



Electroplastic effect and interaction of an electrical impulse with a conductor

O. B. Skvortsov[†], V. I. Stashenko, O. A. Troitsky

[†]oleg.b.skvorcov@gmail.com

Mechanical Engineering Research Institute of the RAS (IMASH), Moscow, 101990, Russia

The additional effect of electric currents on metals in the process of their machining has found wide practical application. This combination is used in cutting, rolling, drawing, flattening, and it allows one to increase the ductility of the metal and improve its mechanical properties. The physics of the processes of electrical impact remains largely incomprehensible. A detailed analysis of the processes of forming a vibration response in conductors to the action of electrical impulses made it possible to exclude a number of physical effects previously proposed to explain the effect on mechanical processes in conductive materials during their mechanical processing. It has been experimentally proven that the dominant mechanism for the formation of a vibrational response to the effect of electrical impulses is the action of shock mechanical effects at the moments of the beginning of the leading and trailing edges of an electrical impulse. There is a linear dependence of the magnitude of the vibration response on the magnitude of the electrical impact. For conductors, bending modes of vibration are dominant and the dependence of the polarity of the vibrational response on the polarity of the electrical impact is characteristic. Vibrations arising in the process of exposure are not associated with a smooth increase in the electric current through the conductor, as well as with a constant level of current during the action of an electric pulse. Vibration frequencies are characteristic of the processes of formation of mechanical vibration of the conductor and are significantly lower than the vibration frequencies in the material of the conductor, determined by the vibroplastic effect. Analysis shows that it is possible to control such a tunable vibration action on the metal being processed. This multi-frequency treatment can be combined with additive heat treatment. The results obtained make it possible to substantiate the choice of the parameters of electrical impulses when processing metals using the electroplastic effect.

Keywords: electrical impulse, metals, vibration, strength, fatigue, plasticity.

УДК: 539.67+620.17+621.778.1+621

Электропластический эффект и взаимодействие электрического импульса с проводником

Скворцов О. Б.[†], Сташенко В. И., Троицкий О. А.

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, 101990, Россия

Дополнительное воздействие электрических токов на металлы в процессе их механической обработки получило ряд примеров применения. Такая комбинация применяется при резании, прокатке, волочении, плющении и позволяет увеличить пластичность металла и улучшить его механические свойства. Физика процессов электрического воздействия во многом остается непонятной. Детальный анализ процессов формирования вибрационного отклика в проводниках на действие электрических импульсов позволил исключить ряд физических эффектов, ранее предложенных для объяснения влияния на механические процессы в проводниковых материалах при их механической обработке. Экспериментально доказано, что доминирующим механизмом формирования вибрационного отклика на воздействие электрических импульсов является действие ударных механических воздействий в моменты начала переднего и заднего фронтов электрического импульса. Наблюдается линейная зависимость величины вибрационного отклика от величины электрического воздействия. Для проводников доминирующими являются изгибные формы колебаний и характерна зависимость полярности вибрационного отклика от полярности электрического воздействия. Возникающие в процессе воздействия вибрации не связаны с плавным нарастанием электрического тока через проводник, а также с постоянным уровнем тока во время действия электрического

импульса. Частоты вибраций характерны для процессов формирования механического колебания проводника и существенно ниже частот колебаний в материале проводника, определяемых вибропластическим эффектом, действие которого близко к действию электропластического эффекта. Анализ показывает, что возможно управлять таким настраиваемым вибрационным воздействием на обрабатываемый металл. Такое многочастотное воздействие может быть совмещено с аддитивной температурной обработкой. Полученные результаты позволяют обосновать выбор параметров электрических импульсов при обработке металлов с использованием электропластического эффекта.

Ключевые слова: электрический импульс, металлы, вибрация, прочность, усталость, пластичность.

