

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА СВЯЗИ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА В ИНДУКЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Чаплыгин Е. А.¹, Шиндерук С. А.¹, Гаврилова Т. В.¹, Лебедь А. Д.¹
¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. С привлечением характеристик случайных величин выполнена вероятностная оценка отклонений от прямо пропорциональной связи между амплитудами экспоненциально затухающих временных зависимостей напряжения и тока в измерениях характеристик магнитно-импульсной обработки металлов. Полученные результаты позволяют исследовать электромагнитные процессы без использования аналоговых или численных методов интегрирования. **Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка металлов, электрические измерения, пояс Роговского, вероятностные характеристики, гармонические сигналы.

Введение

Как следует из обзора авторов работ [1-4], магнитно-импульсные методы являются базовой основой современных технологий штамповки изделий из алюминиевых сплавов, обладающих высокой прочностью и малым весом. В этой связи практическую значимость приобретают разработки инструментов силового воздействия, основанных на фундаментальных положениях электродинамики сплошных сред. С физической точки зрения ключевым вопросом создания инструментов указанного принципа действия является вопрос возбуждения и, соответственно, измерения токов в проводящих объектах обработки. Без преувеличения значимости, следует подчеркнуть, что обеспечение заданного уровня строгости измерений, как условия эффективного выполнения производственной задачи, приобретает актуальность в разработках любого типа инструментов магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ или EMF – Electromagnetic Metal Forming в западной терминологии).

Анализ публикаций

Поскольку темой предлагаемой статьи является измерение токов в МИОМ, литературный обзор следует начать с практических приложений силового взаимодействия магнитных полей с проводящими средами [5, 6]. Так, авторами публикации [5, 7, 8] описаны магнитно-импульсные методы устранения вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов. Закономерности взаимодействия импульсных электромагнитных полей с поверхностями металлических образцов и возможная практика их использования представлена в

публикации [6]. Предложение использовать линейные инструменты магнитно-импульсного притяжения заданных участков листовых металлов для удаления вмятин в кузовных покрытиях автомобильных кузовов сформулировано авторами [9]. Принцип действия инструментов такого типа основан на взаимном притяжении параллельных проводников с однонаправленными токами (закон Ампера) [10]. Особенностью практической реализации данного принципа действия является непосредственное контактное подключение проводников к высоковольтному источнику мощности. Амплитуды электродинамических усилий, возбуждаемых в рабочей зоне линейного инструмента притяжения (пространство между контактами подключения), зависят от пространственно-временных распределений и степени поперечной концентрации протекающих токов [11]. Данный фактор устанавливает значимость достоверности в измерениях их характеристик, которые обычно осуществляются с помощью датчиков индукционного типа, например, пояса Роговского, катушечных зондов и др. [12]. Строгая связь между напряжением и током в подобных измерителях определяется операторами интегро-дифференциального исчисления. Для восстановления амплитудно-временной зависимости тока по напряжению, индуцированному в обмотке датчика, необходимо либо аналоговое, либо численное интегрирование, что вносит свой вклад в искажение действительных результатов измерений [13].

Цель и постановка задачи

Целью работы является вероятностная оценка отклонений от прямо пропорциональ-

ной связи между амплитудами экспоненциально затухающих временных зависимостей напряжения и тока в измерениях характеристик магнитно-импульсной обработки металлов с использованием датчика индукционного типа – пояса Роговского.

С практической точки зрения, проблема состоит в выборе методики, которая должна обеспечивать допустимую величину погрешности проводимых измерений при достаточной простоте и надёжности её практической реализации. Речь идёт о возможной пропорциональности амплитуд напряжений, снимаемых с обмотки датчика, и измеряемых токов, а также условиях, когда отмеченная связь может иметь место. Не претендуя на общность решения задачи, и базируясь на опытных данных, предлагаем реализовать «упрощённую», но достаточно достоверную методику измерений.

