, приводя к скин- и пинч-эффектам. Эти эффекты изучены теоретически в рамках взаимодействия магнитного поля, создаваемого током через проводник, с этим проводником с током. При этом пред-

полагается, что глубина скин-слоя соизмерима с радиусом проводника, и скин-действием тока пренебрегают [1, 2]. Таким образом, влияние изменений тока на фронтах импульсов электрического тока в силовом электродинамическом действии магнитного поля импульса тока не учитывается.

Целью работы является измерение и изучение зависимости вибраций, созданных импульсами полного тока на недеформируемых сплошных цилиндрических, а также на дефор-

мируемых плоских образцах, от параметров импульса электрического тока для различных электропроводящих материалов.

Механизм возникновения скин-эффекта

Скин-эффект проявляется в виде неоднородного распределения плотности тока в поперечном сечении проводника. Он объясняется возникновением вихревого электрического поля электромагнитной индукции E (самоиндукции) (рис. 1), которое компенсирует приложенное внешнее электрическое поле на оси проводника. Это поле усиливает ток у поверхности (ускоряя электроны проводимости) и ослабляет его на оси проводника. Ток сначала появляется на поверхности проводника, а затем постепенно нарастает в более глубоких слоях и в последнюю очередь на оси проводника. Процесс заканчивается, когда ток равномерно распределится по всему сечению проводника [3–5].

На переднем фронте импульса тока t_{Φ} (см. рис. 1, а) ток I возрастает. Вместе с ним возрастает и создаваемое им магнитное поле с индукцией B (см. рис. 1, б).

Появляющееся вихревое электрическое поле E у поверхности проводника направлено так же, как и ток I , а на оси проводника – противоположно току [6]. Если же ток I уменьшается на заднем фронте $t_{3\Phi}$ (см. рис. 1, а), то ослабевающее вместе с ним магнитное поле B вызовет электрическое поле E , которое будет направлено противоположно по сравнению с первым рассмотренным случаем (см. рис. 1, в), то есть у поверхности проводника будет противоположно току (замедляя электроны проводимости), а на оси – совпадать с током (увеличивая скорость электронов проводимости, проявляясь как обратный скин-эффект [7]).

Скин-эффект не ограничивается только вытеснением тока на поверхность проводника. Он проявляется также в ослабление магнитного поля по мере его проникновения вглубь проводника из-за того, что это возбуждающее поле создает во внутренних слоях вихревое электрическое поле, которое, в свою очередь, порождает там вихревые токи. Магнитное поле этих вихревых токов внутри проводника будет направлено навстречу исходному возбуждающему магнитному полю и будет его ослаблять.

Таким образом, благодаря поверхностному эффекту плотность вихревых токов и напряженность магнитного поля по мере углубления в проводник будут падать, а большая центральная часть токопроводящего слоя не участвует в переносе электрических зарядов. Это проявляется в повышении сопротивления проводника на более высоких частотах.

При наличии скин-эффекта ток существует практически только в поверхностном слое. Толщина скин-слоя определяется как глубина, на которой плотность тока уменьшается в e раз или приблизительно на 36,9 % от величины тока на поверхности проводника.

Как только рост тока замедляется, происходит дальнейшее проникновение магнитного поля импульса тока в образец. Начинается квазистатическое действие тока на материал проводника в виде сил сжатия – пинч-эффект.

Согласно теоретическим представлениям, пинч-эффект обусловлен возникновением в проводнике магнитного поля, которое действует с силой Лоренца на вызвавший это поле ток дрейфующего электронного газа. Независимо от направления тока такая сила самодействия всегда направлена к центру проводника перпендикулярно направлению тока. В результате электронный газ сжимается к центру про-

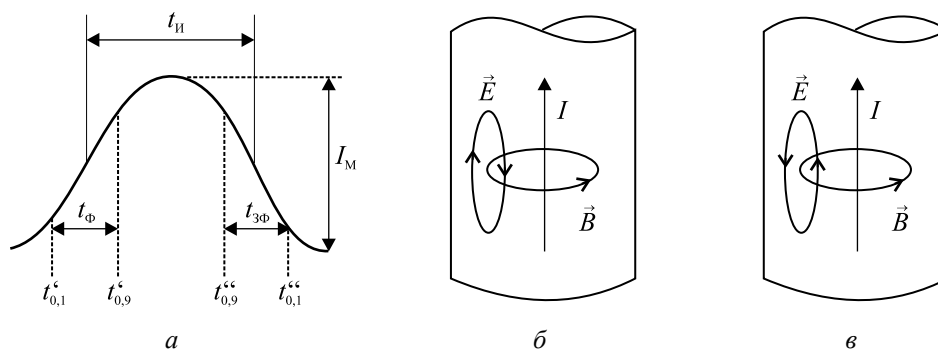


Рис. 1. Скин-эффект в проводнике при действии импульса тока:

а) импульс тока; б) при действии переднего фронта импульса тока (ток нарастает); в) при действии заднего фронта (ток убывает): $t_{и}$ – длительность импульса тока, I_M – амплитуда импульса тока

водника, образуя объемный отрицательный электрический заряд. У поверхности проводника концентрация электронов понижается, формируя положительный заряд, приводящий к появлению поля Холла. Поперечное к току поле Холла силой Кулона действует на ионную решетку, вызывая ее упругое сжатие с образованием механических напряжений.