1. Введение

Электропластический эффект проявляется как снижение сопротивлению деформации при механической обработке металлов в условиях дополнительного электрического воздействия на обрабатываемый материал. Данный эффект в виде увеличения пластичности обрабатываемого материала наблюдается при резке [1, 2], а также прокатке, волочении, плющении и штамповке [3–6] изделий из металлов. Практическое промышленное применение [3] электропластического эффекта находит в виде использования дополнительного воздействия электрических импульсов при длительности импульса $1-2.5 \cdot 10^{-4}$ сек и частоте импульсов f , которая связана со скоростью V движения заготовки и длиной L зоны пластической деформации. Допустимая скорость движения заготовки не более 1 м/с. Диапазон частот f от 20 до 100 Гц. Заметное влияние на пластичность заготовки наблюдается при амплитуде плотности тока через заготовку начиная от $10-30$ А/мм² [4]. При этом на действие электропластического эффекта могут оказывать дополнительное влияние другие физические воздействия, такие как температура, СВЧ излучение [3] или наличие постоянной составляющей электрического тока [5]. В соответствии с [6] оптимальные условия проявления электропластического эффекта при прокатке, волочении, плющении с ультразвуком, а также при штамповке соответствуют длительности импульса $\tau = 100 \div 150$ мкс и частоте f :

$$f = kV/\Delta l, \quad (1)$$

где k — целое положительное число; V — скорость движения заготовки; Δl — длина зоны деформации между валами.

Плотность тока для этого случая $350-1000$ А/см² [6]. При плющении с ультразвуком частота f равна или кратна частоте ультразвука $10-17$ КГц. При такой частоте обеспечить длительность импульса больше 10 мкс невозможно. Длина зоны деформации составляет обычно доли или единицы миллиметра. Ограничение на частоту импульсов определяется тем, что во время работы на обрабатываемый участок должен поступить, по крайней мере, один или два импульса тока. Импульс тока прикладывают таким образом, чтобы направление тока совпадало с направлением основной пластической деформации. Вдоль заготовки импульсы тока прикладывают для тепловой подготовки и усиления действия пинч-эффекта [6]. Для снижения деформационного упрочнения зону действия импульсного тока можно расположить вне зоны дейст-

вия деформации. Для предварительной деформации при плющении зону действия тока можно расположить перед зоной действия ультразвука в области деформации.

Для ослабления сопротивления деформации и ускорения релаксационных процессов на область деформации одновременно воздействуют импульсным током и СВЧ излучением. Плотность тока около 1000 А/мм², длительность электрического импульса порядка 10^{-4} секунды, а частота импульсов несколько сот герц. Предусмотрены кратковременные остановки заготовки для предотвращения упрочнения (усиление релаксации напряжений на 30%) с повышением действия электрических импульсов и СВЧ излучения для обеспечения разупрочнения. Это объясняется [3] влиянием спинового разупрочнения, пластифицирующим действием «электронного ветра» и пинч-эффектом, создающим вибрации. Действие электрических импульсов и СВЧ позволяет снизить сопротивление деформированию на $10-17.5\%$, в то время как действие только СВЧ позволяет снизить это сопротивление на $11.2-12.3\%$. Приведенные данные показывают, что дополнительное воздействие импульсным током может сопровождаться как увеличением, так и снижением сопротивления деформации. В ряде случаев это воздействие не оказывает заметного влияния на эту характеристику. Это показывает, что необходим анализ особенностей воздействия электрических импульсов на обрабатываемый металл для обоснованного выбора преимущественных режимов.

В [7] на основе экспериментальных данных показана возможность управления прочностью и пластичностью заготовок из металла выбором величины плотности тока промышленной частоты, используемого для нагрева заготовки.

Представленные примеры практического применения электропластического эффекта при обработке металлов показывают, что данный метод обеспечивает возможность получить практические преимущества. С другой стороны, критерии выбора характеристик технологического процесса, равно как и понимание происходящих при этом физических процессов, оказываются недостаточно обоснованными и понятными. Это ограничивает возможности широкого практического применения электропластического эффекта.

Дальнейшее распространение методов электрического воздействия на обрабатываемые материалы требует развития понимания происходящих при этом физических процессов. Также важны дополнительные, более детальные экспериментальные исследования, позволяющие прийти к непротиворечивому описанию про-

исходящих процессов. Такие экспериментальные исследования позволяют перейти к рациональным критериям выбора параметров дополнительных электрических воздействий при практическом применении.

2. Постановка задач исследования

Обрабатываемая заготовка подвергается силовому воздействию со стороны инструмента. Действующие при этом усилия можно рассматривать как статические. Кроме этого на заготовку действуют электрические импульсы от генератора. Действие этих импульсов сопровождается возбуждением в заготовке механических вибраций. Типовая конструкция установки для обработки металлического образца давлением с дополнительным воздействием электрических импульсов представлена на Рис. S1 (дополнительный материал).

