

была бы минимально возможной. Вычислительная сложность алгоритма 3 составляет $O((\sum_{i=1}^p N_i)(K - p))$, где p – число цепочек.

Литература:

1. *Grassi V., Donatiello L., Tucci S.* On the Optimal Checkpointing of Critical Tasks and Transaction-Oriented Systems // IEEE Trans. Software Eng. – Jan. 1992. – Vol. 18. № 1. – P. 72-77.

2. *Coffman E., Gilbert E.* Optimal Strategies for Scheduling Checkpoints and Preventive Maintenance // IEEE Trans. Reliability. – Apr. 1990. – Vol. 39. № 1. – P. 9-18.

3. *Bruno J.L., Coffman E.G.* Optimal Fault-Tolerant Computing on Multiprocessor Systems // Acta Informatica. – 1997. – Vol. 34. – P. 881-904.

4. *Белый Д.В., Сушков Б.Г.* Модель организации рестартов в системах реального времени. – М.: ВЦ РАН, 1996. – 32 с.

5. *Гречук Б.В., Фурузян М.Г.* Алгоритмы организации рестартов в системах реального времени с произвольным графом связей. – М.: ВЦ РАН, 2004. – 32 с.

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

Особенности оценки вибрационных воздействий в электромеханических системах с импульсным управлением

Аннотация: Рассмотрены вопросы генерации вибрации в проводниковых элементах мощного энергетического оборудования, работающих в условиях прохождения электрических импульсов. Проводниковые элементы в условиях действия токов высокой плотности испытывают не только значительные температурные воздействия, но и большие механические динамические нагрузки. Действие механических вибраций влияет на механические свойства металла и может приводить к снижению усталостной прочности, но может также быть использовано при решении задач диагностики состояния обмоток мощных электрогенераторов и двигателей.

Ключевые слова: электрогенератор, импульсный инвертор, электрический импульс, вибрация, циклическая

усталость, надежность, ускорение, деформация, электропластический эффект, вибропластический эффект, диагностика

Введение

При выборе конструкционных материалов мощного электроэнергетического оборудования внимание в первую очередь обращают на обеспечение заданных электрических характеристик, например, на снижение величины активного сопротивления. При этом конструкционные элементы также испытывают значительные динамические нагрузки. В соответствии с ГОСТ 5616-89 элементы генераторов ГЭС и ГАЭС рассчитаны на действие вибрации с частотой 1-100 Гц и амплитудой не более 1 g. Перспективные направления энергетики, такие как солнечная энергетика, а также ветровая энергетика и гидроэнергетика с имеющими переменную скорость вращения агрегатами, предполагают использование мощных импульсных инверторов. Эксплуатация такого оборудования связана с обеспечением непрерывной работы с импульсными напряжениями и токами высокой плотности. Приведенные ниже результаты экспериментальных исследований показывают, что на конструкционные элементы в виде электропроводящих шин и элементы их крепления действуют вибрационные ускорения, частоты и амплитуды которых существенно превышают указанные в ГОСТ 5616-89 и в других нормативных документах. Вибрации повышенной частоты при этом могут быть причиной снижения надежности оборудования из-за проявления процессов циклической усталости [1]. Действие электрических импульсов на электропроводящие материалы находит промышленное применение [2,3] и проявляется как изменение механических свойств материала под влиянием электропластического эффекта.

Методика исследования влияния электрических импульсов на проводники

В данной работе было проведено исследование вибрационных процессов, возникающих в проводниках при воздействии на него электрических импульсов. Для этой цели использован стенд, структурная схема которого показана на рисунке 1.

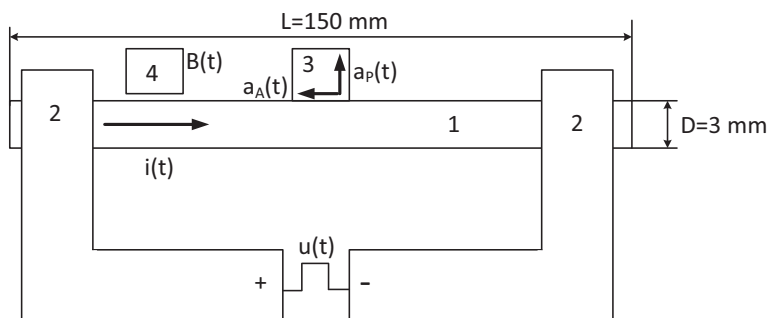


Рисунок 1 – Структурная схема эксперимента по определению вибрационного отклика в проводнике 1 на действие внешнего электрического импульса $u(t)$. Проводник закреплен между шинами 2. Контроль осевой вибрации $a_A(t)$ и поперечной вибрации $a_P(t)$ выполняется двухкомпонентным акселерометром 3. Контроль тока $i(t)$ по изменениям магнитной индукции $B(t)$ выполняется датчиком магнитного поля 4