Таким образом, действие импульса тока на проводник состоит из двух динамических эффектов: на фронтах импульса при самоиндукции и квазистатического действия импульса тока его вершины $t_{\text{и}}$, приводя к упругим напряжениям проводника.

Импульсный характер изменения во времени уровня напряжений подобен воздействию слабого ультразвука на деформацию металла [1, 2]. Рассеяние электронов при их дрейфовом движении происходит не только на ионах решетки и дислокациях, но и на других дефектах, в том числе на внутренних и внешних поверхностях

раздела, вследствие чего появляются силы, распределение которых приводит к образованию экспоненциально спадающих механических напряжений при удалении от поверхности [8, 9].

Динамические эффекты действия импульсов тока на поверхностные слои металла могут оказаться важными дополнительными механизмами электропластической деформации металлов [10].

Методика эксперимента

В работе исследовалось действие одиночных импульсов тока амплитудой I_M порядка 1000 А и длительностью $t_{\text{и}}$ менее 1 мс на металлические образцы. Запись вибрации и магнитного поля тока производилась многокомпонентными датчиками в полосе частот до 50 кГц, с последующим анализом дифференциации механического действия импульсного тока при исключении влияния наводок и помех на измерительные цепи. Экспериментальный стенд представлен

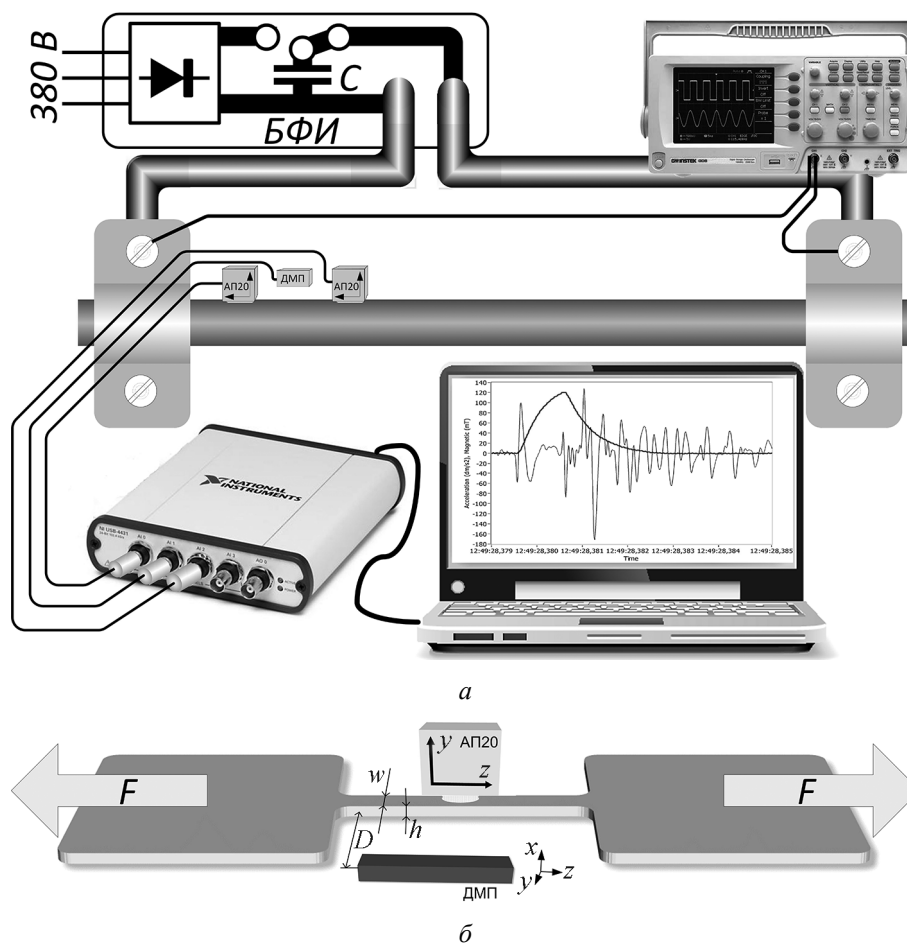


Рис. 2. Измерение зависимости вибраций, созданных импульсами полного тока на недеформируемых сплошных цилиндрических (а) и деформируемых плоских образцах (б), от параметров импульса тока: 1 – цилиндрический образец; 2 – акселерометры АП20; БФИ – блок формирования импульсов; F – статическая сила нагружения; h , w – толщина и ширина образца, D – расстояние от датчика магнитного поля до образца

на рис. 2. В качестве датчиков магнитного поля использовался объединенный модуль из датчиков Холла *DRV5053*, позволяющий производить измерения по трем ортогональным направлениям. В качестве датчиков вибрации использовались малогабаритные высокочастотные трехкомпонентные пьезоэлектрические акселерометры АП20, закрепленные на образце с помощью клея через изолирующую прокладку. Указанные датчики обеспечили возможность анализа сигналов в полосе более 50 кГц. Сбор данных выполнялся с использованием модуля сбора данных *NI USB 4431* [11].