Рассмотрим экспоненциально затухающие амплитудно-временные зависимости электромагнитных процессов, характерные для магнитно-импульсной обработки металлов (разряд ёмкости на индуктивную нагрузку). Очевидно, что установить отклонения от прямо пропорциональной связи между амплитудами напряжения датчика и измеряемого тока можно с привлечением понятий из теории вероятностей. Тогда следует принять, что отмеченное отклонение есть случайная величина, основными характеристиками которой являются математическое ожидание (среднее значение) и среднеквадратическое отклонение, определяющее разброс возможных значений около среднего [14].

В соответствии с поставленной задачей рассмотрим расчетные соотношения и приведем численные оценки фазовых функций тока и напряжения.

Расчётные соотношения

Пусть фазовая (временная) зависимость тока – $J(\varphi)$ описывается экспоненциально затухающей синусоидой с осцилляциями относительно нуля. Поскольку речь идёт об оценке расхождений в амплитудах, введём в её выражение знаки модуля и запишем фазовую функцию в виде [1]:

$$|J(\varphi)| = e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \cdot |\sin \varphi|, \quad (1)$$

где δ_0 – относительный коэффициент затухания;
 φ – фаза сигнала, $\varphi = \omega \cdot t$,
 ω – круговая частота;
 t – время.

Отметим, что величина относительного коэффициента затухания – δ_0 определяет собственно временную форму сигнала. Последняя трансформируется от осциллирующей гармонической зависимости до униполярной убывающей экспоненты.

Соответствующая нормированная фазовая функция напряжения, как производная модуля фазовой функции тока, из выражения (1) запишется в виде:

$$|U(\varphi)| = \left| \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} \right| = e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \times (\cos \varphi - \delta_0 \cdot \sin \varphi). \quad (2)$$

Выпишем формулы для расчёта вероятностных характеристик величин (1) и (2) на одном периоде измеряемого сигнала – T [14].

Среднее значение амплитуд тока – $|J(\varphi)|$ и соответствующее среднеквадратическое отклонение $-\Delta J(\varphi)$ представим следующими зависимостями [9]:

$$\overline{|J(\varphi)|} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \cdot |\sin \varphi|) \cdot d\varphi; \quad (3)$$

$$\Delta_J = \sqrt{(|J(\varphi)| - \overline{|J(\varphi)|})^2}. \quad (4)$$

Аналогичным образом запишем среднее значение амплитуд напряжения – $|U(\varphi)|$ и соответствующее среднеквадратическое отклонение – $\Delta U(\varphi)$:

$$\overline{|U(\varphi)|} = \frac{1}{T} \times \int_0^T (e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \cdot |\cos \varphi - \delta_0 \cdot \sin \varphi|) d\varphi; \quad (5)$$

$$\Delta_U = \sqrt{(|U(\varphi)| - \overline{|U(\varphi)|})^2}. \quad (6)$$

Введём характеристики, определяющие (в процентах) расхождения между средними значениями и среднеквадратическими отклонениями сравниваемых величин:

а) расхождения между средними значениями амплитуд токов и напряжений

$$\alpha = \left| \frac{\overline{|J(\varphi)|} - \overline{|U(\varphi)|}}{\overline{|J(\varphi)|}} \right| \cdot 100\%; \quad (7)$$

б) расхождения между среднеквадратическими отклонениями от средних значений согласно формулам (4) и (6)

$$\beta = \left| \frac{|\Delta J(\varphi)| - |\Delta U(\varphi)|}{|\Delta J(\varphi)|} \right| \cdot 100\%. \quad (8)$$

Численные оценки

Оценивая погрешности в использовании амплитуд временной функции напряжений для расчетов амплитуд временной функции токов, начнем с «предельных» ситуаций, в которых эти погрешности могут принимать наибольшие или наименьшие значения.

Из феноменологических соображений ясно, что данные ситуации устанавливаются величиной относительного коэффициента затухания δ_0 .

