

Вибрации проводников при пропускании импульсного электрического тока и неразрушающий контроль

© О.А. Троицкий¹, В.И. Стащенко¹, О.Б. Скворцов^{1,2}

¹ИМАШ РАН, Москва, 101990, Россия

²НТЦ «Завод БалМаш», Москва, 115230, Россия

Рассмотрены особенности пропускания импульсного электрического тока через проводник, которое сопровождается возникновением вибрации проводника, что можно использовать для контроля отсутствия повреждений проводника и элементов его крепления. При пропускании импульсный электрический ток создает собственное магнитное поле, с которым вступает во взаимодействие, вызывая вибрацию и деформацию проводника, что приводит к формированию затухающих вибрационных процессов. Экспериментально исследованы вибрационные и магнитодинамические процессы в образцах из меди, золота, серебра, латуни, стали и титана. Показано, что формирование виброакустических процессов привязано к моментам начала и окончания пропускания импульсного электрического тока. Вследствие анализа экспериментальных результатов выявлена близкая к линейной зависимость размаха вибрационных колебаний от силы или плотности тока. Установлено, что зависимость размаха вибрационных колебаний от длительности импульса электрического тока свидетельствует о наличии подъема в области относительно малой его длительности, соответствующего сложению противофазных колебаний, которые формируются на переднем и заднем фронтах импульса электрического тока. Приведены результаты исследования вибрационного отклика на пропускание импульсного электрического тока для различных материалов и параметров импульса. Изучены возможности таких вибраций и связанных с ними деформационных процессов за счет управления параметрами импульсного электрического тока. Полученные результаты могут быть использованы в устройствах электропластической обработки металлов и при построении средств неразрушающего контроля элементов мощного электрооборудования.

Ключевые слова: проводник, импульсный электрический ток, деформация, вибрация, пинч-эффект, неразрушающий контроль

Введение. Действие импульсного электрического тока на металлы и сплавы сопровождается электродинамическим давлением на проводник со стороны его собственного магнитного поля. Это явление называется пинч-эффектом и связано с силами Лоренца, действующими на электронную систему металла через его собственное магнитное поле [1–3] и сжимающими ее с осью металлического образца. Возникающее при этом радиальное поле Холла препятствует его дальнейшему сжатию. Короткий импульс электрического тока вследствие перераспределения плотности электрического тока по сечению проводника [4] вызывает проявление скин-эффекта. Изменения плотности электронов обуславливают влияние зарядов на ионную решетку ме-

таллов, способствуя ее деформации. Кроме того, при прохождении электрического тока через проводник выделяется теплота.

Совокупность указанных явлений представляет собой механическую реакцию в виде вибрации материала проводника на пропускание импульсного электрического тока, подобную воздействию ультразвука, и приводит к частичным пластическим деформациям [5, 6].

Оценить возникающие механические колебания в токоведущих элементах можно с помощью датчиков вибраций [7]. Механические колебания (в виде ускорения), проявляющиеся в результате действия импульсного электрического тока, возрастают с увеличением статической нагрузки, которая в свою очередь приводит к усилению затухания колебаний [8–10]. При нагружении металлических проводников наличие импульсного электрического тока может частично изменять механические свойства материала.

Характер возбуждения механических колебаний в металлических проводниках при пропускании импульсного электрического тока высокой плотности отличается определенной сложностью. Оно может применяться при исследованиях циклической прочности элементов мощного электрооборудования [11, 12]. Примером конструктивных элементов, испытывающих комплексное воздействие электромагнитных сил, температуры и механических сил, являются элементы обмоток генераторов, двигателей и трансформаторов. Обеспечение их надежной работы при интенсивной эксплуатации в течение длительного времени — важная научно-техническая задача. Одним из путей ее решения является применение импульсного электрического тока при испытаниях на циклическую прочность и для неразрушающего контроля деформаций в конструкциях при статическом нагружении.

Цель работы — исследование особенностей вибрационного отклика в образце на действие импульсного электрического тока для оценки возможности управления этими процессами, что можно использовать при решении практических задач в машиностроении и материаловедении.

Проведение испытаний. В процессе экспериментов проведено исследование действия импульсного электрического тока на сплошные и трубчатые проводники. Такие проводники применяют в технике в качестве токопроводящих элементов в мощных генераторах, трансформаторах и других электротехнических конструкциях. Эти элементы подвержены значительным механическим колебаниям, в том числе в условиях повышенных температур, под действием ponderomotorных сил при пропускании электрического тока. Надежная работа элементов важна для обеспечения безопасности оборудования. Оценка вибрационной прочности токопроводящих элементов наряду с другими причинами требует также учета вибрационных эффектов, возникающих в самом проводнике как следствии скин-

и пинч-эффекта. Согласно теоретическим оценкам, значение возникающих механических напряжений и средний уровень сдвиговых механических напряжений в металле, обусловленных электродинамическим давлением магнитного поля электрического тока (пинч-эффект), пропорционален квадрату плотности электрического тока и площади сечения проводника.

Испытания проводились на установке (стенде) для измерения вибраций в сплошных и трубчатых образцах (рис. 1). Для оценки вибрационного отклика на прохождение импульсного электрического тока выделена максимальная амплитуда вибрации и определено ускорение материала образца в радиальном и осевом направлениях.