Ударные и вибрационные процессы, а также их воздействие на механические свойства обрабатываемого материала наблюдаются в случае воздействия электрического импульса на отдельный, удаленный от других объектов проводник. Это позволяет провести исследование процессов в проводнике при условиях исключая влияние других физических объектов.

Оценить силы, действующие при пропускании электрического импульса на проводник, можно по сигналам от установленного на проводник датчика вибрации — акселерометра. Контроль за протекающим по проводнику током выполнялся бесконтактным датчиком магнитной индукции, который установлен около проводника.

3. Результаты и обсуждение

Синхронная запись сигналов вибрации с одного или двух акселерометров, а также сигналов с датчиков магнитной индукции представлена на Рис. 1. Из данных зависимостей следует, что после начала действия электрического импульса от генератора напряжения вокруг образца наблюдается увеличение магнитного

поля. После окончания электрического импульса происходит снижение величины магнитного поля. Эти изменения соответствуют изменению тока через проводник с учетом влияния скин-эффекта и самоиндукции проводника. В моменты начала переднего t_0 и заднего t_1 фронтов электрического импульса наблюдаются значительные по амплитуде всплески действующего ударного ускорения, имеющие противоположные знаки.

Действие ударных импульсов ускорения оканчивается практически еще до сколько-нибудь заметного изменения тока через проводник. После этого в результате возникающих от действия ускорения во время ударного импульса деформаций в проводнике возникают затухающие гармонические процессы с частотами близкими к собственным частотам образца. Частота этих колебаний, распространяющихся по образцу, зависит от материала, условий крепления, а также геометрических размеров и формы образца.

Гармонические колебания, генерируемые ударными импульсами на переднем и заднем фронтах, могут создавать интерференцию. В зависимости от свойств образца и длительности импульса, интерференция сопровождается увеличением или снижением результирующих колебаний. Этим можно объяснить наиболее сильное проявление электропластического эффекта в диапазоне длительностей электрического импульса 100–200 мкс. Похожий эффект может быть связан с интерференцией колебаний, создаваемых в момент начала заднего фронта текущего электрического импульса и в момент начала следующего электрического импульса.

Частоты таких колебаний на несколько порядков ниже частот электромагнитных резонансных колебаний для образца, имеющего собственную индуктивность и емкость, если рассматривать его эквивалентную электрическую схему. Еще одна возможная причина проявления колебательных процессов — влияние вибропластического эффекта [10–13]. Проявление вибропластического эффекта связано с влиянием дина-

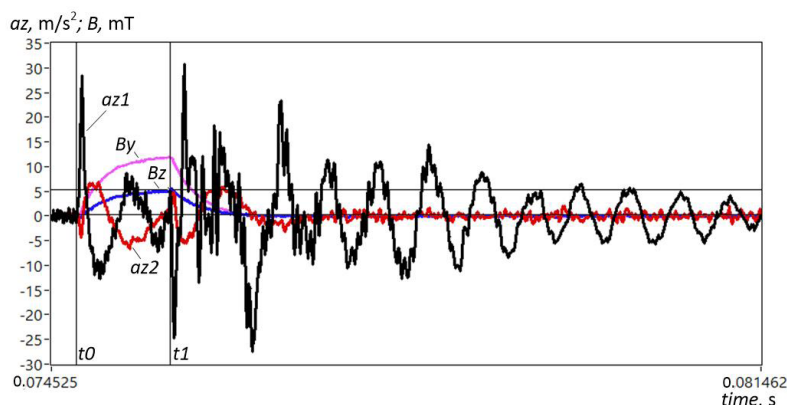


Рис. 1. (Color online) Сигналы ускорения $az1$ и $az2$ поперечной вибрации в точках симметричных относительно оси проводника диаметром 2 мм из серебра. B_y и B_z — сигналы магнитной индукции от датчиков магнитного поля с ортогональными осями чувствительности, лежащими в плоскости перпендикулярной оси проводника. Момент t_0 начала переднего фронта электрического импульса, момент t_1 .

Fig. 1. (Color online) Acceleration signals $az1$ and $az2$ of transverse vibration at points symmetrical with respect to the axis of a conductor with a diameter of 2 mm made of silver. B_y and B_z — signals of magnetic induction from magnetic field sensors with orthogonal axes of sensitivity, lying in the plane perpendicular to the axis of the conductor. The moment t_0 of the beginning of the leading edge of the electric pulse, the moment t_1 .