Так, в случае, когда процесс описывается незатухающей гармонической зависимостью и δ_0 , имеет место строгая пропорциональность амплитуд производной и её первообразной,

что оценивается нулевым значением погрешности. Действительно, амплитудные значения гармонических функций одинаковы по модулю и не превышают единицы [15].

В случае, когда процесс описывается аperiodической функцией и $\delta_0 \rightarrow 1$, пропорциональность амплитуд производной и её первообразной нарушается с намного большей погрешностью. Очевидно, что производная линейной комбинации экспонент, формально соответствующей аperiodическому сигналу, есть знакопеременная функция. Различие знаков в разные промежутки времени определяется тем, что аperiodический сигнал имеет участки возрастания и участки убывания, где производная должна иметь разные знаки [14, 15].

Численные оценки отмеченных «предельных» ситуаций были выполнены с помощью математических программ из стандартного пакета «Wolfram Mathematica» [15]. Результаты расчётов, оформленные в виде нормированных на максимум амплитудно-фазовых зависимостей, проиллюстрированы кривыми на рис. 1.

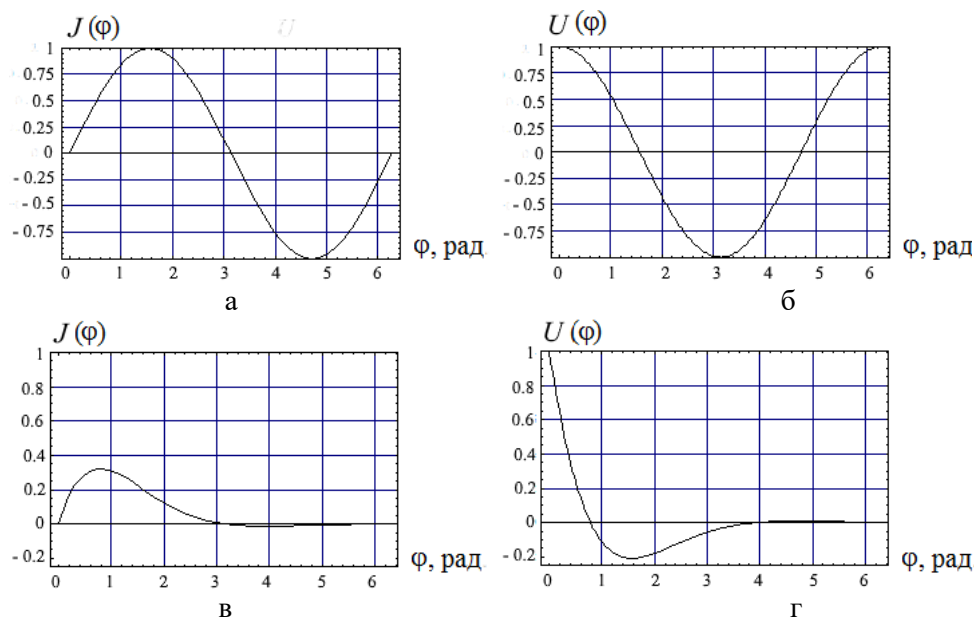


Рис. 1. Фазовые функции в зависимости от величины относительного коэффициента затухания δ_0 : а – ток при $\delta_0 = 0$; б – напряжение при $\delta_0 = 0$; в – ток при $\delta_0 = 1$; г – напряжение при $\delta_0 = 1$

Исходя из анализа «предельных» ситуаций, можно сделать вывод о том, что допустимая погрешность замены амплитуд временных функций токов соответствующими амплитудами временных функций напряжений должна определяться величинами относительного коэффициента затухания в диапазоне – $\delta \in [0, 1]$.

Численные оценки для интервала изменения фазы, равного одному периоду исследуе-

мого сигнала – $\varphi \in [0, 2\pi]$ проведём для коэффициентов затухания в «предельных» ситуациях – $\delta_0 = 0, \delta_0 = 1, 0$ и типичных для МИОМ величин – $\delta \in [0, 1; 0, 3]$.

