

УДК 620.179.14

В. А. СВЕТЛИЧНЫЙ, Ю. Е. ХОРОШАЙЛО, М. А. АМПИЛОГОВ**МОДЕЛЬ РЕЗОНАНСНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОНКИХ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК**

Тонкие ферромагнитные пленки широко используются в электронике в виде резистивных и емкостных элементов интегральных схем, устройств для записи и хранения информации, хемотронных приборах, в авиационной и космической технике, в оптике, микроволновой технике, используются в качестве покрытия для защиты от электромагнитного излучения, а также используются в декоративных целях. В работе рассмотрены вопросы теории резонансных вихретоковых преобразователей предназначенных для контроля тонких ферромагнитных пленок. Выполнен анализ влияния внутреннего сопротивления источника питания преобразователя и параметров структуры тонких ферромагнитных пленок на входные и выходные параметры и характеристики преобразователя. Выполнено сравнение чувствительности модели резонансного преобразователя с моделью аperiodического.

Ключевые слова: збудлива, вимірювальна індукційна котушка, характеристика перетворення, внесений імпеданс, функція перетворення, резонансний вихретоковий перетворювач.

Тонкие ферромагнитные пленки широко применяются в электронике в виде резистивных и емкостных элементов интегральных схем, устройств для записи и хранения информации, хемотронных приборах, в авиационной и космической технике, в оптике, микроволновой технике, применяются в качестве покрытия для защиты от электромагнитного излучения, а также используются в декоративных целях. В работе рассмотрены вопросы теории резонансных вихретоковых преобразователей предназначенных для контроля тонких ферромагнитных пленок. Выполнен анализ влияния внутреннего сопротивления источника питания преобразователя и параметров структуры тонких ферромагнитных пленок на входные и выходные параметры и характеристики преобразователя. Выполнено сравнение чувствительности модели резонансного преобразователя с моделью аperiodического.

Ключевые слова: возбуждающая, измерительная индукционная катушка, характеристика преобразования, вносимый импеданс, функция преобразования, резонансный вихретоковый преобразователь

Thin non-ferromagnetic films are widely used in electronics in the form of resistive and capacitive elements of integrated circuits, devices for recording and storing information, hemotron devices, in aviation and space technology, in optics, microwave technology, used as coatings for protection against electromagnetic radiation, and also used in decorative purposes. The paper deals with the theory of resonance vibration current converters for the control of thin ferromagnetic films. The analysis of the influence of the internal resistance of the power supply of the converter and the parameters of the structure of thin non-ferromagnetic films on the input and output parameters and characteristics of the converter is performed. A comparison of the sensitivity of a resonant converter model with an aperiodic model is performed

Keywords: excitation, measuring induction coil, transformation characteristic, introduced impedance, transformation function, resonant eddy current converter.

Постановка проблеми. Разнообразие, сложность геометрических форм деталей современного электротехнического оборудования, увеличение электромагнитных нагрузок и связанная с этим необходимость учета нелинейности среды, определяют предельно жесткие требования к точности расчетов электромагнитных полей. Анализ отечественной и зарубежной литературы позволяет констатировать, что для выявления структурных дефектов тонких ферромагнитных пленок вихретоковым методом неразрушающего контроля применяются различные разновидности аperiodических и резонансных вихретоковых преобразователей (ВТП).

Анализ исследований и публикаций. Однако величина внутреннего сопротивления источников питания преобразователей и параметры структуры тонких ферромагнитных пленок, а также их влияние на параметры преобразования, как правило игнорируются [1]. Такое допущение, с нашей точки зрения не совсем корректно и зачастую приводит к рассогласованию экспериментальных и практических данных полученных при дефектоскопии тонких ферромагнитных пленок вихретоковым методом. Поэтому в данной работе, так же как и в работе [1], выполнена попытка оптимизации и адекватной доработки теории ВТП с учетом вышеуказанных факторов.

Для выявления чувствительности резонансных

ВТП к структурным дефектам тонких ферромагнитных пленок, в работах [2–3] рассмотрены и проанализированы различные модели резонансных вихретоковых преобразователей. Согласно [2], если в колебательный контур включена возбуждающая катушка L_1 , то такой ВТП определяем как – ВТП первого вида, если измерительная катушка L_2 , то второго вида. Кроме того ВТП первого вида могут отличаться схемой питания колебательной цепи – последовательной или параллельной. Таким образом, достаточно рассмотреть три варианта резонансных ВТП: последовательный резонансный ВТП первого вида; параллельный резонансный ВТП первого вида; резонансный ВТП второго вида

Основная часть. В соответствии со схемой показанной на рис. 1 для режима холостого хода, $Z_H = \infty$, и идеального генератора напряжения $R_i = 0$.