мической вязкости в материале образца и сдвиговыми деформациями частиц материала. Для таких процессов характерно наличие колебательных перемещений и собственных резонансных частот. При вибропластической деформации собственная частота F_{vp} определяется суперпозицией волновых деформаций сдвига в материалах [11,12]:

$$F_{vp} = \frac{G}{\eta}, \quad (2)$$

где G — модуль сдвига; η — коэффициент динамической вязкости (внутреннего трения).

Результаты оценки собственной частоты колебаний представлены в Табл. S1 (дополнительный материал). Данные о коэффициентах динамической вязкости (внутреннего трения) для различных материалов взяты из [13]. Полученные оценки отличаются от частот наблюдаемых затухающих вибрационных процессов в исследуемых образцах более чем на порядок.

Анализ получаемых зависимостей размаха ускорений от размаха оценки величины электрического сигнала для различных материалов показывает, что эта зависимость близка к линейной. Этот вывод соответствует как вибрации в осевом направлении, так и поперечной вибрации с доминирующей изгибной формой. Примеры таких зависимостей показаны на Рис. 2 для проводников из серебра с круглым и прямоугольным поперечными сечениями.

Аналогичные зависимости для проводников из нержавеющей стали представлены на Рис. 3. В этом случае характер зависимости не изменяется, но для размаха величины ускорения и величины тока характерны более низкие значения.

Наблюдаемые быстрые изменения механических ускорений позволяют оценивать изменения динамических сил, действующих в образцах при воздействии электрических импульсов. Для сигналов поперечного перемещения dz (изгибной деформации) результат представлен на Рис. S2 (дополнительный материал).

Зависимость перемещения от амплитуды электрического импульса является линейной, что подтверждается Рис. S3 (дополнительный материал).

Полученные результаты позволяют оценить обоснованность некоторых гипотез возникновения электропластического эффекта. Вопросы, касающиеся физической природы влияния электрических импульсов на механические свойства и процессы в проводниках, поставлены в ряде работ [14,15], где отмечено, что до настоящего времени отсутствует полностью непротиворечивое их описание. В работе [16] представлен обзор возможных механизмов электропластического эффекта. Следует отметить, что большая часть таких механизмов предполагает наличие нелинейной (квадратичной) зависимости величины действующих сил от величины протекающего тока. Кроме того, такие механизмы предполагают отсутствие зависимости знака отклика от полярности приложенного электрического импульса. К таким механизмам относятся скин- и пинч-эффекты, а также эффекты связанные с тепловым действием тока. Представленные результаты экспери-

ментальных исследований показывают несоответствие таким предположениям. Среди описанных в [16] механизмов действия электрического импульса на проводник представлены также процессы, связанные с взаимодействием потока движущихся электронов с кристаллической решеткой и имеющимися дислокациями. Полярность механического отклика на электрические воздействия в этом случае зависит от полярности приложенного электрического импульса, что и наблюдается при экспериментальных исследованиях. Величина механического отклика при этом должна быть пропорциональна величине плотности тока через проводник. Анализ представленных результатов временных зависимостей величин измеренных ускорений на поверхности проводника показывает, что последний испытывает ударные механические нагрузки в то время как величина плотности тока через проводник минимальна. При дальнейшем увеличении плотности тока через проводник какое-либо силовое действие на материал проводника практически незаметно.

Поскольку влияние величины плотности тока на происходящие процессы генерации вибрационного от-

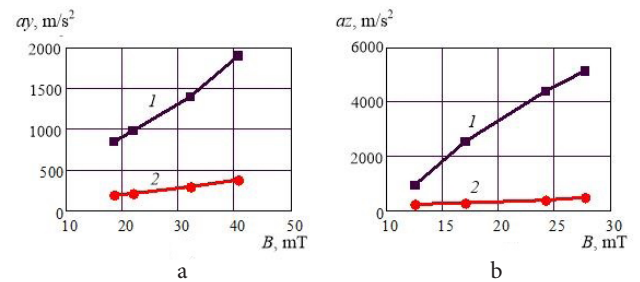


Рис. 2. (Color online) Зависимости размаха продольного ускорения (a) и поперечного (b) ускорения от размаха магнитной индукции: 1 — для проводника из серебра круглого сечения диаметром 2 мм и 2 — прямоугольного сечения площадью 2 мм².

