

излучении могут приводить к резкому увеличению интенсивности излучения, что небезопасно для окружающей среды.

Литература

1. *Bochkarev G.S., Eremenko V.A., Cherkashin Yu.N.* Radio wave reflection from quasi-periodic disturbances of the ionospheric plasma // *Space Research*. – 1988. – Vol. 8. № 1. – P. 255-260.

2. *Бабич В.М., Булдырев А.В.* Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн. – М.: Наука, 1972. – 456 с.

3. *Buchal R.N., Keller J.B.* Boundary layer problems in diffraction theory // *Communication Pure and Applied Mathematics*. – 1960. – Vol.13. № 1. – P. 85-114.

4. *Еременко В.А.* О структуре поля скоростей в окрестности каустики // *Прикладная математика и механика*. – 2017. – Т. 41. №6. – С. 1126-1130.

5. *Bochkarev G.S., Krashennnikov I.V., Sales G.S.* The effects of powerful oblique radio transmission on the ionosphere on vertical sounding data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrrestrial Physics*. – 1997. – Vol. 59. № 18. – P. 2305-2311.

DOI: 10.25728/iccss.2023.22.54.047

Скворцов О.Б., Сташенко В.И.

Вибрационная прочность и усталость электромеханического оборудования

Аннотация: Рассмотрены причины вибрации проводящих элементов электрического энергетического оборудования. Отмечено, что кроме возбуждения вибрации подвижными элементами и магнитными полями от соседних проводников также возможна генерация колебаний проводящих элементов в собственном магнитном поле как в продольном, так и в поперечном направлениях. Процессы развития усталостных повреждений электропроводящих элементов связаны с их пониженным порогом пластической деформации и применением в современном

оборудовании электроимпульсного режима, создающего вибрацию, как на низких, так и на высоких частотах.

Ключевые слова: энергетика, надежность, вибрация, усталость, деформация, виброперегрузка

Используемые в энергетическом оборудовании в качестве проводящих материалов металлы выбирают по их электрическим характеристикам. В связи с этим прочность проводящих элементов в условиях вибрации оказывается пониженной по сравнению с несущими элементами из современных конструкционных материалов. При этом на проводящие элементы действуют часто даже большие вибрационные нагрузки, чем на другие элементы конструкции. Кроме того, проводящие элементы могут работать в условиях дополнительных внешних воздействий, снижающих их усталостную прочность. К таким условиям относятся повышенная температура при тепловыделении от проходящих токов, электрическая коррозия, а также фреттинг-коррозия в контактных соединениях. Вибрация проводниковых элементов может быть связана с возбуждением колебаний в механически связанных конструктивных узлах, таких как роторные агрегаты, зубчатые передачи, подшипники и т.п. Контроль такой вибрации – задача вибрационного мониторинга промышленного оборудования [1]. Оценка влияния вибрации на прочность и усталость конструкционных элементов проводится с учетом влияния многоциклового нагружения [2]. Влияние высокочастотных вибрационных воздействий в условиях статического и квазистатического нагружения является предметом ряда современных исследований [3, 4]. Воздействие на материалы динамических и статических нагрузок с аддитивными многочастотными компонентами связано с существенным снижением усталостной прочности [5, 6]. Такое явление проявляется при одновременном воздействии как низкочастотного, так и высокочастотного нагружения, когда низкочастотные вибрации вносят основной вклад в перемещение, а высокочастотные колебания определяют динамические силы в виде виброперегрузки. Переменные и, прежде всего импульсные электрические воздействия оказывают на усталостную прочность проводниковых материалов сходное воздействие, как это

наблюдается при электропластическом эффекте [7]. Перечисленные особенности определяют важность вибрационного контроля над проводниковыми элементами энергетического оборудования.

При определении причин вибрации, создаваемой электрическими процессами в проводниках, в первую очередь можно отметить проявление эффекта близости. Данный эффект связан с действием на проводник, по которому протекает электрический ток $I(t)$ магнитного поля другого проводника с током, как показано на рисунке 1. Сила Ампера, действующая на проводник в этом случае пропорциональна длине l проводника, произведению величины токов и обратно пропорциональна расстоянию между проводниками h . Квадратичная зависимость от токов приводит к формированию на переменном токе вибрации с удвоенной частотой относительно частоты переменного тока в проводниках, как показано на рисунке 2. При работе оборудования на промышленной частоте такая вибрация может быть доминирующей для различного вида обмоток и линий передачи электрической энергии.