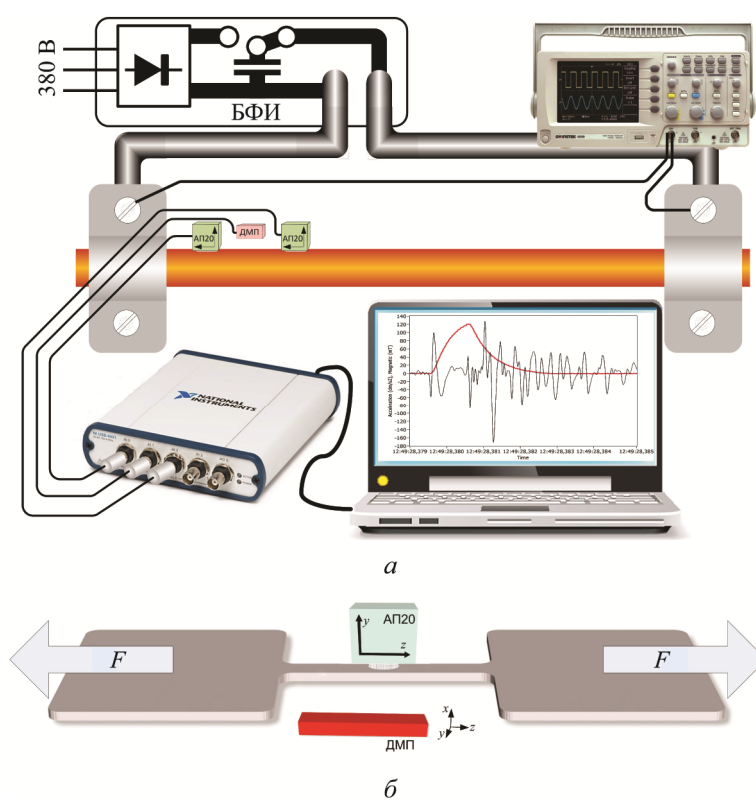


Рис. 1. Схема установки (а) для измерения вибраций с подключением цилиндрического образца к блоку формирования импульсов (БФИ) и плоский образец (б)

В качестве датчиков вибрации использованы трехкомпонентные пьезоэлектрические акселерометры АП20, которые обеспечивают синхронное измерение вибрационного ускорения в трех ортогональных направлениях. Контроль мгновенных значений магнитного поля, а следовательно, и создающих его токов в проводнике выполнялся расположенным над его рабочей частью трехкомпонентным датчиком Холла ДМП на основе микросхем DRV5053. Такие бесконтакт-

ные датчики магнитного поля могут фиксировать три пространственные компоненты поля [13, 14].

При действии импульсного электрического тока в моменты перехода от поверхностного распространения тока (скин-эффект) к действию радиальных сил сжатия (пинч-эффект) возникают переходные процессы, которые вызывают формирование осевых ускорений, наряду с радиальными действующими на фоне температурного расширения в осевом направлении. Силы радиального сжатия при ограничении расширения в осевом направлении приводят к имплозии образца. Радиальное и осевое ускорения коррелируемы между собой и достигают максимального значения в момент окончания фронта импульсного электрического тока. По окончании подачи импульса в образце наблюдается затухание механических колебаний, связанное с распространением продольных виброакустических колебаний.

Трехкомпонентные датчики вибрации АП20 были закреплены клеем на поверхности образца через изолирующую ситалловую прокладку. Контроль электрического тока выполняли бесконтактные датчики магнитного поля (ДМП) [13, 14]. Дополнительно образец можно нагрузить статической силой F . Сигналы с датчиков поступают через многоканальное устройство сбора данных, например NI USB 4431, в компьютер. Функции сбора, хранения результатов и анализа сигналов реализованы с использованием программного пакета LabVIEW [7]. Для обеспечения удовлетворительной помехоустойчивости использовалась частотная адаптивная фильтрация сигналов, обеспечивающая подавление помех, которые связаны с работой мощного источника импульсов электрического тока.

Упругие деформации проводника при пропускании импульсного электрического тока. При действии импульсов электрического тока возникающие переходные процессы и моменты перехода от поверхностного распространения электрического тока (скин-эффект) к действию радиальных сил сжатия (пинч-эффект) вызывают формирование наряду с радиальными осевых ускорений, действующих на фоне температурного расширения в осевом направлении. При таких условиях силы радиального сжатия приводят к имплозии образца. Радиальное и осевое ускорения коррелируемы между собой и достигают максимального значения в момент окончания фронта импульса электрического тока.

После окончания подачи импульса электрического тока в образце наблюдается затухающий колебательный процесс, связанный с распространением продольных виброакустических колебаний.

Взаимосвязь между электрическими процессами, которые характеризуются сигналами от датчиков магнитного поля, и механическими процессами деформации проводника, контролируемые по значению ускорения поверхностного слоя этого проводника акселерометром, выражаются зависимостями этих величин от времени t (рис. 2, 3).