Fig. 2. (Color online) Dependences of the range of longitudinal acceleration (a) and transverse (b) acceleration on the range of magnetic induction: 1 — for a conductor made of silver with a circular cross-section with a diameter of 2 mm and 2 — a rectangular cross-section with an area of 2 mm².

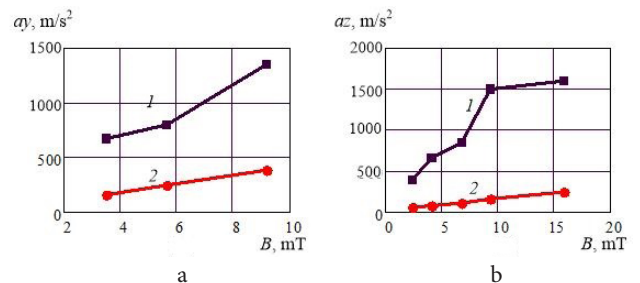


Рис. 3. (Color online) Зависимости размаха продольного ускорения (a) и поперечного (b) ускорения от размаха магнитной индукции: 1 — для проводника из серебра круглого сечения диаметром 2 мм и 2 — прямоугольного сечения площадью 2 мм².

Fig. 3. (Color online) Dependences of the range of longitudinal acceleration (a) and lateral (b) acceleration on the range of magnetic induction: 1 — for a conductor made of silver with a circular cross-section with a diameter of 2 mm and 2 — a rectangular cross-section with an area of 2 mm².

клика незначительно, следует упомянуть механизмы взаимодействия электромагнитного поля с материалом проводника связанные с прямым влиянием электрических полей действующих на проводник. В моменты изменения внешнего электрического поля происходит перераспределение заряженных частиц в проводнике [17] и формируются волновые процессы распределения зарядов в материале [18]. Особенностью таких процессов является их высокая скорость и связь с моментами начала и прекращения внешнего электрического импульса.

Процессы взаимодействия внешнего электрического импульса на проводник и формируемого механического отклика взаимосвязаны только во время короткого интервала времени вначале переднего и заднего фронтов электрического импульса, а в последующем протекают независимо. Для понимания механизма электропластического эффекта можно рассмотреть следующую гипотезу. Возбуждаемые при воздействии электрического импульса ударные нагрузки порождают затухающие вибрации, которые действуют как аддитивные высокочастотные циклические нагружения материала. Несмотря на малую величину деформаций и их локальный характер, действие таких высокочастотных аддитивных нагружений сопровождается значительными динамическими силовыми воздействиями, которые приводят к снижению циклической прочности материала [19]. В условиях деформирования материала статическими или медленно меняющимися воздействиями такое локальное понижение прочности может быть причиной снижения сопротивления деформации.

4. Выводы

Полученные результаты показывают, что действие электрических импульсов на проводники сопровождается формированием механического отклика в виде ударных нагружающих динамических сил в моменты соответствующие началу переднего и заднего фронтов электрического импульса с последующим независимым развитием электрических процессов увеличения тока через проводник и формированием затухающего вибрационного процесса. Зависящая от полярности приложенного электрического импульса величина механического отклика, линейно зависящая от амплитуды электрического импульса, позволяет существенно сократить область возможных доминирующих механизмов формирования электропластического эффекта, проявляющегося при практически полном отсутствии тока через проводник. Рассмотренные особенности могут служить основой для понимания процессов обработки металлов с применением электропластического эффекта и выбора параметров используемого при этом технологии.

Дополнительный материал / Supplementary material. Электронная версия статьи содержит дополнительный материал, доступный безвозмездно на сайте журнала (lettersonmaterials.com). / The online version of this paper contains supplementary material available free of charge at the journal's Web site (lettersonmaterials.com).