Для обеспечения удовлетворительной помехоустойчивости была использована частотная адаптивная цифровая режекторная фильтрация сигналов, обеспечивающая подавление помех, связанных с работой мощного источника токовых импульсов. Использование трехкомпонентных датчиков АП20 с высокой резонансной частотой (более 50 кГц) и линейным участком АЧХ до 18 кГц позволило провести корректный анализ вибрационного отклика на действие импульсного электрического тока, поскольку спектры значимых вибрационных сигналов при этом находились в пределах частотного диапазона от 1 до 10 кГц. При этом контролируется отсутствие более высокочастотных составляющих. При этом также обеспечивается удовлетворительное временное разрешение (менее 10 мкс) для синхронно записываемых сигналов вибрации и магнитной индукции с многокомпонентных датчиков. Синхронный ввод нескольких компонент для пространственных векторных величин вибрации и магнитной индукции показал, что кроме ожидаемых радиальных механических деформаций и кольцевой составляющей магнитного поля наблюдаются синхронизированные, значительные по величине, но отличающиеся по форме вибрации в осевом направлении и составляющие магнитного поля, направление которых совпадает с радиальным направлением в сечении проводника.

Использование бесконтактных датчиков магнитного поля позволяло контролировать токи непосредственно в образце, поскольку получаемые результаты учитывают задержки и искажения формы из-за влияния паразитных емкостей и индуктивностей соединительных проводов и контактных сопротивлений.

Одиночные импульсы тока малой длительности не оказывали заметного теплового действия.

Анализ результатов эксперимента

При воздействии импульсов тока длительностью $t_{\text{и}}$ более нескольких сотен микросекунд, фронт $t_{\text{ф}}$ и спад импульса тока $t_{\text{зф}}$ вызывают практически независимые колебательные процессы в стержне из меди марки М1 диаметром 3 мм и длиной 150 мм (см. рис. 2, а), что иллюстрируется зависимостями, представленными на рис. 3, а.

Перемещения во время колебательного процесса, возникающие после воздействия переднего фронта импульса, успевают практически затухнуть до момента прихода заднего фронта. Поскольку амплитуда и размах радиальной составляющей вибрации при таких длительностях слабо зависят от длительности импульса, можно сделать вывод о том, что вклад квазистатического пинч-эффекта в формирование этих колебаний незначителен.

Уменьшение длительности импульса тока вызывает существенное увеличение амплитуды и размаха радиальной вибрации, а затем быстрое их уменьшение. Соответствующие сигналы показаны на рис. 3, б.

Временная привязка возникновения колебаний к фронтам импульса тока и соответствующего ему импульса магнитной индукции свидетельствует о магнитно-индукционном характере механизма возбуждения подобных вибраций. Если спад импульса тока приходится на момент обратной полуволны радиальной вибрации, проявляется эффект своеобразного резонанса, сопровождающегося существенным ростом амплитуды колебания.

На рис. 4 и 5 приведены зависимости радиальной (вертикальной) составляющей вибрационных сигналов и кольцевой компоненты магнитного поля вокруг образца, пропорциональной мгновенным значениям тока через образец, для различных материалов (сталь, титан) таких существенно различаются. Толщина скин-слоя меняется в зависимости от электрических свойств материалов. От малых величин для меди марки М1 до величин, соизмеримых с поперечными размерами образца, для титана марки ВТ6. Если при длительности импульса тока около миллисекунды в образцах из меди увеличение магнитного поля и тока происходит сравнительно медленно, для образцов из стали марки ст. 70 форма импульса тока и магнитного поля близка к прямоугольной, а для образцов из титана характерно наличие выбросов на переднем и заднем фронтах импульса.