Основная характеристика преобразования резонансного ВТП может быть представлена выражением $\dot{P}_1 = U_2/U_{20} = \dot{F}/(1 + Z_{1BH}/Z_1)$,

где $Z_1 = r_1 + j(\omega L - 1/\omega C)$, – импеданс контура, а r_1 и $(\omega L - 1/\omega C)$ – соответственно, активное и реактивное сопротивление контура последовательно резонансного ВТП первого вида.

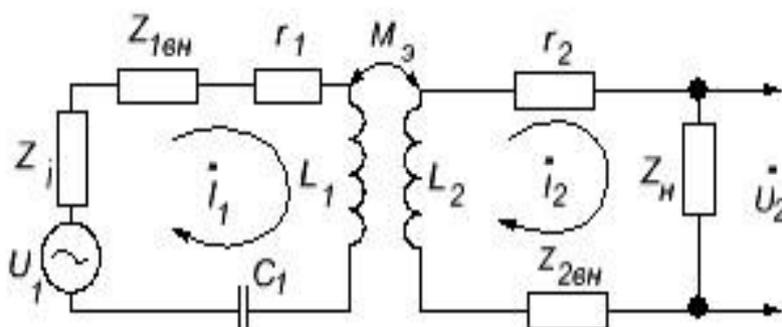


Рис. 1 – Эквивалентная схема последовательного резонансного ВТП первого вида

На резонансной частоте значение частоте значение

$$P_{10} = \dot{F} / (1 + Z_{1BH} / r_1), \quad (1)$$

где \dot{F} – функция преобразования ВТП, рассмотрена нами в работе [3], а Z_{1BH} – вносимый импеданс.

Можно показать, что для данного ВТП справедливо следующее соотношение:

$$Z_{1BH} / r_1 = j \frac{\omega K_1 L_1}{r_1} \dot{\varphi}_1 = j K_1 \dot{\varphi}_1. \quad (2)$$

Так как активные потери в конденсаторе малы по сравнению с потерями в катушке индуктивности L_1 , поэтому добротности катушки и в всего колебательного контура численно равны.

Введем понятие «добротность» ВТП V_1 , под которой будем понимать произведение добротности катушки индуктивности Q_1 , и коэффициента связи K_1 [1],

$$V_1 = K_1 Q_1 = V_{10} e^{-3\alpha_1 / 2}, \quad (3)$$

где V_{10} – максимальное значение добротности V_1 при $\alpha_1 = 0$, $V_{10} = K_{10} Q_1$.

Подставив (3) в (2) и (1) получим общее выражение для неполной характеристики преобразования

$$P_{10} = \frac{\dot{F}}{1 + j V_1 \dot{\varphi}_1}. \quad (4)$$

Воспользовавшись выражениями \dot{F} и $\dot{\varphi}$ для первого приближения, после некоторых математических преобразований, для условия $R_1 = R_2 = R$, получим

$$P_{10} = \frac{6\mu e^4 \sqrt{9 + j4\beta^2}}{6\mu \sqrt{9 + j4\beta^2} ch^4 \sqrt{9 + j4\beta^2} + (9\mu^2 + 9 + j4\beta^2) sh^4 \sqrt{9 + j4\beta^2} + 1} \times \frac{1}{(9\mu^2 + 9 + j4\beta^2) sh^4 \sqrt{9 + j4\beta^2} + jK_1 Q_1 (9\mu^2 - 9 - j4\beta^2) sh^4 \sqrt{9 + j4\beta^2}} \quad (5)$$

Чувствительность резонансного ВТП определяется модулем, аргументом и их производными. Анализ большинства встречающихся на практике случаев контроля, когда толщина тонких

неферромагнитных пленок значительно меньше радиуса возбуждающей катушки и глубины проникновения плоской электромагнитной волны $\zeta \ll 1, \zeta\beta \ll 1, \mu = 1, [1,2]$, показывает что характеристика (5) может быть представлена в более простом виде.

$$P_{10} = \frac{6}{6 + V_1 \gamma + j\gamma}. \quad (6)$$

Модуль и аргумент функции (6) можно представить в следующем виде:

$$P_{10} = \frac{6}{\sqrt{\left(6 + \gamma V_{10} e^{-\frac{3}{2}\alpha_1}\right)^2 + \gamma^2}}, \quad (7)$$

$$\varphi_{P0} = -\arcsin(\gamma P_{10} / 6). \quad (8)$$

Представляет интерес проанализировать зависимости модуля P_{10} и аргумента φ_{P0} , а также их производных P'_{10} и φ'_{P0} , от тех же параметров γ и α_1 как и в [1], для различных значений добротности V_{10} .

