

УДК 621.318.4

© Чаплыгин Е.А.¹, Барбашова М.В.², Сабокарь О.С.³, Рябуха И.С.⁴**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ПЛОСКИМ
КРУГОВЫМ МНОГОВИТКОВЫМ СОЛЕНОИДОМ**

Представлены результаты исследования протекания электромагнитных процессов в системе индукционного нагрева. Получены расчетные зависимости для тока, индуцированного в металле листовой заготовки, и коэффициента трансформации. Определен максимум коэффициента трансформации с учетом растекания вихревых токов по всей площади листового металла. Получены расчетные соотношения для оценки тепловых процессов при нагреве ферромагнетиков плоским круговым многовитковым соленоидом.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индукторная система, индуцированный ток, электромагнитные процессы, вихревые токи, нагрев металла.

Чаплигін Є.О., Барбашова М.В., Сабокар О.С., Рябуха І.С. Особливості електромагнітних процесів при індукційному нагріванні феромагнетиків плоским круговим багатовитковим соленоїдом. Відображені результати дослідження протікання електромагнітних процесів в системі індукційного нагрівання. Отримано розрахункові залежності для струму, індукованого в металі листової заготовки, і коефіцієнта трансформації. Визначено максимум коефіцієнта трансформації з урахуванням розтікання вихрових струмів по всій площі листового металу. Отримано розрахункові співвідношення для оцінки теплових процесів при нагріванні феромагнетиків плоским круговим багатовитковим соленоїдом.

Ключові слова: індукційне нагрівання, індукторна система, індукований струм, електромагнітні процеси, вихрові струми, нагрівання металу.

E.O. Chaplygin, M.V. Barbashova, O.S. Sabokar, I.S. Ryabukha. The peculiarities of electromagnetic processes at induction heating of ferromagnetics by flat circular multiturn solenoid. The article presents the results of electromagnetic processes research in the induction heating system. The system of the induction heating consists of flat circular multiturn solenoid. It is located above the plane of thin-walled sheet non-magnetic metal. Calculation dependences have been got for the current induced in the sheet metal blank and the ratio of transformation. The ratio of transformation is determined as a relation of amplitudes of the exciting current and the current induced in the blank in the circle of radius. Maximum ratio of transformation is defined taking into account spreading of eddy currents over all the area of sheet-metal. Calculation dependances for the estimation of the thermal processes at heating ferromagnetics by a flat multiturn solenoid have been obtained. The definition of the «relative heating temperature» integrally takes into account the influence of the skin effect peculiarities on the temperature indices of induction heating, that is, not only the conductive but magnetic properties of the metal of the blank. This makes it possible to perform all the necessary numerical estimations of the characteristics of the processes in the «inductor–sheet blank» system under consideration, taking into account the peculiarities stemming from field penetration processes during induction heating of thin-walled ferromagnetics.

¹ канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков, chaplygin.e.a@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков, barbashova1987@gmail.com

³ аспирант, ассистент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков, o.s.sabokar@gmail.com

⁴ студент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков

Keywords: *induction heating, induction system, induced currents, electromagnetic process, eddy currents, metal heating.*

Постановка проблеми. Индукционный нагрев (ИН) – метод бесконтактного нагрева электропроводящих материалов токами высокой частоты. Одним из основных элементов в системе индукционного нагрева является индуктор, обеспечивающий наведение индуцированного тока в объекте обработки. Данный эффект нашёл широкое применение в промышленности для выполнения целого ряда производственных операций, например, по закалке поверхностей металлических изделий, бесконтактному разогреву жидкостей, левитационной плавке металлов и др. [1-3]. Следует отметить и интерес к индукционному нагреву в методах и способах ремонта транспортных средств. Здесь с успехом разрабатываются производственные операции по съёму стёкол, очистке лакокрасочных покрытий, разъёму болтовых соединений, размягчению металлических покрытий кузовов перед рихтовкой вмятин и др. [4]. Можно много перечислять области применения индукционного нагрева, но много аспектов проблематики ИН остаются нераскрытыми, такие как особенности протекания электромагнитных процессов при нагреве ферромагнетиков или предварительные оценки тепловых процессов при индукционном нагреве.