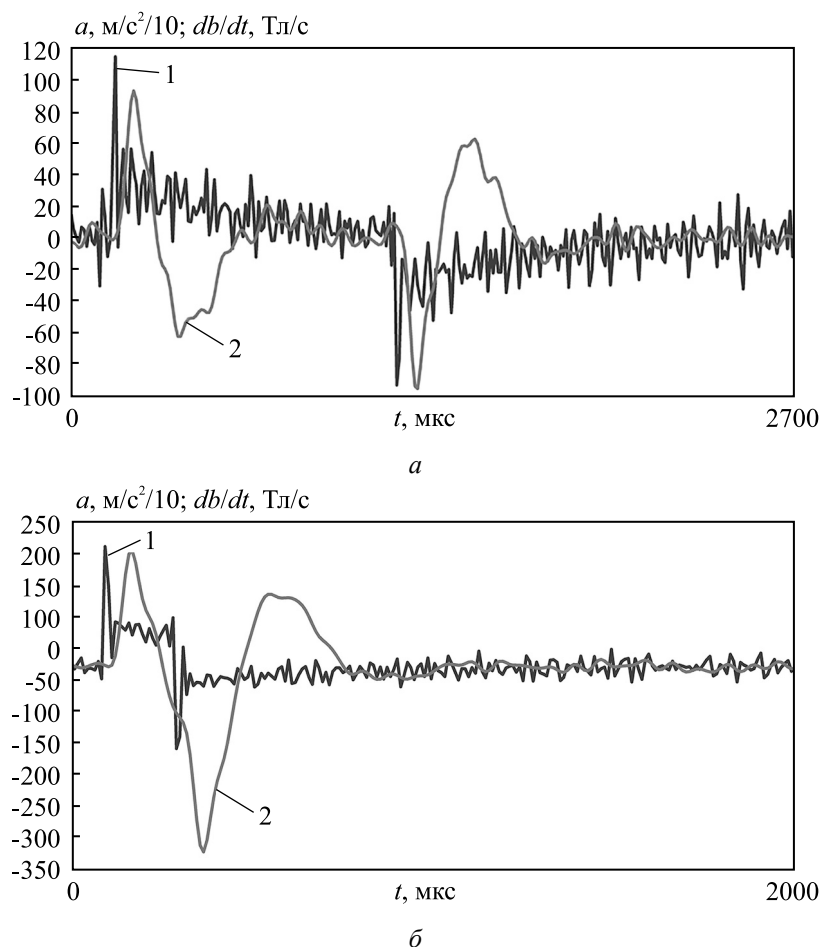


Рис. 3. Производная магнитного потока (1) и ускорение радиальной вибрации (2) при воздействии на медный образец диаметром 3 мм и длиной 150 мм:

а – $I_M = 1000$ А, $t_{\text{и}} = 1006$ мкс; *б* – $I_M = 1000$ А, $t_{\text{и}} = 185$ мкс

С другой стороны, для ферромагнетиков, например сталь (см. рис. 4, *а*), скин-эффект проявляется значительно сильнее, чем для металлов, обычно используемых в качестве проводников, таких как медь, серебро, алюминий. Выполненные на титановых образцах эксперименты показывают, что уровень вибрации незначителен. Такой низкий уровень вибрации фиксируется на относительно тонких образцах из титана, для которых скин-эффект проявляется очень слабо (см. рис. 4, *б*).

На рис. 5 представлены результаты испытаний в виде зависимостей размаха радиального ускорения от длительности импульсов $t_{\text{и}}$ при различных амплитудах тока I_M .

Зависимости механического отклика от величины плотности тока близки линейным (рис. 6).

Проведенные в настоящей работе эксперименты синхронного контроля магнитного поля и многоточечного контроля осевых и радиальных составляющих вибрации показывают также наличие коррелированности осевых и радиальных со-

ставляющих для различных измерительных точек на образце и производной величины магнитного поля, создаваемого импульсным током. Это косвенно подтверждает результаты теоретического анализа [12] таких процессов, носящих характер продольных и радиальных сил Лоренца.

Уменьшение длительности может вызывать рост амплитуды колебаний при обеспечении совпадения фаз механических колебаний от воздействия фронта и спада импульса тока. В результате возможно получение эффекта усиления колебаний, а при необходимости и их ослабления. Полученные данные могут быть использованы для оценки результатов теоретического анализа электромагнитно-акустических процессов [1, 12, 13].

Возбуждение колебания образца связано, в первую очередь, с моментами прохождения переднего и заднего фронтов импульса тока. На фронтах формируются затухающие колебания, которые складываются после окончания импульса тока.