Ниже представлены графические иллюстрации расчёта фазовых зависимостей где ток – первообразная, а напряжение – производная рис. 2-5.

Результаты вычислений соответствия сравниваемых сигналов сведены в табл. 1 и табл. 2.

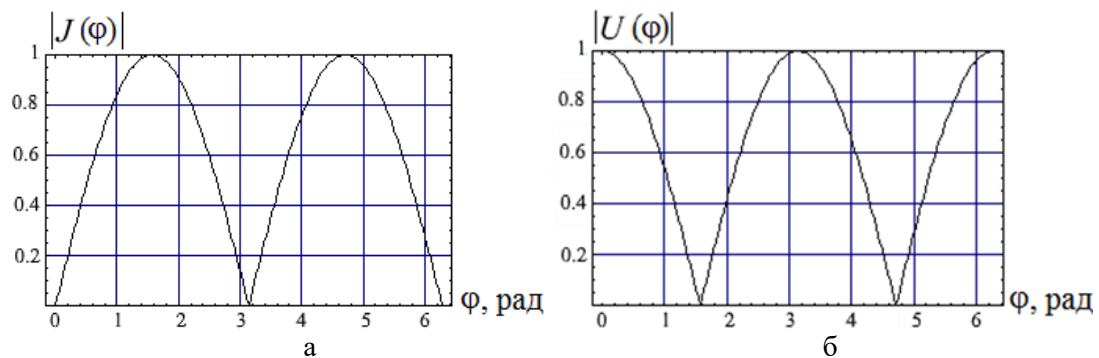


Рис. 2. Фазовые распределения модулей временных функций при $\delta_0 = 0$ (строго гармонические сигналы): а – ток; б – напряжение

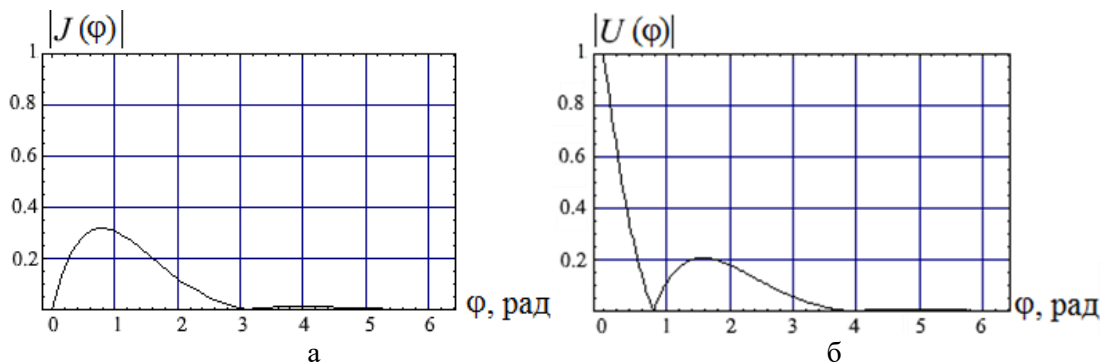


Рис. 3. Фазовые распределения модулей временных функций при $\delta_0 = 1,0$ (апериодические сигналы): а – ток; б – напряжение

