

В.Ф. БЕЗОТОНСКИЙ, канд.техн.наук; **В.В. КОЗЛОВ**, канд.техн.наук;
О.В.НАБОКОВА; ЗНТУ, Запорожье

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УСИЛИЙ НА РАЦИОНАЛЬНЫХ ЧАСТОТАХ НАМАГНИЧИВАНИЯ

У статті на основі аналізу вимог до параметрів силовимірюючих електромагнітних перетворювачів, зроблено висновок, що з метою підвищення точності необхідно враховувати наявність поверхневого ефекту в магнітопроводі й запропоновано формулу для розрахунку фіктивної магнітної проникності. Запропоновано аналіз динамічних характеристик електромагнітних перетворювачів.

On the basis of analysis of requirements to the parameters of forcemeasuring electromagnetic converters the conclusion was made that it is necessary to take into account the presence of superficial effect in the magnetowire with the purpose of increase of accuracy, and the formula for calculation of fictitious magnetic permeability was considered in this article. The analysis of dynamic characteristics of electromagnetic converters was offered.

Разработка методик проектирования и выбора рациональных параметров электромагнитных преобразователей (ЭП) магнитоупругого типа на рациональных частотах за счет учета поверхностного эффекта в магнітопроводе, а также уточнение динамических характеристик ЭП является весьма актуальной задачей.

При выводе соотношений выходных характеристик ЭП обычно предполагается, что частота намагничивающего тока невелика относительно промышленной, а поэтому индукция и магнитная проницаемость в листах шихтованного (реже монолитного) преобразователя изменяются незначительно по глубине. Однако для повышения метрологических характеристик ЭП рациональная частота на порядок выше промышленной [1, 2].

С целью обоснования методики расчета ЭП на рациональных частотах останемся кратко на физических процессах, происходящих в материале магнітопровода, при намагничивании ферромагнетика переменным магнитным полем.

Рассмотрим три пластины пакета магнітопровода. Предположим, что поток Φ проходит в пакете в направлении оси Oz , а влиянием остальных листов пренебрегаем. Так как магнитное поле в пакете гармонически изменяется во времени, то справедливы известные дифференциальные уравнения для векторов напряженности магнитного и электрического полей [3]:

$$\frac{d^2 \underline{H}}{d\bar{x}^2} = \underline{kH}; \quad \frac{d^2 \underline{E}}{d\bar{x}^2} = \underline{kE}, \quad (1)$$

где $\underline{k}^2 = j\omega\gamma\mu_a$, ω – угловая частота, γ – удельная электрическая проводимость материала магнитопровода; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость.

Решение этих уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned}\underline{H} &= H_1 e^{kx} + H_2 e^{-kx}; \\ \underline{E} &= E_1 e^{kx} + E_2 e^{-kx}.\end{aligned}\quad (2)$$

Учитывая требование симметричности, то есть чтобы на краях пластин $H_{(x=b)} = H_{(x=-b)}$ при $2b \leq h$, и пренебрегая краевым эффектом на гранях $y = \pm h/2$ как весьма незначительным, получим при $x = \pm b$

$$\begin{aligned}H_0 &= H_1 e^{kb} + H_2 e^{-kb}; \\ H_0 &= H_1 e^{-kb} + H_2 e^{kb},\end{aligned}\quad (3)$$

где H_0 – эффективное значение напряженности магнитного поля.

Тогда постоянные интегрирования будут равны:

$$H_1 = H_2 = \frac{H_0}{\text{ch} \underline{k}b}, \quad (4)$$

а выражение для напряженности и индукции магнитного поля имеют вид:

$$\begin{aligned}\underline{H} &= H_0 \frac{\text{ch} \underline{k}x}{\text{ch} \underline{k}b}; \\ \underline{B} &= \mu_a H_0 \frac{\text{ch} \underline{k}x}{\text{ch} \underline{k}b}.\end{aligned}\quad (5)$$

Распределение магнитной индукции по сечению одной пластины имеет экспоненциальный характер относительно центральной ее оси. По одной пластине проходит магнитный поток [3]:

$$\underline{\Phi} = \int_{-b}^b h \underline{B} dx = \frac{2ah\mu_a}{1+j} H_0 \text{th}(1+j) \frac{b}{a}, \quad (6)$$

где $a = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_a\gamma}}$ – глубина проникновения магнитного поля.

Тогда среднее значение магнитной индукции в пластине равно

$$B = \mu_a H_0 \frac{a}{b} \sqrt{\frac{\text{ch} \frac{2b}{a} - \cos \frac{2b}{a}}{\text{ch} \frac{2b}{a} + \cos \frac{2b}{a}}}. \quad (7)$$

Так как суммарный магнитный поток Φ_C является суммой частных потоков в отдельных пластинках, то для пакета высотой d и толщиной h , при зазоре между пластинами, стремящемся к нулю ($c \rightarrow 0$), имеем:

$$\underline{\Phi}_c = \mu_a H_0 \frac{ahd}{(1+j)b} \operatorname{th} \left((1+j) \frac{b}{a} \right). \quad (8)$$

С другой стороны

$$\Phi_C = \mu_\Phi h d H_0, \quad (9)$$

где μ_Φ – фиктивная магнитная проницаемость материала, учитывающая потери на вихревые токи.