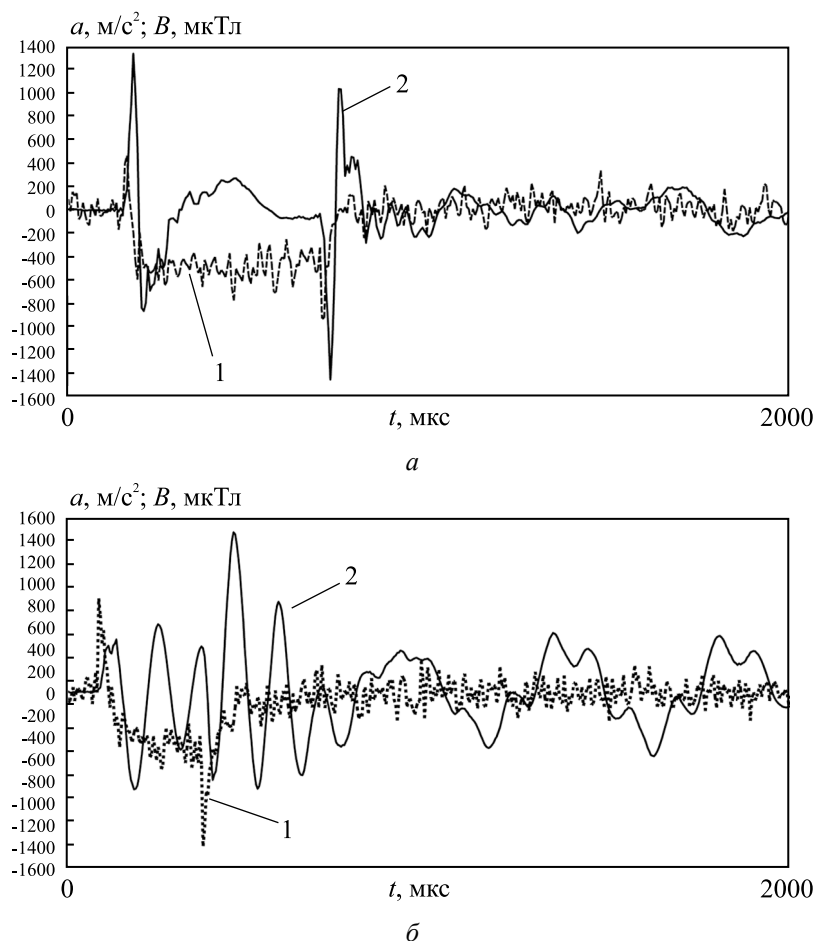


Рис. 4. Временные зависимости сигналов от датчиков магнитной индукции (1) вибрации (2) и для образца диаметром 3 мм и длиной 150 мм из стали (а) и титана (б)

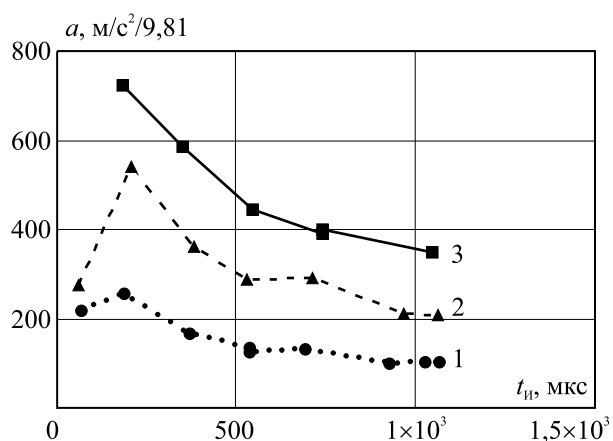


Рис. 5. Размах радиального ускорения в зависимости от длительности импульса тока при различных его амплитудах в образцах из меди диаметром 3 мм и длиной 150 мм при амплитуде импульса 500 А (1), 1000 А (2) и 1500 А (3)

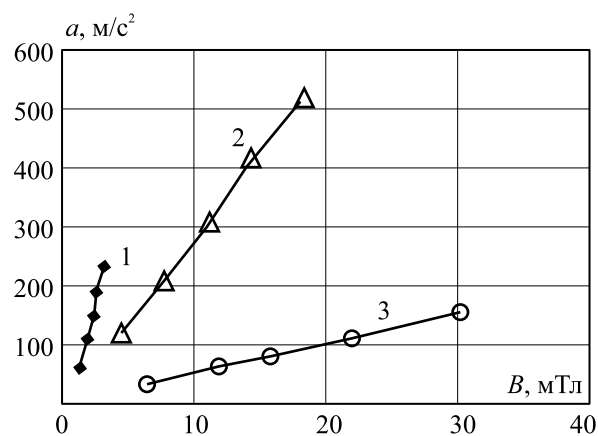


Рис. 6. Зависимость размаха ускорения от размаха магнитной индукции, создаваемой протекающим электрическим током через образцы диаметром 3 мм длиной 150 мм: 1 – сталь марки ст. 70; 2 – латунь (Л68); 3 – медь (М1)