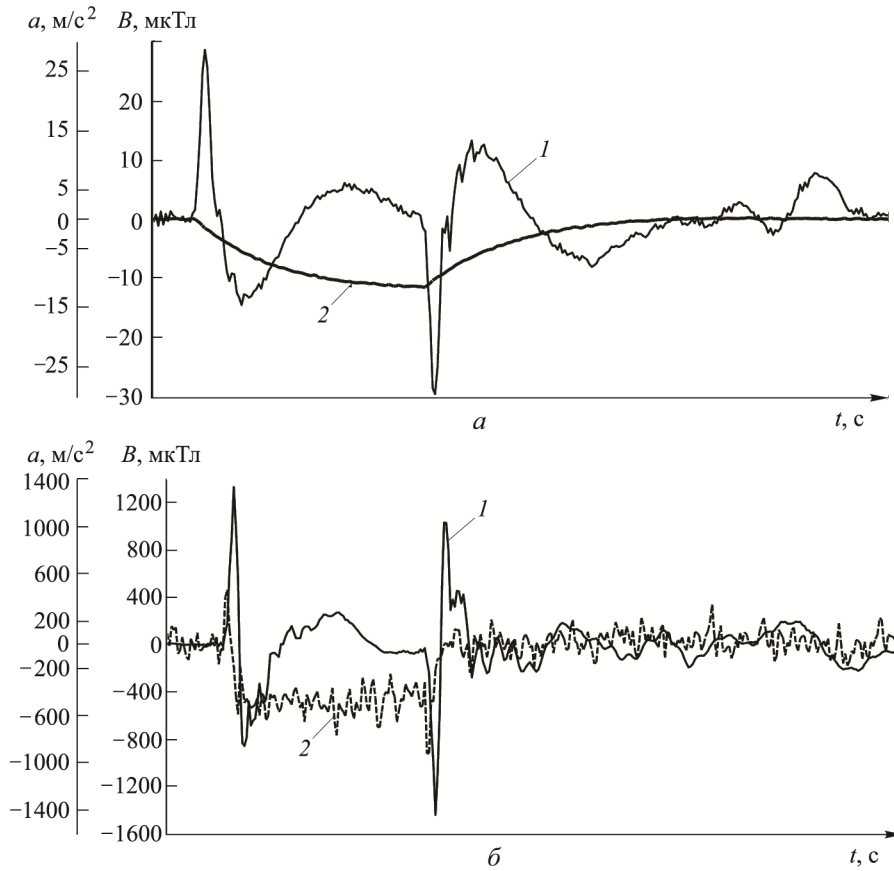


Рис. 2. Зависимости сигналов датчиков вибрации и магнитной индукции от времени для образца из меди (а) и из коррозионно-стойкой стали (б):
1 — ускорение; 2 — магнитное поле

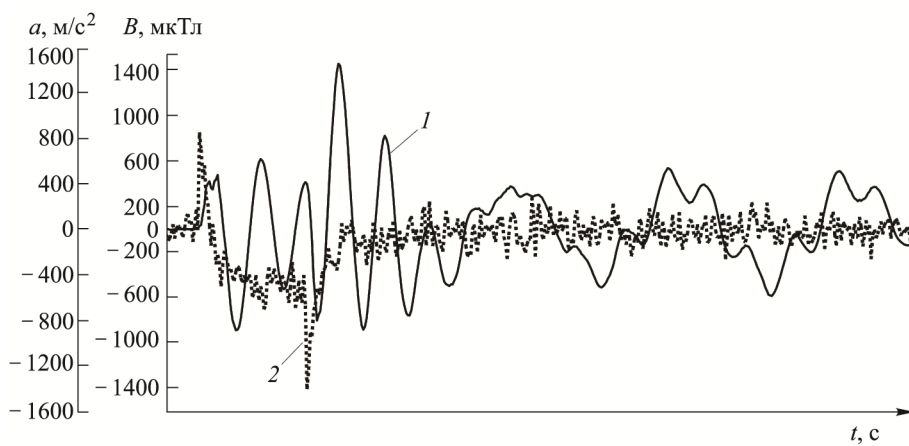


Рис. 3. Зависимости сигналов датчиков вибрации и магнитной индукции от времени для образца из титана:
1 — ускорение; 2 — магнитное поле

Из рис. 2, 3 видно, что представленные зависимости радиальной (вертикальной) составляющей вибрационных сигналов и кольцевой компоненты магнитного поля вокруг образца пропорциональны мгновенным значениям электрического тока через образец для различных материалов (меди, коррозионно-стойкой стали, титана). Электрические свойства таких материалов существенно различны. Глубина скин-слоя изменяется от очень малой для меди до очень большой, соизмеримой с поперечными размерами образца для титана. При длительности подачи импульса около 1 мс в образцах из меди увеличение магнитного поля и силы тока происходит сравнительно медленно. Для образцов из коррозионно-стойкой стали форма импульса электрического тока и магнитного поля близка к прямоугольной, а для образцов из титана характерно наличие выбросов на переднем и заднем фронтах импульса.

Динамическое действие электрического тока на образцы без статического нагружения. Полученные временные зависимости магнитного поля и ускорения (рис. 4) показали, что рассматриваемые физические процессы наиболее заметно изменяются в моменты резкого скачка параметров импульсного электрического тока, т. е. на переднем и заднем фронтах такого импульса. Абсолютная величина механического отклика зависит от амплитуды импульса электрического тока. Непериодический и асимметричный характер временных

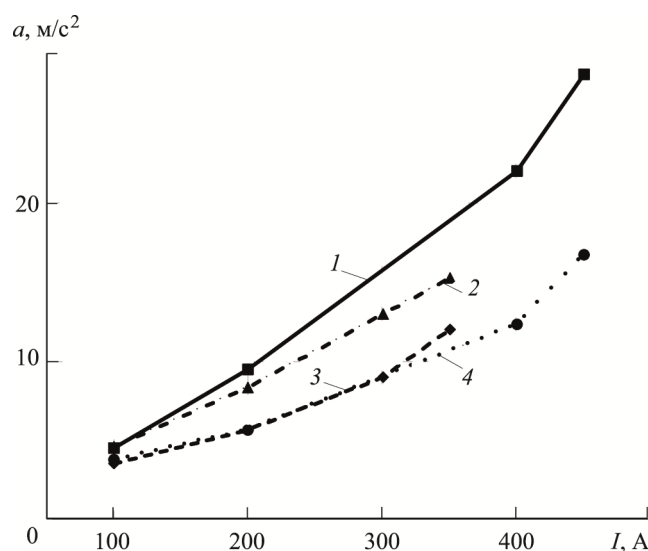


Рис. 4. Зависимость размаха радиального ускорения от амплитуды электрического тока при длительности импульсов $5 \cdot 10^{-4}$ с для медной трубки диаметром 11 мм (внутренний диаметр — 8 мм) при размещении датчика в области конца (1) и свободного конца (2) консольно закрепленного образца, в левой (3) и правой части (4) подвешенного образца

сигналов как ускорения, так и магнитной индукции приводит к необходимости использования размаха как наиболее адекватной величины, которая учитывает и максимальные положительные, и максимальные отрицательные их значения.