Анализ последних исследований и публикаций. Среди последних работ, посвящённых индукционному нагреву, следует отметить работы, где детально освещены процессы в инструментах метода – генераторах поперечного магнитного поля [5] и обобщены результаты комплексных исследований, представленных в российских и зарубежных литературных источниках, описаны методы расчёта интегральных характеристик процессов нагрева, а также результаты физических экспериментов на промышленных установках [6].

В литературном источнике [7] авторами предложена система, инициирующая протекание тока в обмотке рабочего инструмента до момента магнитно-импульсного силового воздействия. Такой предварительный индукционный нагрев позволял существенно повысить эффективность магнитно-импульсной обработки металлов.

Среди последних научных публикаций на эту тему можно отметить работу [8], где критерием эффективности является плотность активной мощности, выделяемой у поверхности металла за период действующего поля, изменяющегося во времени по гармоническому закону. В рамках принятой идеализированной модели авторами получено, что глубокое насыщение позволяет увеличить отдельные показатели индукционного нагрева достаточно массивного ферромагнетика.

Цель работы. Исследование особенностей протекания электромагнитных процессов в системе индукционного нагрева, представленной плоским круговым многовитковым соленоидом, помещённым над плоскостью тонкостенного листового немагнитного металла; вывод расчетного соотношения для оценки тепловых процессов при нагреве ферромагнетиков плоским круговым многовитковым соленоидом.

Изложение основного материала. 1) Индукцированные токи. При решении можно воспользоваться аналитическими зависимостями для индуцированных токов в тонкостенных листовых ферромагнетиках, полученными авторами работ [9, 10].

Для понимания границ достоверности последующих вычислений приведём основные положения физико-математической постановки задачи.

Расчётная модель, та же, что и с немагнитным металлом в цилиндрической системе координат с направляющими осями $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$, представлена на рисунке.

Принятые допущения:

– листовая заготовка является достаточно тонкостенной, а её радиальная протяжённость также достаточно велика, то есть

$$\frac{d}{R_{1,2}} \ll 1,$$

где d – удельная электропроводность и толщина заготовки; $R_{1,2}$ – внутренний и внешний радиусы индуктора;

– виток индуктора достаточно тонок и «прозрачен» для действующих полей ($\Delta \rightarrow 0$), так что его металл не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы;

– в индукторе течёт ток $I(t)$, временные параметры которого таковы, что в расчётах впол-

не приемлемо известное условие квазистационарности происходящих электромагнитных процессов, так что

$$\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1,$$

где ω – циклическая частота процесса; c – скорость света в вакууме; l – характерный наибольший геометрический размер системы;

– система обладает аксиальной симметрией, тогда

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0,$$

где φ – полярный угол;

– магнитная проницаемость металла листовой заготовки постоянна и равна μ_1

$$\mu_1 = \mu_0 \cdot \mu_r,$$

где μ_0 и μ_r – магнитная проницаемость вакуума и относительная магнитная проницаемость металла, соответственно.

Последнее допущение требует обоснования.

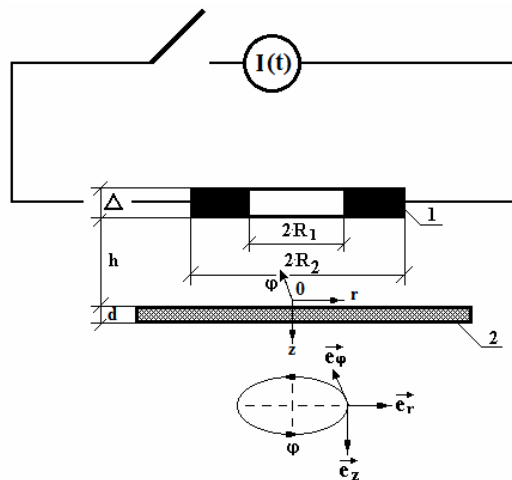


Рисунок – Расчётная модель системы «индуктор – заготовка»: $I(t)$ – источник переменного тока; 1 – многовитковый соленоид; 2 – плоский листовой ферромагнетик