Сигналы от датчиков вибрации и магнитного поля поступают на компьютерную систему для хранения и последующего анализа. Пример полученных сигналов представлен на рисунке 2. Сигналы ускорения в поперечном направлении A_z для диаметрально расположенных акселерометров показывают, что при воздействии электрического импульса проводник испытывает изгибные колебания в виде механических ударов противоположных направлений в моменты начала переднего и заднего фронтов электрического импульса. Синхронно записанные сигналы компонент пространственного вектора магнитной индукции B_y и B_z показывают, что в моменты времени начала электрического импульса величина тока еще очень мала. Представленные сигналы получены при пропускании электрического импульса длительностью 980 мкс, создающего среднюю величину плотности тока в проводнике порядка 400 A/mm^2 .

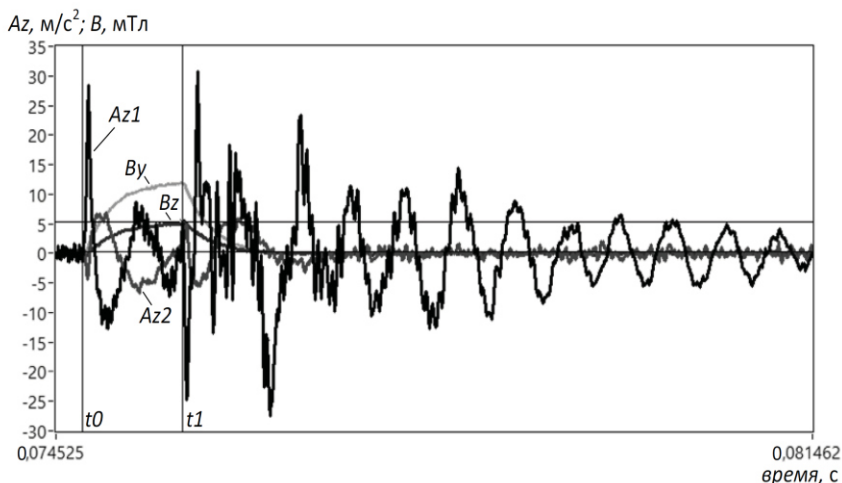


Рисунок 2 – Сигналы вибрационного ускорения и компонент магнитной индукции при пропускании прямоугольного электрического импульса через проводник из серебра диаметром 2 мм и длиной 150 мм

Ударные механические процессы вызывают последующие затухающие гармонические колебания в материале проводника.

Обсуждение результатов

Направление наблюдаемых вибраций в проводнике зависит от направления приложенного электрического поля [4]. На рисунке 3 приведен пример сигналов от датчиков магнитной индукции в увеличенном масштабе. В этом случае можно видеть, что в начальные моменты фронтов электрического импульса t_0 и t_1 наблюдаются всплески величины магнитного поля, близкие по времени с моментами возникновения ударных механических процессов в материале проводника. Последующее плавное увеличение магнитного поля связано с изменениями тока через проводник, определяемое процессами самоиндукции и скин-эффекта. Такие плавные изменения практически не влияют на происходящие вибрационные процессы в проводнике.

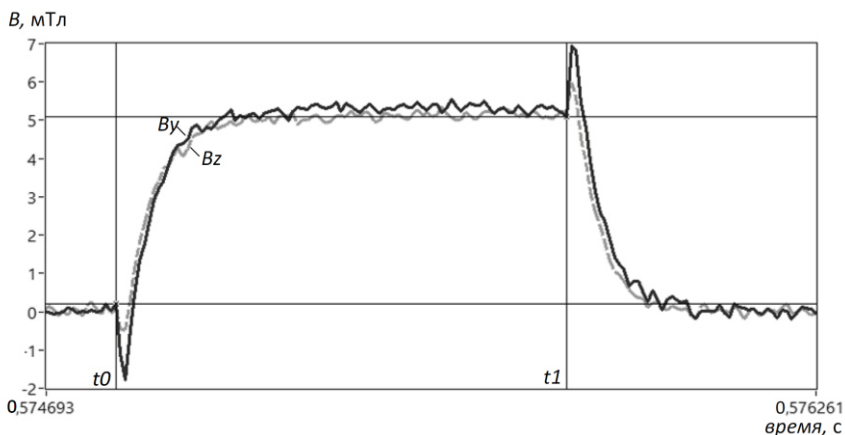


Рисунок 3 – Пример сигналов компонент магнитной индукции при действии электрического импульса на проводник из нержавеющей стали диаметром 3 мм и длиной 150 мм

Несмотря на продолжительную историю исследования вопроса о механизмах формирования механического отклика в материале проводника на действие электрического импульса [2,3,5], предлагаемые гипотезы имеют ряд противоречий данным экспериментов. Получаемые амплитудные оценки вибрационного отклика характеризуются линейной зависимостью от амплитудных оценок величины электрического импульса, как показано на рисунке 4.