Учитывая соотношения (8) и (9), получим

$$\mu_\Phi = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\mu_a}{2\pi f_H \gamma}} \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} - \cos \frac{2b}{a}}{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} + \cos \frac{2b}{a}}}, \quad (10)$$

где f_H – частота намагничивающего тока.

Таким образом, введение фиктивной магнитной проницаемости позволяет учитывать неравномерность распределения индукции и напряженности магнитного поля по глубине пластин. При этом можно считать, что значения индукции и напряженности поля по глубине пластин одинаковы и равны некоторым фиктивным значениям индукции и напряженности на поверхности пластин. Такой подход значительно упрощает анализ ЭП и повышает точность расчета их выходных характеристик.

Так как при больших значениях аргумента гиперболические функции имеют значительно большие числовые значения чем тригонометрические, а реально их аргумент достаточно велик ($2b/a \geq 10$), то

$$\lim_{2b/a \gg 10} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} - \cos \frac{2b}{a}}{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} + \cos \frac{2b}{a}}} \approx 1. \quad (11)$$

Тогда соотношение (10) примет вид:

$$\mu_\Phi = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\mu_a}{2\pi f_H \gamma}}. \quad (12)$$

Как показали расчеты, погрешность при переходе от соотношения (10) к (12) при $f_H \geq 500$ Гц не превышает 0,1 %.

Эксперименты и машинный анализ полученного соотношения подтвердили теоретические предпосылки, что девиация частоты вызванная, к примеру, нестабильностью генератора, при низкочастотном намагничивании, сильно влияет на величину фиктивной магнитной проницаемости, а, следовательно, и на девиацию выходной НДС датчика. Последняя вызывает погрешность измерения усилий (при больших μ_a может весьма значительно). При частотах свыше 500 Гц указанный эффект проявляется значительно меньше и при частоте 1 кГц девиация частоты $\Delta f_H = 1$ % вызовет незначительную де-

виацию фиктивной магнитной проницаемости ($\Delta\mu_f = 0,12\%$).

ЭП в каналах обратной связи автоматизированных устройств являются динамической системой, преобразующей усилие в электрический сигнал. В электрической цепи намагничивания магнитопровода ЭП содержится реактивное сопротивление индуктивного характера, что приводит к возникновению переходных процессов при изменении влияющих факторов, в том числе и при приложении к ЭП усилия. Происходящие динамические процессы целесообразно рассматривать в соответствии с общепринятой методикой.

Время протекания переходных процессов при ударных ступенчатых нагрузках в механическом звене ЭП может быть оценено по периоду собственных колебаний магнитопровода [4]:

$$T_M = \frac{h}{v_{зв}} = p \sqrt{\frac{\rho_{пл}}{E_p}}, \quad (13)$$

где: h – высота магнитопровода; $v_{зв}$ – скорость звука в магнитопроводе; $\rho_{пл}$ – плотность материала магнитопровода; E_p – модуль упругости в направлении действия силы.

Так как скорость звука в ферромагнитных магнитопроводах составляет около 5000 м/сек [4], высота магнитопровода обычно 5...10 см, применимы методы классической механики. Время восприятия магнитопроводом мгновенного изменения нагрузки имеет порядок $10^{-5} \dots 10^{-4}$ секунды.

Как показано в [5], скорость изменения намагниченности ферромагнетика на несколько порядков выше скорости распространения механических напряжений, то есть реально не оказывает влияния на быстродействие рассматриваемых преобразователей.

В электромагнитном звене магнитное состояние магнитопровода преобразовывается в электрическую величину $E_{вых}$. Намагничивающая и измерительная обмотки представляют собой сопротивления активно-индуктивного характера и существенным образом влияют на быстродействие ЭП. Реально преобразователи работают в режиме близком к режиму холостого хода. Тогда, учитывая [6], запишем выражение для передаточной функции по усилию

$$W_p(p) = \frac{E_{вых}(p)}{F(p)} = \frac{k_1 U_H f_H}{1 + pT}, \quad (14)$$

где: k_1 – коэффициент формирующих факторов; U_H – напряжение намагничивания обмотки; T – постоянная времени.

Так как $T = L_H/R_H$, а $L_H = w_H^2 R_m$, получим

$$T = \frac{w_H^2}{R_H} \cdot \frac{S_H}{l_H} \cdot \mu_\sigma, \quad (15)$$

где L_H и R_H – соответственно индуктивность и активное сопротивление обмотки; w_H – число витков намагничивающей обмотки; S_H и l_H – площадь сечения и длина магнитопровода ЭП; μ_σ – магнитная проницаемость при механических напряжениях σ в магнитопроводе.