Естественно, что достоверность вычислений определяется уровнем вариации значения относительной магнитной проницаемости μ_r в течение рассматриваемого процесса. Безусловно и то, что реально эта характеристика ферромагнетика будет изменяться в интервале от единицы до своего максимального значения много большего единицы. Но если посмотреть на типичные зависимости магнитной проницаемости различных сталей от напряжённости поля из фундаментальной монографии Я. Туровского [11], то можно увидеть, что для $H_m > 10^4$ А/м изменение этой характеристики металла, определяемого величиной производной $\frac{d\mu_r(H)}{dH} \rightarrow 0$, будет достаточно малым. В данном диапазоне амплитуд действующего поля можно положить, что $\mu_r = const$.

Следует отметить, что допущение о постоянстве магнитной проницаемости ферромагнетиков не является новым, разными авторами в разное время оно неоднократно использовалось в теоретических исследованиях электромагнитных процессов, например, [9, 10, 12-14].

Окончательное выражение для азимутальной компоненты линейной плотности индуцированного тока в ферромагнитном листе примет вид [9, 10]:

$$J_\varphi(\varphi, r) = 4(\mu_r \cdot j_m) \int_0^\infty f(x) \cdot e^{-x \cdot \frac{h}{d}} x^2 \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) \cdot \sum_{k=0}^\infty a(k) \cdot \frac{F_k(\beta_k)}{\Phi_k((\mu_r \cdot x), \beta_k)} \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega\tau} \cdot \varphi} \cdot dx, \quad (1)$$

где j_m – амплитуда плотности тока в индукторе; w – число витков в обмотке,

$$f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \cdot \frac{R_1}{d}}^{x \cdot \frac{R_2}{d}} y \cdot J_1(y) dy, \quad a(k) = \begin{cases} 0,5; k = 0; \\ 1,0; k = 1, 2, \dots \end{cases}$$

β_k – корни уравнения:

$$\operatorname{tg} \beta_k \left(\frac{\beta_k}{(\mu_r \cdot x)} - \frac{(\mu_r \cdot x)}{\beta_k} \right) = 2, \quad F_k(\beta_k) = \left[(1 - \cos \beta_k) + \frac{\beta_k}{(\mu_r \cdot x)} \cdot \sin \beta_k \right],$$

$$\Phi_k((\mu_r \cdot x), \beta_k) = \cos \beta_k \cdot [(\mu_r \cdot x)^2 + 2(\mu_r \cdot x) - \beta_k^2] - 2\beta_k \sin \beta_k \cdot [1 + (\mu_r \cdot x)],$$

где $\varphi = \omega \cdot t$ – фаза сигнала; $\tau = (\mu_0 \cdot \mu_r) \gamma d^2$ – характерное время проникновения поля в проводящий слой с удельной электропроводностью γ , относительной магнитной проницаемостью μ_r и толщиной d .

Безусловно, для ситуации нагрева металлов свыше температур 400°C магнитная проницаемость будет претерпевать резкое изменение в стороны понижения, но в предполагаемой технологии нагрева, где нагрев до 300°C является критичным и приводит к порче объекта, относительной магнитной проницаемостью μ_r априори принимается за константу, т. к. диапазон предполагаемого изменения температур является малым.

Если возбуждающий ток в индукторе изменяется во времени по гармоническому закону $j(t) = \sin(\varphi)$, то выражение (1) переписывается в виде:

$$J_\varphi(\varphi, r) = 4(\mu_r \cdot j_m) \int_0^\infty f(x) \cdot e^{-x \frac{h}{d}} x^2 \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) \cdot \sum_{k=0}^\infty a(k) \cdot \frac{F_k(\beta_k)}{\Phi_k((\mu_r \cdot x), \beta_k)} \cdot \left(\cos \varphi \cdot e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} \cdot \varphi} \right) \cdot dx, \quad (2)$$

где свёртка функций соответствует гармонической временной зависимости возбуждающего тока:

$$\left(\cos \varphi \cdot e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} \cdot \varphi} \right) = \int_0^\varphi \cos(\eta) \cdot e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} \cdot (\varphi - \eta)} d\eta.$$