Действующие на проводник механические силы зависят от тока через этот проводник и магнитного поля, в котором он находится. Если это магнитное поле другого проводника, то величина поля зависит от расстояния от него и увеличение этого расстояния обеспечивает снижение вибрации.

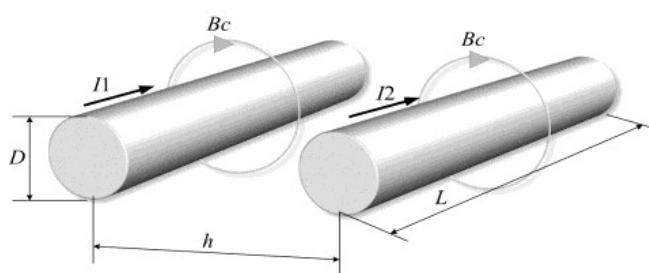


Рисунок 1 – Пример двух параллельных проводников с токами I_1 и I_2 расположенных на расстоянии h

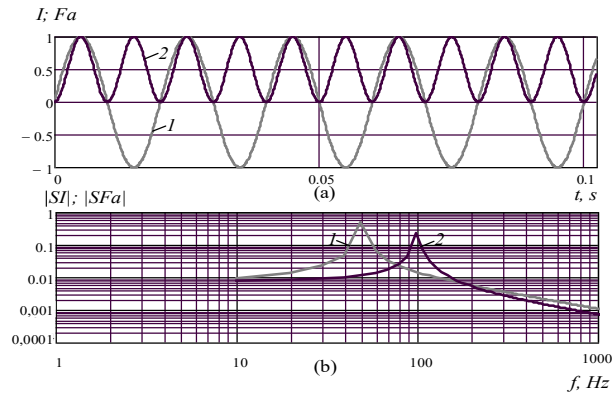


Рисунок 2 – Формирование для переменного тока – 1 промышленной частоты 50 Гц поперечной силы ампера F_A – 2 удвоенной частоты из-за действия эффекта близости

Количественная оценка силы Ампера представлена на рисунке 3.

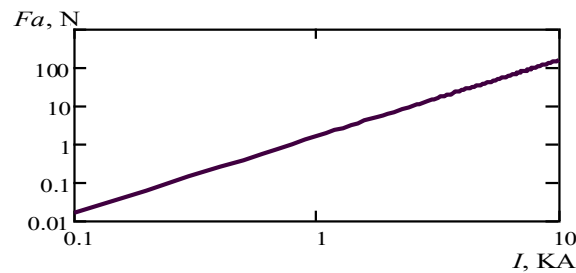


Рисунок 3 – Зависимость сила Ампера от величины тока в килоамперах для двух проводников длиной 160 мм расположенных на расстоянии 2 см

Проводник, по которому протекает ток, также взаимодействует с магнитным полем этого проводника. Магнитное поле такого прямого проводника максимально на его поверхности и механическое действие также максимально в поверхностном слое проводника. Такое действие проявляется как в виде пинч-эффекта, сжимающего проводник в радиальном направлении [9]. Действие электрических импульсов на одиночный проводник проявляется как скачки механического напряжения при испытании проводника на растяжение, как показано на рисунке 4. Такие результаты получены при исследовании эффекта электропластичности в проводниках. Несмотря на большой объем таких исследований для различных

металлов и сплавов общепризнанная теория электропластичности на настоящее время отсутствует.

Для понимания происходящих в деформируемом проводнике процессов при воздействии электрических импульсов на проводник, информативным является изучение вибрационного и акустического отклика на такие воздействия. Пример сигналов вибрационного отклика для такого эксперимента представлен на рисунке 5.

Виброакустический отклик в проводнике характеризуется затухающими колебаниями с частотами в десятки килогерц. В системах с широтно-импульсным режимом преобразования такие вибрации могут суммироваться с вибрацией проводников на промышленной и удвоенной промышленной частотах.