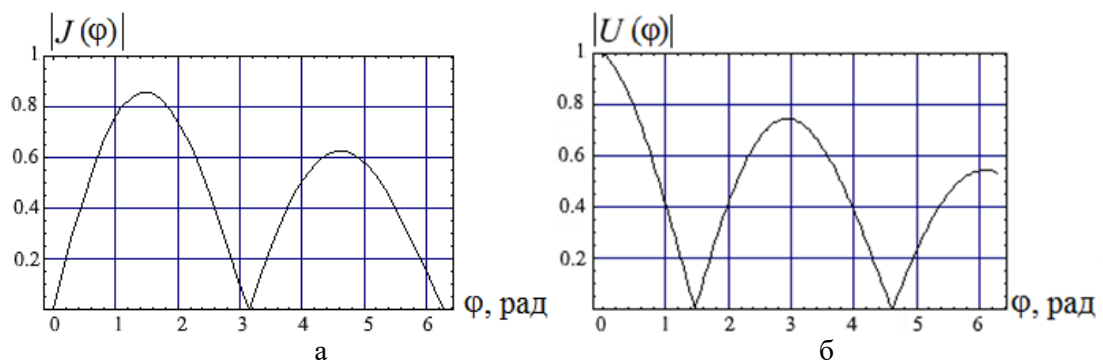


Рис. 4. Фазовые распределения модулей временных функций при $\delta_0 = 0,1$ (апериодические сигналы): а – ток; б – напряжение

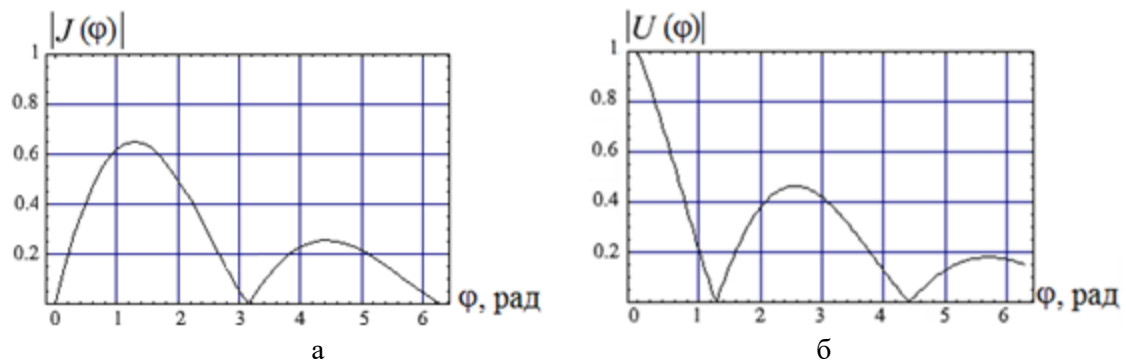


Рис. 5. Фазовые распределения модулей временных функций при $\delta_0 = 0,3$ (апериодические сигналы): а – ток; б – напряжение

Таблица 1 – Численные оценки для средних величин

№ п/п	Временная форма исследуемого сигнала, δ_0	$ J(\varphi) $	$ U(\varphi) $	Расхождения средних величин, α , %
1	0,0	0,636	0,636	0,0
2	1,0	0,086	0,107	23,6
3	0,1	0,473	0,471	0,27
4	0,3	0,288	0,281	2,36

Таблица 2 – Численные оценки для среднеквадратических отклонений

№ п/п	Временная форма исследуемого сигнала, δ_0	ΔJ	ΔU	Расхождения среднеквадратических отклонений, β , %
1	0,0	0,307	0,307	0,0
2	1,0	0,111	0,168	51,18
3	0,1	0,243	0,247	1,37
4	0,3	0,198	0,215	8,4

Прокомментируем основное в полученных результатах вычислений.

1) Расхождения сравниваемых величин зависят от значения относительного коэффициента затухания δ_0 .

2) Для строго гармонических процессов, когда $\delta_0 = 0,0$, средние амплитуды и среднеквадратические отклонения совпадают между собой. При приближении временной функции тока к форме апериодического сигнала, когда $\delta_0 \rightarrow 1,0$, расхождения средних амплитуд и среднеквадратических отклонений между амплитудами тока и напряжения существенно возрастают. Отклонения между первыми достигает $\sim 23\%$, между вторыми $\sim 51\%$.

В интервале изменений относительного коэффициента затухания $\delta \in [0,1; 0,3]$, характерного для процессов в магнитно-импульсной обработке металлов, расхождения между средними величинами амплитуд тока и напряжения не превышают $\sim 2,36\%$. Относительная разность между соответствующими отклонениями от средних значений составляет $\sim 8,4\%$. Очевидно, что в указанном диапазоне характеристик временных функций тока имеет место вполне допустимое соответствие его амплитуд и амплитуд напряжения, равного производной его временной функции.