Интегрируя выражение (2) по $r \in [0; R]$, находим величину тока, индуцированного в металле листовой заготовки в круге радиуса R .

$$I_\varphi(r \leq R, \varphi) = 4 \left(\mu_r \cdot d \cdot \frac{I_m \cdot w}{(R_2 - R_1)} \right) \int_0^\infty f(x) \cdot e^{-x \frac{h}{d}} \cdot x \cdot \left(1 - J_0\left(x \cdot \frac{R}{d}\right) \right) \sum_{k=0}^\infty a(k) \cdot \frac{F_k(\beta_k)}{\Phi_k((\mu_r \cdot x), \beta_k)} \times$$

$$\times \left(\cos \varphi \cdot e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} \cdot \varphi} \right) dx, \quad (3)$$

где I_m – амплитуда тока в индукторе.

Коэффициент трансформации определяется как отношение амплитуд возбуждающего тока и тока, индуцированного в заготовке в круге радиуса R (область $r \leq R$)

$$K(R, \varphi) = \frac{J_{\varphi \max}(R)}{I_m} = \left(\mu_r \cdot \frac{4 \cdot d \cdot w}{(R_2 - R_1)} \right) \int_0^\infty f(x) \cdot x \cdot e^{-x \frac{h}{d}} \cdot \left(1 - J_0\left(x \cdot \frac{R}{d}\right) \right) \times$$

$$\times \sum_{k=0}^\infty a(k) \cdot \frac{F_k(\beta_k)}{\Phi_k((\mu_r \cdot x), \beta_k)} \cdot \left(\cos \varphi \cdot e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} \cdot \varphi} \right) \cdot dx. \quad (4)$$

Максимум коэффициента трансформации имеет место при $R \rightarrow \infty$, учитывающем растекающие вихревые токи по всей площади листового металла.

Из выражения (4) получаем:

$$K_{\max} = \frac{J_{\varphi \max}(R \rightarrow \infty)}{I_m} = \left(\mu_r \cdot \frac{4 \cdot d \cdot w}{(R_2 - R_1)} \right) \times \int_0^{\infty} f(x) \cdot x \cdot e^{-\frac{h}{d} \sum_{k=0}^{\infty} a(k)} \cdot \frac{F_k(\beta_k)}{\Phi_k((\mu_r \cdot x), \beta_k)} \times \left(\cos \varphi \cdot e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau} \varphi} \right) dx. \quad (5)$$

2) Температурные показатели. Зависимость для температуры нагрева рассматриваемой круговой области листового металла за время, соответствующее фазовому промежутку $\Delta\varphi$:

$$\Delta T^{\circ} = \frac{1}{(M \cdot C \cdot \gamma \cdot d \cdot \omega)} \cdot \int_0^{\Delta\varphi} \left(\overline{I_{\varphi}(\varphi)} \right)^2 \cdot d\varphi, \quad (6)$$

где M – масса пластины, $M = \rho \cdot \pi \cdot R_2^2$; C – удельная теплоёмкость металла пластины.

Формула (6) для температуры нагрева круговой области листового металла с внешним радиусом R за временной интервал Δt может содержать зависимость от магнитной проницаемости только в выражении для линейной плотности индуцированного тока под знаком двойного интеграла.

С учётом данного замечания, она приемлема для расчёта температуры индукционного нагрева круговой области листового ферромагнетика. В терминах «относительной температуры нагрева» $\Delta T_{\text{отн}}^{\circ} = \frac{\Delta T^{\circ}}{(I_m \cdot w)^2}$ эта формула запишется в виде:

$$\Delta T_{\text{отн}}^{\circ} = \frac{1}{(M \cdot C \cdot \gamma \cdot d \cdot \omega)} \cdot \int_0^{\Delta\varphi} \left(\overline{I_{\varphi\text{-отн}}(\varphi)} \right)^2 \cdot d\varphi, \quad (7)$$

где $\overline{I_{\varphi\text{-отн}}(\varphi)} = \frac{\overline{I_{\varphi}(\varphi)}}{(I_m \cdot w)}$ – «относительная плотность усреднённой величины возбуждаемого

тока» (усреднение по радиальному и поперечному размеру области нагреваемого образца).