Полученный результат показывает, что на характер зависимости ускорения от силы тока несущественно влияют особенности крепления образца. Представляет интерес оценка влияния диаметра образца на вибрационный отклик при различной плотности электрического тока. Размах ускорений находится в зависимости от плотности электрического тока для образцов из серебра в виде сплошных стержней круглого сечения при различном диаметре (рис. 5).

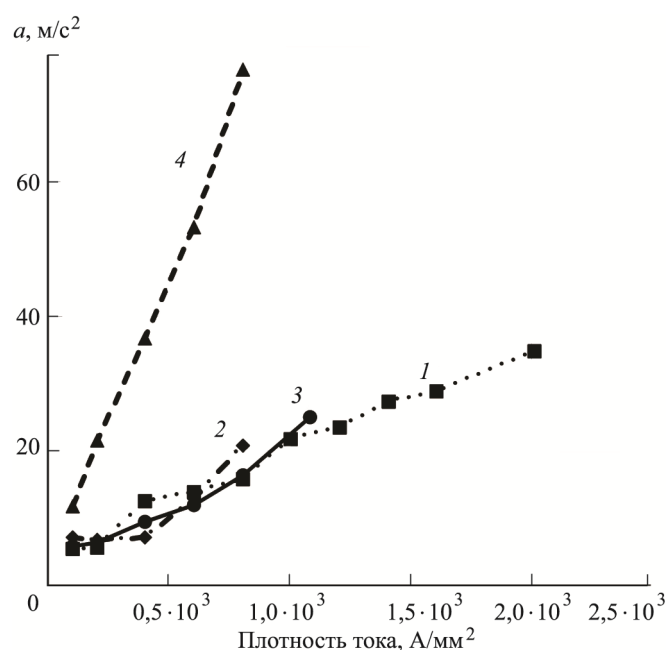


Рис. 5. Зависимость среднего размаха радиального ускорения от амплитуды плотности электрического тока одиночных импульсов длительностью $5 \cdot 10^{-4}$ с для образцов из серебра круглого сечения диаметром 1...4 мм (значение диаметра соответствует номеру кривой)

Мгновенное значение пропускаемого через образец импульсного электрического тока контролируется по сигналам датчика магнитной индукции. Если в качестве измеряемого параметра использовать размах значений этой величины, то зависимость размаха ускорения для различных материалов будет близка к линейной.

Зависимость размаха ускорения от магнитной индукции пропорциональна размаху величины импульсного электрического тока, пропускаемого через образцы из различных материалов одинакового диаметра (4 мм). Отсюда следует, что на вибрационный отклик существенное влияние оказывает материал образца (рис. 6).

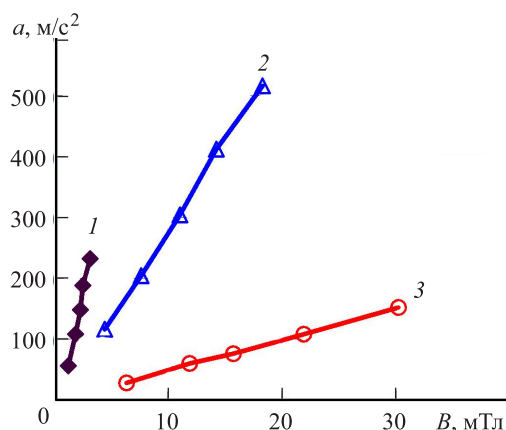


Рис. 6. Зависимость размаха ускорения от размаха магнитной индукции, создаваемой протекающим через образец импульсным электрическим током

Зависимость размаха колебаний от амплитуды электрического тока или амплитуды его плотности, как следует из указанного выше, близка к линейной. Это может быть связано со сложным характером возбуждения колебаний при пропускании импульсного электрического тока, при которых проявляется действие различных механизмов формирования колебаний (теплового, пинч- и скин-эффекта, деформаций, связанных с изменениями фазового состояния, магнитогидродинамических процессов) [2, 15–20].

Измерение действия электрического тока на плоских образцах. Одновременное действие динамических нагрузок, вызываемых импульсным электрическим током, и статического нагружения внешней медленно увеличивающейся статической силой $F_{ст}$ было изучено по образцам на рис. 1. Получены зависимости размаха ускорения и статической силы от времени (рис. 7). Статическая сила и вызванная ее действием деформация образца линейно изменялись пропорционально времени проведения эксперимента.

Проводники, через которые пропущен импульсный электрический ток, были испытаны на разрыв. При этом осуществлялась запись зависимости растягивающей силы от времени. Образцы деформировались до разрушения как без действия электрического тока, так и при его пропускании. Действие импульсного электрического тока вследствие пинч-эффекта проявлялось в первую очередь в направлении y , перпендикулярном плоскости образца (см. рис. 1, б), но на переходных режимах при перераспределении импульсного электрического тока по сечению в результате скин-эффекта имеются значительные силы и ускорения в продольном направлении z . Ускорения увеличивались с ростом плотности электрического тока.