Действие одиночных электрических импульсов не вызывает сколько-нибудь значительного нагревания проводника. Нагрев импульсом длительностью 1000 мкс с плотностью тока 1000 А/мм² вызывает нагревание на 1-5 градусов в зависимости от свойств материала проводника [6]. Это, как и линейный характер деформационного отклика показывает, что вклад тепловых эффектов действия электрического импульса незначителен.

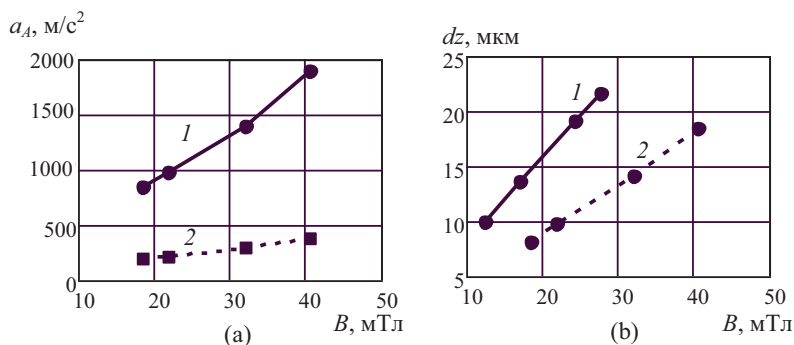


Рисунок 4 – Зависимость размаха вибрационных сигналов осевого ускорения (а) и поперечного перемещения (б) от размаха сигнала магнитной индукции B для проводников из серебра диаметром 2 мм - 1 и прямоугольного сечения площадью 2 мм² - 2

Действие последовательности импульсов на проводники [7] сопровождается формированием последовательности ударных механических импульсов, каждый из которых вызывает формирование затухающих гармонических колебаний. Такие гармонические вибрации могут создавать циклические нагрузки материала проводника. Периодические ударные механические нагрузки материала проводящих шин способствуют образованию дефектов. Гармонические колебания, возбуждаемые в материале, приводят к проявлению многоциклового и сверхмногоциклового усталости материала из-за понижения порога пластической деформации, наблюдаемого на $S-N$ диаграммах большинства конструкционных материалов, используемых в мощном энергетическом оборудовании.

Заключение

Рассмотренные особенности вибрационного отклика проводников на пропускание через них импульсных токов необходимо принимать во внимание при конструировании электропроводящих узлов мощного энергетического оборудования. Такие вибрации могут иметь значительную амплитуду вибрационного ускорения, которое сопровождается возникновением больших локальных механических напряжений.

Это может стать причиной усталостных нагрузок, наряду с типовыми вибрациями удвоенной промышленной частоты, проявление которых определяется эффектом близости.

Возбуждение нормированных по амплитуде высокочастотных вибраций одиночными электрическими импульсами и получаемый вибрационный отклик можно также использовать для диагностирования качества крепления электропроводящих элементов мощного электрооборудования вместо применения механических ударов для оценки собственной частоты таких элементов.

Литература:

1. *Скворцов О.Б.* Вибрационный мониторинг и прочность конструкционных элементов с учетом инерционных свойств материалов при воздействии широкополосной вибрации // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 6. – С. 1-17. – URL: <http://engjournal.ru/articles/1986/1986.pdf> (дата обращения 10.10.2021).

2. *Троицкий О.А., Сташенко В.И., Савенко В.С., Скворцов О.Б., Самуйлов С.Д., Правоторова Е.А., Терещук В.С.* Воздействия импульсами тока и СВЧ-излучением на конструкционные материалы. Электродинамические и электрохимические эффекты в проводниках. – М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2019. – 278 с.

3. *Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б., Савенко В.С., Самуйлов С.Д., Терещук В.С., Зайцев С.В., Иванов А.М.* Интенсивная пластическая деформация металла при токовых и СВЧ-воздействиях. Новые данные и закономерности. – М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2020. – 342 с.

4. *Сташенко В.И., Скворцов О.Б., Троицкий О.А.* Электродинамические процессы в проводниках при воздействии электрическими импульсами // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2021. – №1. – С. 39-47.