Выводы

Проведена вероятностная оценка отклонений от прямо пропорциональной связи между амплитудами экспоненциально затухающих временных зависимостей напряжения и тока в измерениях характеристик магнитно-импульсной обработки металлов с использованием датчика индукционного типа – пояса Роговского.

Показано, что расхождения между амплитудами сравниваемых величин тока и напряжения определяются значениями относительного декремента затухания измеряемого сигнала.

Получено, что для гармонических временных функций тока с относительным коэффициентом затухания, не превышающим $\sim 0,3$, пропорциональность между относительными амплитудами индуктивно связанных тока и напряжения сохраняется с точностью, не ниже $\sim 10\%$, допустимой при проведении реальных измерений и составляющей, как правило, $\sim 10...15\%$ [13, 14].

Выполненный численный анализ позволяет обосновать возможность использовать вместо амплитуд временной функции токов соответствующие аналоги для напряжений в задачах экспериментального исследования электромагнитных процессов, описание которых осуществляется с помощью относительных величин (например, индикация индуцированных токов и др.). Таким образом, появляется возможность исследовать электромагнитные процессы с помощью нормированных характеристик без использования аналоговых или численных методов интегрирования сигналов, снимаемых с пояса Роговского.

Литература

1. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2016. № 5. С. 35–39.
2. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Material Process Technology*. 2011. № 211. P. 787–829.
3. Imbert J., Worswick M. Reduction of a pre-formed radius in aluminum sheet using electromagnetic and conventional forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. № 212. P. 1963–1972.
4. Hai-ping Yu, Chun-feng Li, Da-hai Liu, et al. Tendency of homogeneous radial deformation during electromagnetic compression of aluminium tube. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*. 2010. № 20. P. 7–13.

5. Gnatov A., Argun Sch. New method of car body panel external straightening. Tools of method. *International Journal of Vehicular Technology*. 2015. 1 July. P. 1–7.
6. Batygin Yu., Chaplygin E., Shinderuk S., Strelnikova V. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 3. С. 43–52.
7. Eguia I., Mangas A., Iturbe R., Gutierrez M.A. Electromagnetic forming of longitudinal strengthening ribs in roll formed automotive profiles. Proceedings of 4th International Conference on High Speed Forming (ICHSF). (May 2010). 2010. P. 198–207.
8. Golovashchenko S. Electromagnetic Forming and Joining for Automotive Applications. 2nd International Conference on High Speed Forming (ICHSF). (May 2006). 2006. P. 201–206.
9. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Springer International Publishing AG. 2018. 93 p.
10. Benenson V. Harris J.W., Stöcker H., Lutz H. Handbook of Physics. Springer. 2002. 1190 p.
11. Griffiths D.J. Introduction to Electrodynamics. 4th Edition. Cambridge University Press, 2017. 620 p.
12. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Experimental investigation of the current distribution on the sheet blank surface in linear tools of magnetic-pulsed attraction. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2020. № 2. С. 46–51.
13. Tumanski S. Principles of Electrical Measurements. CRC Press Taylor & Francis Group. 2006. 488p.
14. Kantorovic L. Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics. Springer. 2016. 526 p.
15. Tang K.T. Mathematical Methods for Engineers and Scientists 3. Springer-Verlag. 2007. 452 p.
6. Batygin Yu., Chaplygin E., Shinderuk S., Strelnikova V. (2018). The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Elektrotehnika i Elektromehanika*. 3. 43–52 doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.05.
7. Eguia I., Mangas A., Iturbe R., Gutierrez M.A. (2010). Electromagnetic forming of longitudinal strengthening ribs in roll formed automotive profiles. Proceedings of 4th International Conference on High Speed Forming (ICHSF). (May 2010). 198–207.
8. Golovashchenko S. (2006). Electromagnetic Forming and Joining for Automotive Applications. 2nd International Conference on High Speed Forming (ICHSF). (May 2006). 201–206.
9. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. (2018). Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Springer International Publishing AG.
10. Benenson V. Harris J.W., Stöcker H., Lutz H. (2002). Handbook of Physics. Springer.
11. Griffiths D.J. (2017). Introduction to Electrodynamics. 4th Edition. Cambridge University Press.
12. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. (2020). Experimental investigation of the current distribution on the sheet blank surface in linear tools of magnetic-pulsed attraction. *Elektrotehnika i Elektromehanika*. 2. 46–51 doi: 10.20998/2074-272X.2020.2.07.
13. Tumanski S. (2006). Principles of Electrical Measurements. CRC Press Taylor & Francis Group.
14. Kantorovic L. (2016). Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics. Springer.
15. Tang K.T. (2007). Mathematical Methods for Engineers and Scientists 3. Springer-Verlag.