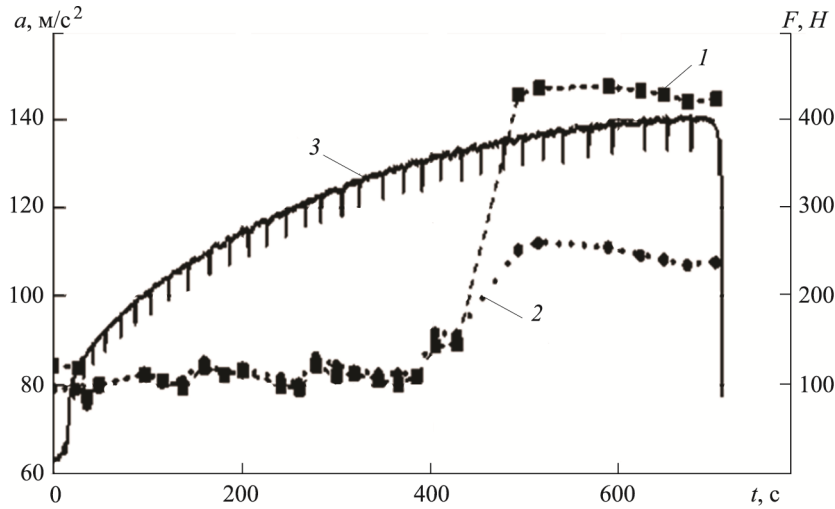


Рис. 7. Зависимость максимального осевого ускорения от времени деформации для образца из латуни:

1 — осевое ускорение; 2 — перпендикулярное ускорение; 3 — приложенная статическая сила F

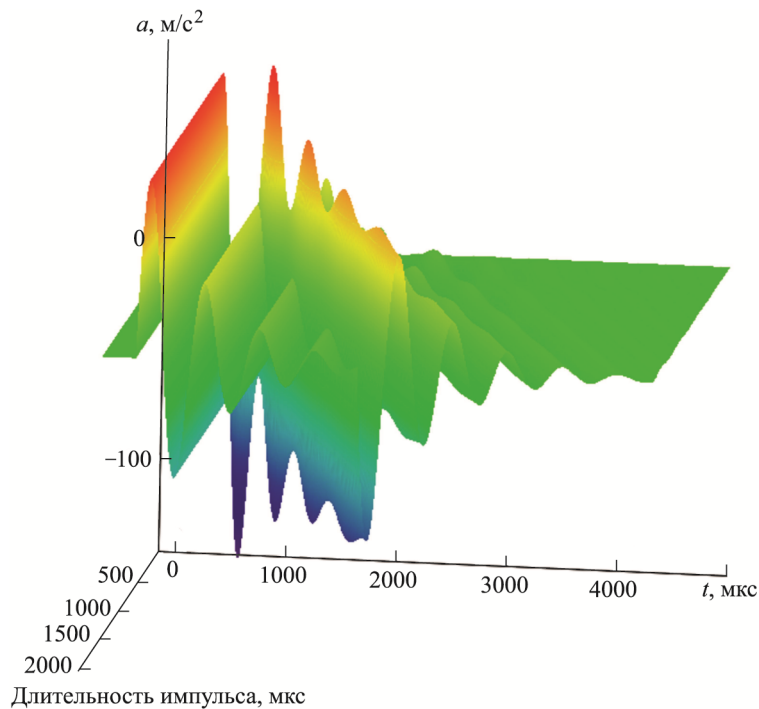


Рис. 8. Диаграмма сложения вибрационных сигналов, формируемых под действием переднего и заднего фронтов импульсного электрического тока при различной длительности импульса

Для измеренного размаха ускорений характерно существенное изменение скорости роста при некотором уровне статической деформации, что связано с изменениями фазового состояния материала образца.

Скачкообразное изменение размаха ускорения происходит при статических деформациях в 50...65 % значений, соответствующих разрушению образца (см. рис. 7).

Возбуждение колебания образца связано прежде всего с моментами прохождения переднего и заднего фронтов импульсного электрического тока. На фронтах формируются затухающие колебания, которые складываются после окончания пропускания импульсного электрического тока. Размах результирующих вибрационных процессов при изменениях длительности пропускания импульсного электрического тока также зависит от времени (рис. 8).

Результаты такого сложения (см. рис. 8) с учетом фаз колебаний обеспечивают увеличение и снижение амплитуд колебаний в области сравнительно коротких длительностей импульсного электрического тока [21]. Управление размахом возбуждаемой вибрации для заданной геометрии и материала образца позволяет нормировать механическое действие импульсного электрического тока. Такое воздействие может быть использовано как при обработке металла образца, так и при неразрушающем контроле отсутствия дефектов в качестве эквивалента внешнего ударного воздействия [22].

Выводы. Впервые получены экспериментальные результаты по динамическому эффекту механического действия импульсного электрического тока как при отсутствии внешнего статического нагружения, так и под действием статической нагрузки. Разработаны методика измерения многомерных вибраций, создаваемых импульсным электрическим током, и методы контроля последнего многокомпонентными датчиками магнитного поля. Установлено, что механический эффект действия электрического тока можно с высокой достоверностью фиксировать и исследовать с помощью многокомпонентных пьезоэлектрических преобразователей — акселерометров.