С учетом [7], запишем:

$$T = \frac{w_H^2}{R_H} \cdot \frac{S_H}{l_H} \cdot \frac{\mu_{H[100]}}{1 - \frac{1}{\pi} \mu_{H[100]} \lambda_0 \sigma} \cdot \frac{1}{(1 + a_1/a_2)}, \quad (16)$$

где $\mu_{H[100]}$ – начальная магнитная проницаемость материала магнитопровода в направлении кристаллографической оси легкого намагничивания [100]; λ_0 – начальная магнитострикция; a_1 – коэффициент линейных размеров, a_2 – коэффициент анизотропии [7].

Как видно, для уменьшения длительности переходного процесса, связанного с индуктивностью намагничивающей обмотки, следует уменьшать число витков w_H . Одновременно, для сохранения чувствительности ЭП, следует повышать частоту намагничивающего тока, что соответствует реальному физическому смыслу. При $f_H \gg 50$ Гц

$$T = \frac{w_H^2}{R_H} \cdot \frac{S_H}{l_H} \cdot \frac{\sqrt{\mu_H}}{\left(B\sqrt{2\pi f_H \gamma} - \frac{1}{\pi} \sqrt{\mu_H} \lambda_0 \sigma_{\max} \right) \left(1 + \frac{a_1}{a_2} \right)}. \quad (17)$$

Выводы

1. Машинный анализ полученного соотношения (17) для постоянной времени ЭП показывает, что путем правильного выбора числа витков и частоты тока намагничивания, длительность переходных процессов в электромагнитных преобразователях может быть уменьшена до значений, не превышающих длительности распространения механических напряжений в магнитопроводе, то есть ЭП способны контролировать динамические процессы частотой до 10 кГц и выше.

2. Замена μ_H в последнем соотношении на μ_ϕ уточняет расчет передаточной функции ЭП за счет дополнительного учета поверхностного эффекта в магнитопроводе.

Список литературы: 1. *Безотосный В.Ф., Власенко Э.В.* Метод контроля механических напряжений // Электрический журнал. – 1998. – № 2. – С.24- 27. 2. *Безотосный В.Ф.* Электромагнитный преобразователь с коррелирующими магнитными полями // Электротехника и электроэнергетика. – 2000. – № 2. – С. 13-17. 3. *Ламмаранер И., Штафль М.* Вихревые токи. – М.: Энергия, 1967. – 210 с. 4. *Александров Е.С., Соколовский В.Б.* Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1989. – 360 с. 5. *Вонсовский С.В., Шур Я.С.* Ферромагнетизм. – Л.: ГИТТЛ, 1948. – 240 с. 6. *Чаплыгин В.И., Безотосный В.Ф., Полянский Г.А.* Электронное взвешивающее устройство с электромагнитными преобразователями // Теоретическая электротехника и устройства электроники. – Киев. –

1987. – С. 96-104. 7. *Безотосный В.Ф., Смирнова Л.А.* Теоретико-цепная модель магнито-управляемых датчиков, вопросы их применения и расчета // Труды МВТУ им. Н.Э.Баумана. – № 491. – С. 77-84. 8. *Безотосный В.Ф., Козлов В.В., Набокова О.В.* Современные подходы и перспективные направления разработки систем управления по силовому параметру // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 3. – С. 5-6.

Поступила в редколлегию 05.09.2008

УДК 621.317.2

И.Н.БОГАТЫРЕВ; В.И.ДОЦЕНКО, канд. техн. наук;
О.С.НЕДЗЕЛЬСКИЙ; А.В.ПЛИЧКО; НТУ «ХПИ», Харьков

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ.

У статті приведені результати розробки електронного модуля передачі аналогового сигналу (МПС) від високовольтного подільника напруги заряду ємкісного накопичувача енергії потужного високовольтного генератора імпульсів у систему вимірювання, контролю та керування. МПС має високу надійність і стійкість до електромагнітних імпульсних завад за рахунок використання оптоелектронного та трансформаторного гальванічного розв'язування ланцюгів живлення і передачі корисного сигналу.

This paper presents the results of elaboration of electronic module for transmission the analog signal (MTS) from high voltage divider of electric charging tension of energy capacitors of powerful pulse generator to electronic system of measuring, control and management. MTS has high safety and firmness to action of electromagnetic impulse hindrance due to using the optic-electronic and transformer devices with galvanic isolation of power and measuring circuits.

Введение. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) приборов, оборудования, систем и комплексов различного назначения предполагает проведение исследовательских и нормативных испытаний на электрофизическое воздействие, в частности, импульсных напряжений, токов, электромагнитных полей (ЭМП) [1]. Применяемые для этих целей мощные высоковольтные импульсные установки, такие как генераторы импульсов напряжения (ГИН), тока (ГИТ) в большинстве случаев в качестве источников энергии содержат емкостной накопитель энергии (ЕНЭ), работающий в цикле «заряд-разряд» [2]. Зарядное напряжение конденсаторов ЕНЭ может иметь величину от десятков до сотен кВ.

Нормативные документы, как правило, ставят жесткие требования к величине амплитуды импульса, его стабильности и повторяемости. Допустимый разброс ограничивается величиной в единицы процентов [3].