References

1. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. (2016). Magnetic pulsed processing of metals for advanced technologies of modernity – a brief review. *Elektrotehnika i Elektromehanika*. 5. 35–39. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.05
2. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. (2011). Electromagnetic forming – A review. *Journal of Material Process Technology*. 211. 787–829.
3. Imbert J., Worswick M. (2012). Reduction of a pre-formed radius in aluminum sheet using electromagnetic and conventional forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 212. 1963–1972.
4. Hai-ping Yu, Chun-feng Li, Da-hai Liu, et al. (2010). Tendency of homogeneous radial deformation during electromagnetic compression of aluminium tube. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*. 20. 7–13.
5. Gnatov A., Argun Sch. (2015). New method of car body panel external straightening. Tools of method. *International Journal of Vehicular Technology*. 1. 1–7.

Чаплыгин Евгений Александрович¹, к.т.н., доц. каф. физики, тел. +38-057-707-37-27; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Шиндерук Светлана Александровна¹, к.т.н., доц. каф. физики, тел. +38-057-707-37-27, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Гаврилова Татьяна Владимировна¹, к.физ.-мат.н., доц. каф. физики, тел. +38-057-707-37-27, e-mail: gavriloova.tatyana@i.ua.

Лебедь Анита Дмитриевна¹, студент, тел. +38-057-707-37-27, e-mail: lebed.anita2017@gmail.com.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Probabilistic estimate of dependence between voltage and current in measurements by induction sensors of characteristics of magnetic-pulsed metal processing

Abstract. Problem. Magnetic-pulse methods are the basis of modern technologies for stamping products from aluminum alloys with high strength and low weight. In this regard, the development of tools for force action, based on the fundamental principles of the

electrodynamics of continuous media, is of practical importance. **Goal.** The purpose of the work is a probabilistic assessment of deviations from a directly proportional relationship between the amplitudes of the exponentially relaxing temporal dependences of voltage and current in measurers of the characteristics of magnetic-pulse metal processing with using an induction-type sensor – the Rogowski belt. **Methodology.** To achieve this goal, the provisions of the electrical circuits theory, the characteristics of random quantities in probability theory, as well as the standard programs from the “Wolfram Mathematica” package were used. **Results.** It is established that in the induction measurers – the Rogowski belt the differences between the amplitudes of the compared quantities are determined by the values $\delta \in [0,1; 0,3]$ of the relative damping factor of the current signal. **Originality.** It is shown that for harmonic temporal current functions with a relative damping factor, the proportionality between the relative amplitudes of inductively coupled current and voltage is preserved with an accuracy not lower than $\sim 10\%$, which makes it possible to investigate electromagnetic processes using the normalized amplitudes of oscilloscope voltages without using analog or numerical integration methods. **Practical value.** The use of the obtained results will significantly reduce the list of necessary equipment for measurements, simplify experiments and reduce the time to conduct them, which will ultimately create new, more effective tools for magnetic-pulsed metal processing.