Показано, что увеличение статической нагрузки способствует затуханию колебаний, вызванных импульсным электрическим током. Контроль за возникающими при пропускании импульсного электрического тока вибрациями и действие импульсов можно использовать для неразрушающего контроля деформаций в конструкциях при их статическом нагружении. Управление амплитудой и длительностью импульсного электрического тока позволяет формировать ударные виброакустические процессы в металлических образцах.

Предложенная методика позволяет оценить ресурс элементов обмоток мощного энергетического оборудования, начиная с режимов, близких к нормальным эксплуатационным, и доводя до режимов, близких к аварийным, которые вызывают разрушение конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. *Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства)*. В 2 т. Москва, Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2004, 590 с.
- [2] Троицкий О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом. *Известия АН СССР. Сер. физическая*, 1977, № 6, с. 118–122.
- [3] Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах. *Письма в ЖЭТФ*, 1969, т. 10, № 7, с. 18–22.
- [4] Троицкий О.А., Сташенко В.И., Правоторова Е.А., Скворцов О.Б. Динамическое возбуждение колебаний в металлических проводниках при пропускании импульсных токов. *Современные тенденции развития науки и технологий*, 2017, № 1–1, с. 137–139.
- [5] Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б. Влияние вибраций от пинч-эффекта импульсного тока на пластическую деформацию. *Actual science*, 2016, т. 2, № 2, с. 50–52.
- [6] Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б. Влияние материала образцов, длительности импульсов и амплитуды тока на величину собственного магнитного поля тока и вибрацию круглых образцов от пинч-действия тока. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2016, № 3 (317), с. 187–194.
- [7] Скворцов О.Б. Контроль вибрации с применением аппаратуры National Instruments. *Сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. «Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments–2013». XII ежегодная конференция компании National Instruments (NIDAYS, Москва, 28–29 ноября 2013 г.)*. Москва, ДМКпресс, 2013, с. 78–80.
- [8] Савенко В.С., Троицкий О.А., Скворцов О.Б. К расчету плотности тока и напряженности магнитного поля в условиях электропластичности. *Сб. матер. XII Всерос. семинара-совещания «Инженерно-физические проблемы новой техники»*. Москва, НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, с. 274–276.
- [9] Савенко В.С., Троицкий О.А., Скворцов О.Б. Влияние электропластичности на микроструктуру стали при статической нагрузке. *Физико-технические науки и образование: проблемы и перспективы исследований*. Мозырь, УО МГПУ им. И.П. Шамякина, 2016, с. 128–131.
- [10] Троицкий О.А., Сташенко В.И., Левин И.С., Хрущов М.М., Савенко В.С., Скворцов О.Б. Исследования действия импульсного тока и СВЧ-излучения на механические свойства и фазовый состав нержавеющей стали 12X18H10T. *Науч. тр. IV Междунар. конф. «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении»*. Москва, Спектр, 2015, с. 254–256.
- [11] Правоторова Е.А., Скворцов О.Б. Оценка статистических характеристик механического действия импульсного тока на модели элементов мощного электрооборудования. *Динамика и прочность конструкций аэроупругих систем. Численные методы: тр. третьей науч.-техн. конф., 21–23 октября 2015 г.: сб. тезисов докл. Российская академия наук, Российский фонд фундамент. исследований, Ин-т машиноведения им. А.А. Благодирова [ред. совет конф. С.М. Каплунов и др.]*. Москва, РИФ «Семир». 2015, 56 с.
- [12] Правоторова Е.А., Скворцов О.Б. Моделирование виброиспытаний элементов обмоток мощного электрооборудования. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2015, № 5, с. 103–110.
- [13] Troitskiy O.A., Skvortsov O.B., Stashenko V.I. Generation of mechanical vibrations in metal samples by the use of the pinch effect. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 218, pp. 1–6.

- [14] Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б., Правоторова Е.А. Измерение магнитного поля и вибраций, созданных им в проводниках за счет пинч-эффекта. *Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки*, 2016, т. 21, № 3, с. 1361–1363.
- [15] Potapova A.A., Stolyarov V.V. Deformability and structural features of shape memory tini alloys processed by rolling with current. *Materials science and engineering: A*, 2013, vol. 579, pp. 114–117.
- [16] Батаронов И.Л. Механизмы электропластичности. *Соросовский образовательный журнал*, 1999, № 10, с. 94–99.
- [17] Сазонов Ю.И. Электромагнитно-акустические эффекты в конденсированных средах и физические методы их использования. *Сб. тр. Научной конф., посвященной памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А.В. Смольякова и В.И. Попкова. Сессия научного совета РАН по акустике и XXVII сессия Российского акустического общества, Санкт-Петербург, 16–18 апреля 2014 г.* Санкт-Петербург, РАО, 2014, 17 с.
- [18] Lukyanov A., Molokov S. Flexural vibrations induced in thin metal wires carrying high currents. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, no. 34 (10), pp. 1543–1552.
- [19] Surkaev L. Magnetohydrodynamic perturbations arising in metallic conductors under the action of the discharge current. *Technical Physics*, 2015, vol. 60, no. 7, pp. 981–993.
- [20] Skal A.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, vol. 4, issue 2, pp. 10–14.
- [21] Сташенко В.И., Троицкий О.А., Правоторова Е.А., Скворцов О.Б. Управление параметрами механических колебаний, генерируемых пропусканием импульсного тока через металл. *Состояние и проблемы измерений. Сб. матер. XIV Всерос. науч.-техн. конф. Москва, 18–20 апреля 2017.* Москва, НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 98–101.
- [22] Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б., Правоторова Е.А. Генерирование ударных колебательных процессов в металлических проводниках при пропускании импульсного тока. *Сб. тр. конф. Междунар. науч.-техн. конф. «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» («МНТК ФТИ–2017»).* Москва, 6–7 апреля 2017 г. Москва, МИРЭА, 2017, вып. 23 (XXIII), с. 443–445.