Считая, что нагрев области под индуктор имеет скорость во много раз превышающую характерное время распространения теплоты в металле, данная формула справедлива для адиабатической идеализации процесса нагрева. Следует отметить, что формула (7) интегральным образом учитывает влияние особенностей скин-эффекта на температурные показатели индукционного нагрева, то есть не только проводящих, но магнитных свойств металла заготовки.

Формула (7) представляют собой соотношение, позволяющее выполнить все необходимые численные оценки характеристик процессов в исследуемой системе «индуктор–листовая заготовка» с учётом особенностей, обусловленных процессами проникновения поля при индукционном нагреве тонкостенных ферромагнетиков.

Выводы

Основные результаты проведенных оценок сводятся к следующим положениям:

- проведено исследование особенностей протекания электромагнитных процессов в системе индукционного нагрева, представленной плоским круговым многовитковым соленоидом, помещённым над плоскостью тонкостенного листового немагнитного металла;
- получены расчетные соотношения для оценки тепловых процессов при нагреве ферромагнетиков плоским круговым многовитковым соленоидом;
- определено, что максимум коэффициента трансформации имеет место при $R \rightarrow \infty$, при этом учитывается растекание вихревых токов по всей площади листового металла.

Список использованных источников:

1. Handbook of physics / W. Benenson, J.W. Harris, H. Stocker, H. Lutz. – New York : Springer, 2002. – 1181 p.
2. Handbook of Induction Heating / V. Rudnev, D. Loveless, R.L. Cook, M. Black. – New York : CRC Press, 2002. – 796 p.

3. Сидоренко В.Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении / В.Д. Сидоренко. – Л. : Машиностроение, 1980. – 231 с.
4. Welcome to BETAG Innovation [Electronic resource] : [Web site]. – Electronic data. – 2015. – Mode of access: www.beulentechnik.com. – Screen title.
5. Виштак Т.В. Электромагнитное поле и силы в однофазных индукторах поперечного магнитного поля для нагрева лент / Т.В. Виштак, И.П. Кондратенко, А.П. Ращепкин // Техническая электродинамика. – 2005. – № 5. – С. 9-4.
6. Алиферов А. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов / А. Алиферов, С. Лупи. – Новосибирск : Изд. НГТУ, 2013. – 354 с.
7. Белый И.В. Деформирование металлов импульсным электромагнитным полем с предварительным индукционным нагревом заготовок / И.В. Белый, Л.Д. Горкин, Л.Т. Хименко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. – № 7. – С. 6-8.
8. Сысун В.И. Индукционный нагрев в режиме насыщения / В.И. Сысун, В.А. Подопригора // Фундаментальные исследования. – 2004. – № 3. – С.132-134.
9. Батыгин Ю.В. Вихревые токи в тонких металлических листах при магнитно-импульсной обработке металлов / Ю.В. Батыгин, А.Ю. Бондаренко, В.И. Лавинский, // Электричество. – 2009. – № 9. – С. 61-65.
10. Туренко А.Н. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 239 с. – (Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий : монография : в 3-х т.; Т. 3).
11. Туровский Я. Техническая электродинамика / Я. Туровский. – М. : Энергия, 1974. – 488 с.
12. Batygin Yu.V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications / Yu.V. Batygin, S.F. Golovashchenko, A.V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology / Elsevier. – 2013. – Vol. 213. – № 3. – Pp. 444-452.
13. Batygin Yu.V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / Yu.V. Batygin, S.F. Golovashchenko, A.V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology/ Elsevier. – 2014. – Vol. 214. – № 2. – Pp. 390-401.
14. Гнатов А.В. Прогрессивные технологии. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А.В. Гнатов, Ю.В. Батыгин, А.Н. Туренко. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 248 с.