Литература/References

1. V.N. Poduraev. Cutting with vibrations. Moscow, Mashinostroyeniye (1979) 350 p. (in Russian) [В.Н. Подураев Обработка резанием с вибрациями. Москва, Машиностроение (1979) 350 с.]
2. Patent RF № 2426629, 2011. (in Russian) [Патент РФ № 2426629, 2011.]
3. Patent RF № 2585920, 2016. (in Russian) [Патент РФ № 2585920, 2016.]
4. Patent RF № 2544721, 2015. (in Russian) [Патент РФ № 2544721, 2015.]
5. Patent RF № 2624877, 2017. (in Russian) [Патент РФ № 2624877, 2017.]
6. Patent RF № 2321469, 2008. (in Russian) [Патент РФ № 2321469, 2008.]
7. Patent RF № 2044781, 1995. (in Russian) [Патент РФ № 2044781, 1995.]
8. O. A. Troitsky, V. I. Stashenko, V. S. Savenko, O. B. Skvortsov, S. D. Samuylov, E. A. Pravotorova, V. S. Tereshchuk. Impact of current pulses and microwave studies on structural materials. Electrodynamics and electrochemical effects in conductors. Moscow, Kim L. A. (2019) 278 p. (in Russian) [О.А. Троицкий, В.И. Сташенко, В.С. Савенко, О.Б. Скворцов, С.Д. Самуйлов, Е.А. Правоторова, В.С. Терещук. Воздействия импульсами тока и СВЧ-изучением на конструкционные материалы. Электродинамические и электрохимические эффекты в проводниках. Москва, Ким Л.А. (2019) 278 с.]
9. O. A. Troitsky, V. I. Stashenko, O. B. Skvortsov, V. S. Savenko, S. D. Samuilov, V. S. Tereshchuk, S. V. Zaitsev, A. M. Ivanov. Intense plastic deformation of metal under current and microwave impacts. New data and patterns. Moscow, Kim L. A. (2020) 342 p. (in Russian) [О.А. Троицкий, В.И. Сташенко, О.Б. Скворцов, В.С. Савенко, С.Д. Самуйлов, В.С. Терещук, С.В. Зайцев, А.М. Иванов. Интенсивная пластическая деформация металла при токовых и СВЧ-воздействиях. Новые данные и закономерности. Москва, Ким Л.А. (2020) 342 с.]
10. D. N. Lyubimov, V. A. Ryzhikov. Physicochemical processes during friction: Textbook. Allowance. Novocherkassk, YURSTU (2003) 142 p. (in Russian) [Д.Н. Любимов, В.А. Рыжиков. Физико-химические процессы при трении. Новочеркасск, ЮРГТУ (2003) 142 с.]
11. E. V. Kuznetsov. Fundamental and applied problems of technology and technology. 3 (293), 38 (2012). (in Russian) [Е.В. Кузнецов Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 3 (293), 38 (2012).]
12. V. N. Morozenko, E. V. Kuznetsov. Izvestija RAN. Metally. 3, 104 (2000).
13. L. B. Pervukhin, S. V. Serikov, I. K. Ustinov, O. D. Churkin. Vestnik MGTU. Ser. Mechanical Engineering, 184 (2011). (in Russian) [Л.Б. Первухин, С.В. Сериков, И.К. Устинов, О.Д. Чуркин. Вестник МГТУ Сер. «Машиностроение», 184 (2011).]
14. I. L. Bataronov. Mechanisms of the influence of the electric field and electric current on the plastic deformation of

- metals. Dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Voronezh, VGTU (2000) 280 p. (in Russian) [И.Л. Батаронов. Механизмы влияния электрического поля и электрического тока на пластическую деформацию металлов. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Воронеж, ВГТУ (2000) 280 с.]
15. A.L. Surkaev. Investigation of high-energy impulse processes in condensed media based on the electrical explosion of conductors. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Volgograd (2017) 279 p. (in Russian) [А.Л. Суркаев Исследование высокоэнергетических импульсных процессов в конденсированных средах на основе электрического взрыва проводников. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Волгоград (2017) 279 с.]
16. L. Guan, G. Tang, P.K. Chu. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. J. Mater. Res. 25 (7), 1216 (2010).
17. E.M. Purcell, D.J. Morin. Electricity and magnetism. Harvard, Cambridge University Press (2013) 868 p. [Crossref](#)
18. K.F. Sergeychev, D.M. Karfidov, M.V. Shepovarov. Journal of Radioelectronics. 7, 12 (2015). (in Russian) [К.Ф. Сергейчев, Д.М. Карфидов, М.В. Шеповалов. Журнал радиоэлектроники. 7, 12 (2015).]
19. O.B. Skvortsov. Journal: Science and Innovation. 6, 17 (2020). (in Russian) [О.Б. Скворцов. Инженерный журнал: наука и инновации. 6, 17 (2020).] [Crossref](#)