Статья поступила в редакцию 14.12.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б. Вибрации проводников при пропускании импульсного электрического тока и неразрушающий контроль. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1741>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Международной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики FARM–2017», посвященной 170-летию со дня рождения великого русского ученого Николая Егоровича Жуковского, Москва, 24–27 октября 2017 г.

Троицкий Олег Александрович — д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Область научных интересов: электрофизические процессы в металлах и сплавах. e-mail: oatroitsky@mail.ru

Сташенко Владимир Иванович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Область научных интересов: действие электрических и электромагнитных процессов на физические свойства металлов и сплавов. e-mail: vis20-11@gambler.ru

Скворцов Олег Борисович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, начальник отдела разработки систем контроля ООО «НТЦ «Завод БалМаш». Область научных интересов: измерение и анализ процессов вибрации и виброакустических сигналов. e-mail: skv@balansmash.ru

Vibration of conductors when passing pulsed electric current through them and non-destructive testing

© O.A. Troitsky¹, V.I. Stashenko¹, O.B. Skvortsov^{1,2}

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, 101990, Russia

²RDC Balancing Machine Plant LLC, Moscow, 115230, Russia

The article considers the features of passing pulsed electric current through a conductor. It is accompanied by the occurrence of conductor vibration, which can be used to control the absence of damage in the conductor and its fastening elements. The pulsed electric current creates its own magnetic field, and interacts with it, causing vibration and deformation of the conductor, which leads to the formation of damped vibration processes. Vibrational and magnetodynamic processes in samples of copper, gold, silver, brass, steel and titanium have been experimentally studied. It is shown that the formation of vibro-acoustic processes is correlated with the moments of the beginning and the end of the passing pulsed electric current. Based on the results of the analysis of the experimental data, the dependence of vibrational oscillation amplitude on the current magnitude or density is found to be close to linear. It is established that the dependence of the vibrational oscillations amplitude on the duration of the electric current pulse indicates the presence of a rise in the region of relatively small pulse durations, which corresponds to adding up counterphase oscillations formed at the leading and trailing edges of the electric current pulse. The results of the investigation of the vibrational response to the passing pulsed electric current for various materials and pulse parameters are presented. The capability of such vibrations and related deformation processes when controlling the parameters of pulsed electric current are studied. The obtained results can be used in devices for electroplastic processing metals and at construction of nondestructive means of testing powerful electrical equipment elements.

Keywords: conductor, pulsed electric current, deformation, vibration, pinch effect, non-destructive testing

REFERENCES

- [1] Troitsky O.A., Baranov Yu.V., Avramov Yu.S., Shlyapin A.D. *Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennykh materialov (teoriya, tekhnologiya, struktura i svoystva)*. V 2 tomakh [Principal physics and technologies of processing modern materials (theory, technology, structure and properties. In 2 volumes]. Moscow, Izhevsk, Izhevsk Institute of Computer Science Publ., 2004, 590 p.
- [2] Troitsky O.A. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Fizicheskaya — Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Physical Series*, 1977, no. 6, pp. 118–122.
- [3] Troitsky O.A. *Pisma v zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki — Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1969, vol. 10, no. 7, pp. 18–22.
- [4] Troitsky O.A., Stashenko V.I., Pravotorova E.A., Skvortsov O.B. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii — Current trends in science and technologies*, 2017, no. 1–1, pp. 137–139.
- [5] Troitsky O.A., Stashenko V.I., Skvortsov O.B. *Actual science*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 50–52.