References:

1. Benenson W., Harris J.W., Stocker H., Lutz H. Handbook of physics. New York, Springer Publ., 2002. 1181 p.
2. Rudnev V., Loveless D., Cook R.L., Black M. Handbook of Induction Heating. New York, CRC Press Publ., 2002. 796 p.
3. Sidorenko V.D. *Primenenie induktsionnogo nagreva v mashinostroenii* [Application of of induction heating in mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980. 231 p. (Rus.)
4. Welcome to BETAG Innovation Available at: www.beulentechnik.com (accessed 13 May 2017).
5. Vishtak T.V., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P. Elektromagnitnoe pole i sily v odnofaznykh induktorakh pope-rechnogo magnitnogo polya dlya nagreva lent [The electromagnetic field and strength in single-phase inductors in transverse magnetic field for heating of strips]. *Tekhnichna Elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2005, no.5, pp. 9-14. (Rus.)
6. Aliferov A., Lupi S. *Induktsionnyi i elektrokontaktnyi nagrev metallov* [The induction and electro-contact heating of metals]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2013. 354 p.
7. Belyi I.V., Gorkin L.D., Khimenko L.T. Deformirovanie metallov impul'snym elektromagnitnym polem s predvaritel'nym induktsionnym nagrevom zagotovok [Deformation of metals pulsed electromagnetic field with pre-induction heating workpieces]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo – Forging and Stamping Production*, 1984, vol.7, pp. 6-8. (Rus.)
8. Sysun V.I., Podoprighora V.A. Induktsionnyi nagrev v rezhime nasyshcheniya [Induction heating in saturation regime]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*, 2004, no.3, pp. 132-134. (Rus.)
9. Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu., Lavinskii V.I. Vikhrevye toki v tonkikh metallicheskih listakh pri magnitno-impul'snoi obrabotke metallov [Eddy currents in thin metal sheets at the ex-

- pense of magnetic pulsed treatment of metals]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2009, no.9, pp. 61-65. (Rus.)
10. Turenko A. N., Batygin Yu. V., Gnatov A. V. *Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tekhnologii. Tom 3. Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi polyami* [Pulsed magnetic fields for progressive technologies. Volume 3. Theory and experiment attraction of thin-walled metal pulsed magnetic fields]. Khar'kov, KhNADU Publ., 2009. 239 p. (Rus.)
 11. Turovskii Ya. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamics]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 488 p. (Rus.)
 12. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, no.3, pp. 444-452.
 13. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no.2, pp. 390-401.
 14. Gnatov A.V., Batygin Y.V., Turenko A.N. *Progressivnye tekhnologii. Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi polyami* [Progressive technologies. Theory and experiment attraction of thin-walled metal pulsed magnetic fields]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publ., 2011. 248 p. (Rus.)

Рецензент: Ю.В. Батыгин
д-р техн. наук, проф., ХНАДУ

Статья поступила 30.09.2017

УДК 621.316.1; 621.391.1

© Дьяченко М.Д.*

ОБЗОР КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГОРОДСКОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ СРЕДНЕГО И НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В статье рассмотрены вопросы мониторинга состояния кабельных распределительных сетей и распределительных трансформаторных подстанций. Показана необходимость непрерывного контроля режимов работы сети. Основное внимание в статье уделено обзору канала передачи данных для организации «цифрового слоя» Smart Grid. Рассмотрены основные достоинства и недостатки каналов передачи данных как проводного, так и беспроводного типа. Показано, что применение PLC технологии, а также проводных и даже оптоволоконных линий, на текущий момент нецелесообразно с экономической точки зрения. Обоснована целесообразность организации каналов связи с распределительными трансформаторными подстанциями за счет использования сетей GSM предоставляемых операторами мобильной связи.

Ключевые слова: распределительная трансформаторная подстанция, системы мониторинга, сеть передачи данных, сенсорная сеть, самоорганизующаяся сеть.

Дьяченко М.Д. Перегляд списку каналів передачі даних для системи моніторингу міської розподільної мережі середньої і низької напруги. У статті розглянуті питання моніторингу стану кабельних розподільних мереж і розподільних трансформаторних підстанцій. Показана необхідність безперервного контролю режимів роботи мережі. Основна увага у статті приділена огляду каналу передачі даних для організації «цифрового шару» Smart Grid. Розглянуто основні переваги та

* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет, г. Мариуполь, signnet.dmd@gmail.com