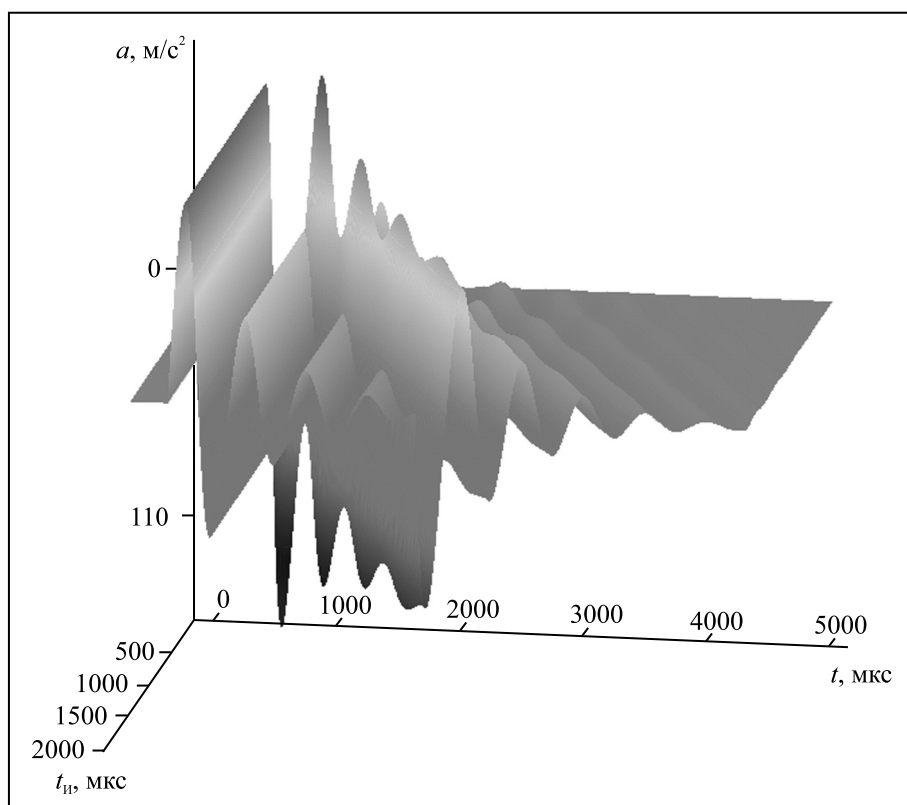


Рис. 7. Зависимости результата сложения вибрационных сигналов, формируемых под действием переднего и заднего фронтов импульса тока от длительности импульса

На рис. 7 приведены изменения результирующего сигнала ускорений a для вибрационных процессов во времени t в зависимости от длительности t_n импульса тока.

Результаты такого сложения с учетом фаз колебаний обеспечивают увеличение и снижение амплитуд колебаний в области сравнительно коротких длительностей импульса тока [14].

Результаты измерения длительностей импульсов тока

По результатам измерения длительностей импульсов тока с помощью датчиков магнитного поля следует, что вначале прихода импульса имеется его быстрый рост – бросок (рис. 8). Аналогичный бросок наблюдается и в момент начала спада импульса. Длительность такого короткого броска импульса тока от 9 до 29 мкс. После этого наблюдаются экспоненциальные изменения магнитного поля (следовательно, и тока через образец) с постепенным приближением к установившемуся значению.

В табл. 1 приведены результаты измерений длительностей фронтов и импульсов тока для разных металлов. Длительность импульса опре-

делялось как разность между моментами начала заднего фронта и начала переднего фронта импульса тока по сигналам от датчика магнитного поля $t_n \approx t_2 - t_1$ (см. рис. 8).

Действия импульсов тока на плоский деформируемый образец

Одновременное действие динамических нагрузок, вызываемых импульсными токами, и статического нагружения внешней, медленно увеличивающейся силой, выполнялось на образцах, внешний вид которых приведен на рис. 2, б. Образец может быть дополнительно нагружен статической силой F .

Проводники, через которые пропускались импульсы тока, испытывались на разрыв с записью зависимости величины растягивающей силы от времени. Образцы деформировались до разрушения, как при пропускании импульсов тока, так и без их воздействия. Действие импульсного тока за счет силового электродинамического действия магнитного поля тока проявляется, в первую очередь, в направлении, перпендикулярном плоскости образца (y). Однако на переходных режимах из-за перерас-

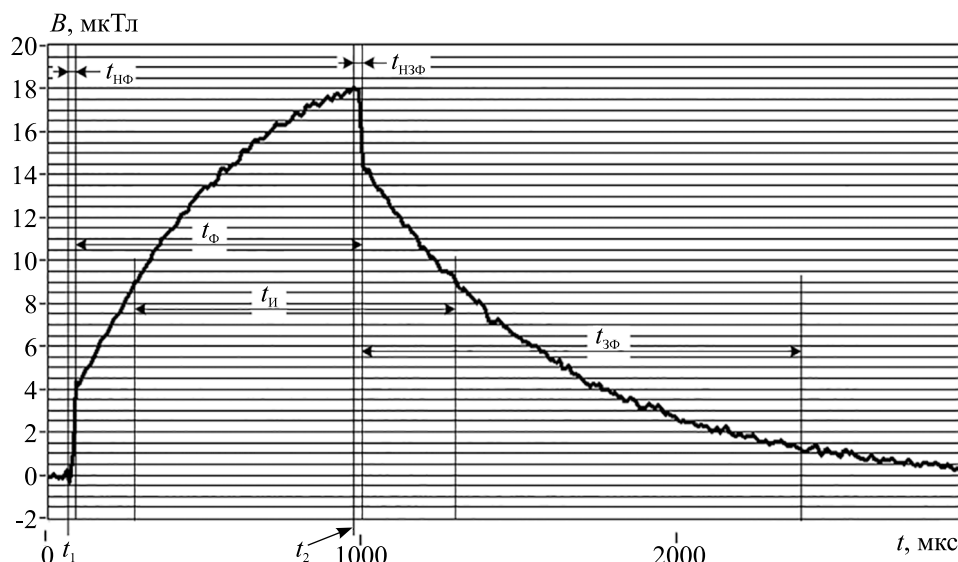


Рис. 8. Импульс индукции магнитного поля тока длительностью $t_n = 1006$ мкс на медном образце, измеренный датчиком Холла