Key words: magnetic-pulsed metal processing, electrical measurements, Rogowski belt, probabilistic characteristics, harmonic signals.

Evgen Chaplygin¹, Ph.D., Assoc. Prof., tel. +38 057-707-37-27, e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com

Svitlana Shinderuk¹, Ph.D., Assoc. Prof., tel. +38 057-707-37-27, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Tetyana Gavrilova Ph.D., Assoc. Prof., tel. +38 057-707-37-27, e-mail: gavrilova.tatyana@i.ua.

Lebed Anita¹, student, tel. +38 057-707-37-27, e-mail: lebed.anita2017@gmail.com.

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry street, Kharkiv, 61002, Ukraine.

Імовірнісна оцінка зв'язку напруги і струму в індукційних вимірювачах характеристик магнітно-імпульсної обробки металів

Анотація. Постановка проблеми. Магнітно-імпульсні методи є базовою основою сучасних технологій штампування виробів з алюмінієвих сплавів, що володіють високою міцністю і малою вагою. У зв'язку з цим практичну значимість набувають розробки інструментів силового впливу, які засновані на фундаментальних положеннях електродинаміки суцільних середовищ. **Мета.** Метою роботи є імовірнісна оцінка відхилень від прямо пропорційного

зв'язку між амплітудами експоненціально затухаючих часових залежностей напруги і струму у вимірах характеристик магнітно-імпульсної обробки металів з використанням датчика індукційного типу – пояса Роговського. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використовувалися положення теоретичної електротехніки, характеристики випадкових величин в теорії імовірностей, а також стандартні програми з пакету «Wolfram Mathematica». **Результати.** Із залученням характеристик випадкових величин виконана імовірнісна оцінка відхилень від прямо пропорційного зв'язку між амплітудами експоненціально затухаючих часових залежностей напруги і струму в вимірах характеристик магнітно-імпульсної обробки металів з використанням датчика індукційного типу – пояса Роговського. Встановлено, що розбіжності між амплітудами порівнюваних величин визначаються значеннями відносного коефіцієнту загасання токового сигналу. В інтервалі змін даного параметра $\delta \in [0,1; 0,3]$, що є характерним для магнітно-імпульсної обробки металів, розбіжності між середніми значеннями амплітуд струму і напруги не перевищують $\sim 2,36\%$. Відносна різниця між відхиленнями від середніх становить $\sim 8,4\%$.

Наукова новизна. Показано, що для гармонічних часових функцій струму з відносним коефіцієнтом загасання $\delta_0 \leq 0,3$ пропорційність між відносними амплітудами індуктивно зв'язаних струму і напруги зберігається з точністю, не нижче $\sim 10\%$, що дозволяє досліджувати електромагнітні процеси за допомогою нормованих амплітуд напруг без використання аналогових або чисельних методів інтегрування. **Практичне значення.** Використання отриманих результатів дозволить істотно скоротити перелік необхідного обладнання для вимірювань, спростити експерименти і скоротити час на їх проведення, що дозволить, в кінцевому підсумку, створювати нові більш ефективні інструменти магнітно-імпульсної обробки металів.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, електричні вимірювання, пояс Роговського, імовірнісні характеристики, гармонічні сигнали.

Чаплицін Євген Олександрович¹, к.т.н., доц. кафедри фізики, тел. +38-057-707-37-27; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Шиндерук Світлана Олександрівна¹, к.т.н., доц. каф. фізики, тел. +38-057-707-37-27, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Гаврилова Тетяна Володимирівна¹, к.фіз.-мат.н., доц. каф. фізики, тел. +38-057-707-37-27, e-mail: gavrilova.tatyana@i.ua.

Лебідь Аніта Дмитрівна¹, студент, тел. +38-057-707-37-27, e-mail: lebed.anita2017@gmail.com.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, Харків, 61002, вул. Ярослава Мудрого 25.