Вибрация одиночного проводника характеризуется близкими по величине вибрациями, как в продольном, так и в поперечном направлениях. Хотя амплитуда перемещений сравнительно невелика, соответствующие им виброперегрузки могут превышать сотни g (g – ускорение свободного падения). Форма вибрационного отклика показывает, что он включает процессы ударов на фронтах импульсов и затухающие гармонические колебания. Величина деформации линейно меняется во времени.

Рассмотренные особенности возникновения вибрации в проводящих элементах энергетического оборудования показывают, что для обеспечения контроля над усталостными повреждениями необходимо обеспечить мониторинг вибрации как по перемещениям (деформациям) так и по виброперегрузке (ускорениям) на проводниковых элементах. Такой мониторинг должен проводиться, как в продольном, так и в поперечном направлениях. При этом вибрации в поперечном направлении, как на низких, так и на высоких частотах характеризуются как изгибные формы.

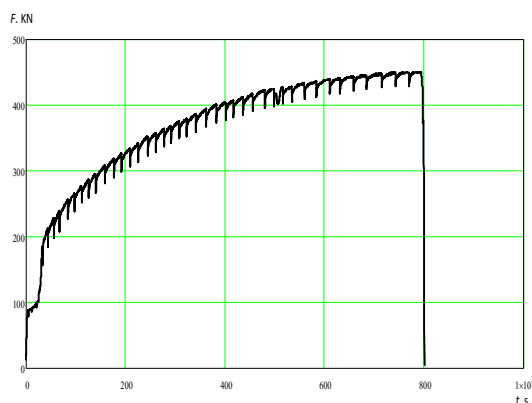


Рисунок 4 – Скачки деформирующего усилия при подаче электрических импульсов на диаграмме растяжения металлического образца

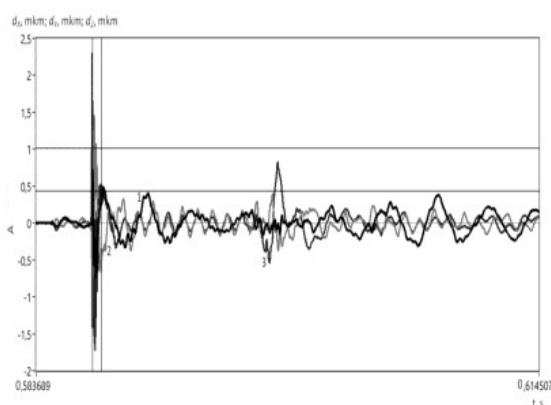


Рисунок 5 – Сигналы вибраций проводника в трех ортогональных направлениях при действии электрического импульса амплитудой 400 А и длительностью 150 мкс

Литература:

1. *Randall R.B.* Vibration-based condition monitoring. Industrial, aerospace and automotive applications. – John Wiley & Sons, Ltd., 2011. – 309 p.
2. *Bathias C., Pineau A.* Fatigue of materials and structures. – ISTE Ltd., London, UK, 2011. – 313 p.
3. *Zhou H., Cui H., Qin Q.H.* Influence of ultrasonic vibration on the plasticity of metals during compression process // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Volume 251. – P. 146-159.
4. *Yu C.X., Zhang L., Wang Z.L., Zhai Y.D., Shao C., Zhai J.Q., Guan Y.J., and Lin J.* Plastic deformation behavior of Ti45Nb in ultrasonic vibration-assisted compression / IOP Conference Series:

Materials Science and Engineering. – Volume 1270. The 19th International Conference on Metal Forming (MF 2022). 11/09/2022-14/09/2022 Online. – DOI:10.1088/1757-899X/1270/1/012087.

5. *Гаденин М.М.* Исследование повреждаемости и долговечности конструкций при одно- и двухчастотных режимах нагружения на основе деформационных и энергетических подходов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – №83(6). – С. 44-51.

6. *Махутов Н.А., Гаденин М.М.* Оценка ресурса при сочетании экстремальных малоцикловых и вибрационных воздействий / Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы. Труды четвертой Всероссийской научно-технической конференции. – М.: ИМАШ РАН, 2017. – С. 40-41.

7. *Троицкий О.А.* Электропластический эффект в металлах. – М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2021. – 467 с.