Таблица 1

Длительности фронтов и импульсов тока для образцов из различных материалов

Материал	Длительность импульса t_n , мкс	$t_{нФ}$, мкс	$t_{нзФ}$, мкс	$t_ф$, мкс	$t_{зФ}$, мкс	F_{RAD} , Гц	F_{AXIAL} , Гц
Медь М1	1006	19	9	918	1558	913	917
Титан ВТ6	838	19	20	387	401	1452	1600
Сталь 70	1068	20	29	848	902	1898	1462

Примечание: $t_{нФ}$ – длительность начального участка переднего фронта; $t_{нзФ}$ – длительность начального участка заднего фронта; $t_ф$ – длительность переднего фронта; $t_{зФ}$ – длительность заднего фронта; F_{RAD} – собственная частота радиальных вибраций образца; F_{AXIAL} – собственная частота осевых вибраций образца.

пределения токов по сечению под действием скин-эффектов, имеются значительные силы и ускорения в продольном направлении (z). Величина ускорений увеличивалась с ростом плотности тока.

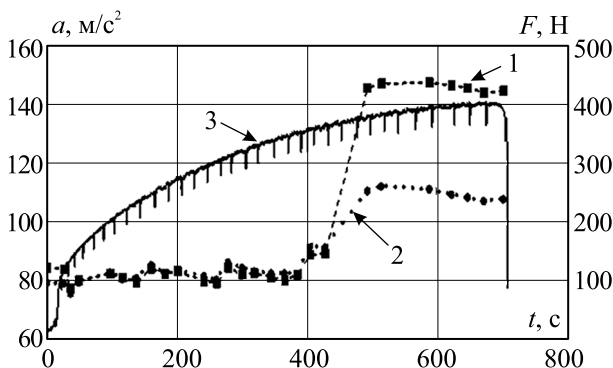


Рис. 9. Зависимость от деформации (времени) следующих величин:

- 1 – максимальное осевое ускорение;
2 – перпендикулярное ускорение; 3 – приложенная статическая сила F (шкала справа)

Зависимости ускорений и величины статической нагрузки от времени для плоского образца из латуни марки Л68 толщиной 0,45 мм, шириной 3 мм и длиной рабочей части 28 мм приведены на рис. 9.

Как следует из рис. 9, скачкообразное изменение размаха ускорения происходит при статических деформациях 50–65 % от значений, соответствующих разрушению образца. Скачкообразный рост размаха ускорений при некотором уровне статической деформации предположительно связан с изменениями фазового состояния материала образца.

Выводы

Установлено, что величину механического эффекта действия тока можно с высокой достоверностью фиксировать и исследовать с помощью многокомпонентных пьезоэлектрических преобразователей акселерометров.

Установлено, что увеличение статической нагрузки вызывает рост затухания колебательных процессов, вызванных действием импульсного тока.

Управление амплитудой и длительностью импульсов тока позволяет формировать ударные виброакустические процессы в металлических образцах.

Синхронный контроль магнитного поля и многоточечный контроль осевых и радиальных составляющих вибрации дал возможность установить: в возбуждении упругих виброакустических колебаний материалов образцов важен кратковременный быстрый рост (бросок) фронта (спада) импульса тока, поскольку после его окончания, фиксируемые акселерометром, колебания представляют собой затухающий процесс. Именно «короткая» часть переднего и заднего фронтов оказывают сильное воздействие на амплитуду возбуждаемых колебаний. Последующая экспоненциальная часть импульса намного меньше и слабо проявляется в вибрации. Таким образом, упругая деформация значительно возрастает в начале переднего фронта и в момент начала заднего фронта за время менее 9–29 мкс.

Действие импульсного тока длительностью порядка 200 мкс можно использовать для неразрушающего контроля деформаций в конструкциях при их статическом нагружении.

Методика опытов позволяет оценить ресурс, например элементов обмоток мощного энергетического оборудования [15], начиная от режимов, близких к нормальным эксплуатационным, до близких к аварийным, вызывающим разрушение конструкций.

Согласно экспериментальным данным амплитуда и размах радиальной составляющей вибрации слабо зависят от длительности импульса тока.

Вибрационный отклик силового электродинамического действия магнитного поля импульса тока существенно зависит от скин-эффекта.

Согласно основному закону индукции, ЭДС самоиндукции, а следовательно, и электрическое поле электромагнитной индукции E пропорциональны скорости изменения тока. Отсюда линейность зависимостей бросков ускорения вибраций в начале и в конце импульса тока на представленных рисунках (см. рис. 5, 6).