- [6] Troitsky O.A., Stashenko V.I., Skvortsov O.B. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii — Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*, 2016, no. 3 (317), pp. 187–194.
- [7] Skvortsov O.B. Kontrol vibratsii s primeneniem apparatury National Instruments [Vibration control using National Instruments]. *Sbornik trudov XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na base tekhnologiy National Instruments–2013”. XII Ezhegodnaya konferentsiya kompanii National Instruments (NIDAYS, Moskva, 28–29 noyabrya 2013 g.)* [Proceedings of the XII International scientific-practical Conference “Engineering and scientific applications based on National Instruments technologies–2013”. XII Annual conference of the company National Instruments (NIDAYS, Moscow, November 28–29, 2013)]. Moscow, DMKpress Publ., 2013, pp. 78–80.
- [8] Savenko V.S., Troitsky O.A., Skvortsov O.B. K raschetu plotnosti toka i napryazhennosti magnitnogo polya v usloviyakh elektroplastichnosti [About calculation of the current density and the magnetic field strength under electroplasticity conditions]. *Sbornik materialov XII Vserossiyskogo seminar-soveshchaniya “Inzhenerno-fizicheskie problemy novoy tekhniki”* [Proceedings of the XII National seminar-conference “Engineering and physical problems of new technology”]. Moscow, BMSTU NUK IU Publ., 2016, pp. 274–276.
- [9] Savenko V.S., Troitsky O.A., Skvortsov O.B. Vliyanie elektroplastichnosti na mikrostrukturu stali pri staticheskoy nagruzke [Effect of electroplasticity on the microstructure of steel under static loading]. In: *Fiziko-tekhnicheskie nauki i obrazovanie: problemy i perspektivy issledovaniy* [Physical and Engineering sciences and education: problems and prospects of research]. Mozyr, Republic of Belarus, UO MGPU im. I.P. Shamyakina Publ., 2016, pp. 128–131.
- [10] Troitsky O.A., Stashenko V.I., Levin I.S., Khrushchov M.M., Savenko V.S., Skvortsov O.B. Issledovaniya deystviya impulsnogo toka i SVCh izlucheniya na mekhanicheskie svoystva i fazovyy sostav nerzhavayushchey stali 12X18H10T [Research of the action of pulsed current and microwave radiation on the mechanical properties and phase composition of stainless steel 12X18H10T]. *Nauchnye Trudy IV mezhdunarodnoy konferentsii “Fundamentalnye issledovaniya i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii”* [Proceedings of the IV International conference “Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering”]. Moscow, Spektr Publ., 2015, pp. 254–256.
- [11] Pravotorova E.A., Skvortsov O.B. Otsenka statisticheskikh kharakteristik mekhanicheskogo deystviya impulsnogo toka na modeli elementov moshchnogo elektrooborudovaniya [Estimation of statistical characteristics of the pulsed current mechanical action on a model of elements of a power electrical equipment]. *Trudy tretyey nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Dinamika i prochnost konstruksiy aerogidrouprugikh system. Chislennyye metody. Moskva, 21–23 oktyabrya, 2015 (Sbornik tezisev dokladov)* [Proceedings of the third scientific and technical conference “Dynamics and strength of the structures of aerohydroelastic systems. Numerical methods. Moscow, October 21–23, 2015. (Book of abstracts)]. Moscow, JSC “RIF “SEIIR” Publ., 2015, pp. 39–40.
- [12] Pravotorova E.A., Skvortsov O.B. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin — Problems of mechanical engineering and machine reliability*, 2015, no. 5, pp. 103–110.
- [13] Troitskiy O.A., Skvortsov O.B., Stashenko V.I. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 218, pp. 1–6.
- [14] Troitsky O.A., Stashenko V.I., Skvortsov O.B., Pravotorova E.A. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennyye i tekhnicheskie nauki — Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 1361–1363.

- [15] Potapova A.A., Stolyarov V.V. *Materials science and engineering: A*, 2013, vol. 579, pp. 114–117.
- [16] Bataronov I.L. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal — Soros educational journal*, 1999, no. 10, pp. 94–99.
- [17] Sazonov Yu.I. Electromagnitno-akusticheskie efekty v kondensirovannykh sredakh i fizicheskie metody ikh ispolzovaniya [Electromagnetic-acoustic effects in condensed media and physical methods of their use]. *Sbornik trudov konferentsii “Sessiya nauchnogo soveta RAN po akustike” i XXVII sessiya Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva, Posvyashchennaya pamyati uchenykh-akustikov FGUP “Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr” A.V. Smolyakova i V.I. Popkova. St.-Petersburg, 16–18 aprelya 2014 g.* [Proceedings of the conference “Session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Acoustics” and the XXVII Session of the Russian Acoustical Society, dedicated to the memory of acoustics scientists at the A.V. Smolyakov’s and V.I. Popkov’s Krylov State Research Center. St. Petersburg, April 16–18, 2014]. St. Petersburg, RAO Publ., 2014, 17 p.
- [18] Lukyanov A., Molokov S. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, no. 34 (10), pp. 1543–1552.
- [19] Surkaev L. *Technical Physics*, 2015, vol. 60, no. 7, pp. 981–993.
- [20] Skal A.S. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2013, vol. 4, issue 2, pp. 10–14.
- [21] Stashenko V.I., Troitsky O.A., Pravotorova E.A., Skvortsov O.B. Upravlenie parametrami mekhanicheskikh kolebaniy, generiruemykh propuskaniem impulsnogo toka cherez metal [Controlling the parameters of mechanical oscillations generated by passing pulsed current through a metal]. *Sbornik materialov XIV Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii “Sostoyanie i problemy izmereniy”.* Moskva, 18–20 aprelya 2017 g. [Proceedings of the XIV National scientific and technical conference “The state and problems of measurements”. Moscow, April 18–20, 2017]. Moscow, BMSTU NUK IU Publ., 2017, pp. 98–101.
- [22] Troitsky O.A., Stashenko V.I., Skvortsov O.B., Pravotorova E.A. Generirovanie udarnykh kolebatelnykh protsessov v metallicheskikh provodnikakh pri propuskaniy impulsnogo toka [Generation of shock oscillatory processes in metallic conductors when transmitting a pulsed current]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii “Informatika i tekhnologii. Innovatsionnye tekhnologii v promyshlennosti i informatike” (MNTK FTI–2017).* Moskva, 6–7 aprelya 2017 g. [Proceedings of the International scientific and technical conference “Informatics and technology. Innovative technologies in industry and informatics” (“MNTK FTI–2017”), Moscow, April 6–7, 2017]. Moscow, MIREA Publ., 2017, no. 23 (XXIII), pp. 443–445.

Troitsky O.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Senior Staff Scientist, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN). Research interests: electrophysical processes in metals and alloys. e-mail: oatroitsky@mail.ru

Stashenko V.I., Cand. Sc. (Eng.), Leading Research Scientist, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN). Research interests: the effect of electrical and electromagnetic processes on the physical properties of metals and alloys. e-mail: vis20-11@rambler.ru

Skvortsov O.B., Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Scientist, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Head of Control Systems Development Department, RDC Balancing Machine Plant LLC. Research interests: measurement and analysis of vibration processes and vibroacoustic signals. e-mail: skv@balansmash.ru