Броски вибраций, по-видимому, являются следствиями динамических эффектов на начальных участках фронтов импульса из-за

самоиндукции. Они вносят основной вклад в силовое электродинамическое действие магнитного поля тока на проводник, приводя к упругим напряжениям в нем. При нарастании тока за время $t_{\text{ф}}$ (см. рис. 1 а, б), первом случае, за счет электрического поля E происходит ускорение электронов проводимости (см. рис. 1, б) в поверхностном слое проводника и возникают силы направленные от оси проводника и всплеск вибрации (см. рис. 3). При спаде тока за время $t_{\text{зф}}$ (см. рис. 1 а, б), во втором случае, поле электромагнитной индукции E увеличивает скорость электронов проводимости (см. рис. 1, в), создавая силовое действие, направленное к оси проводника и всплеск вибрации в противоположную сторону (см. рис. 3). Такое предположение силового действия тока подтверждают данные многочисленных опытов (см. рис. 3–6).

Вклад квазистатического действия импульса тока от его вершины $t_{\text{и}}$ (см. рис. 1, а) в величину механических колебаний (в пинч-эффект) незначителен, менее 10 %.

Заключение

Полученные экспериментальные результаты должны быть учтены в теоретических расчетах пинч-эффекта в металлах при действии импульсов тока.

Амплитуда упругих деформаций проводящих элементов достигает существенных значений, а вызванные ими пластические деформации в нагруженных элементах могут быть использованы в технологиях применения электропластического эффекта [16].

Список литературы

1. Батаронов И.Л., Роцупкин А.М. К электронной теории динамического пинч-эффекта в металлах // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 1993. № 8. С. 61–64.
2. Батаронов И.Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 93.
3. Власов А.А. Макроскопическая электродинамика // 2-е изд. М.: Наука. 2005. – 204 с.
4. Инкин А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин: учеб. пособие. – Новосибирск: ООО «Издательство ЮКЭА», 2002. – 464 с.
5. Кузнецов М.И. Основы электротехники: 9-е издание, исправ. – М.: Высшая школа, 1964. – 560 с.

6. Скин-эффект / В.М. Буханов, Т.М. Глушкова, В.И. Козлов, А.В. Матюнин, А.М. Салецкий, Д.Э. Харабдзе. – М. : Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. – 12 с.
7. Кускова Н.И. Обратный скин-эффект // Письма в ЖЭТ. 2004. Вып. 21. С. 59–65.
8. Каганов М.И., Фикс В.Б. Трансформация электромагнитной энергии в звуковую электронами металла (теория) // Успехи физических наук. 1986. Т.150. № 9. С. 159–161.
9. Троицкий О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом // Изв. АН СССР. Серия Физическая. 1977. № 6. С.118–122.
10. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТ. 1969. Т. 10. С. 18–22.
11. Martin H.T., Martin M.L. LabVIEW for Telecom, Semiconductor, Automotive, Sound and Vibration and General Test and Measurement // National Instruments virtual instrumentation series. Prentice Hall. 2000. – 272 p.
12. Skal Asya S. The full Lorentz force formula responsible for turbulence in solids and fluids and explained Faraday's paradox // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2013. February. V. 4. I. 2. – 10 p.
13. Surkaev L. Magnetohydrodynamic perturbations arising in metallic conductors under the action of the discharge current // Technical Physics. 2015. V. 60. No 7. P. 981.
14. Управление параметрами механических колебаний, генерируемых пропусканием импульсного тока через металл / В.И. Сташенко, О.А. Троицкий, Е.А. Правоторова, О.Б. Скворцов // Состояние и проблемы измерений. Сб. матер. XIV Всероссийской научно-технич. конф. Москва, НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. С. 98–101.
15. Скворцов О.Б. Контроль вибрации с применением аппаратуры National Instruments // Сб. трудов XII международной научно-практич. конф. «Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments 2013. NIDaysXII ежегодная конференция компании National Instruments», Москва, ДМК. 2013. С. 78–80.
16. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства) / О.А. Троицкий и др. Т. 1. Т. 11. Москва, Ижевск: Изд-во АНО ИКИ, 2004. – 563 с., 467 с.

СКВОРЦОВ Олег Борисович E-mail: skv@balansmash.ru Тел.: (495)120-03-18 (доб.152)	Кандидат технических наук, начальник отдела разработки электронных систем Завода балансировочных машин, старший научный сотрудник ИМАШ РАН. Сфера научных интересов – измерение вибрации, вопросы диагностики и прогнозирования технического состояния механического оборудования, средства противоаварийной защиты, балансировка роторного оборудования. Автор более 280 научных трудов, включая более 100 изобретений.
СТАШЕНКО Владимир Иванович E-mail: vis20-11@rambler.ru Тел.: (499) 135-55-18	Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов – материаловедение и физика твердого тела. Исследования действия электрического тока и внешних электромагнитных полей, включая СВЧ-излучение на физико-механические свойства металлов. Автор более 180 работ, 3 монографий, 13 патентов и авторских свидетельств.
ТРОИЦКИЙ Олег Александрович E-mail: oatroitsky@rambler.ru Тел.: (499) 135-30-72	Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН Россия. Сфера научных интересов – материаловедение и физика твердого тела. Исследования действия электрического тока и внешних электромагнитных полей, включая СВЧ-излучение и радиоактивное излучение, на физико-механические свойства материалов, особенно металлов. Автор более 350 работ и докладов, 9 монографий, 14 патентов и авторских свидетельств.