Продифференцировав функции (7) и (8) по параметру γ получим значения:

$$P'_{10} = -\frac{6V_1 + \gamma(V_1^2 + 1)}{36} P_{10}^3, \quad (9)$$

$$\text{tg } \gamma'_{P0} = -\frac{1}{6} P_{10}^3. \quad (10)$$

На рис. 2 представлены графики зависимости модуля $P_{10}(\gamma)$ и его производной $P'_{10}(\gamma)$ при различных значениях добротности резонансного преобразователя

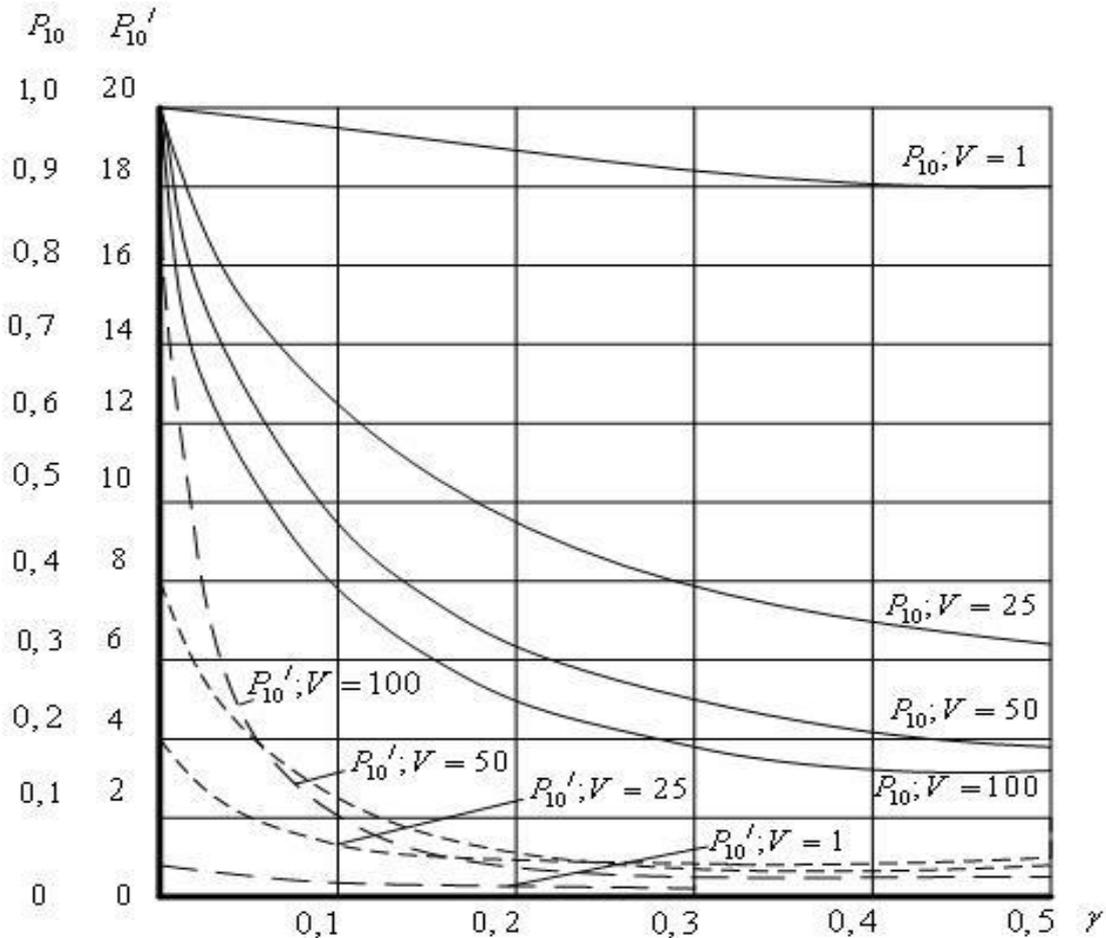


Рис. 2 – Зависимость модуля $P_{10}(\gamma)$ и производной $P'_{10}(\gamma)$ от параметра γ для резонансного ВТП первого вида

Анализ выражений (7) и (9) показывает, что с увеличением значения γ характеристика функции P_{10} уменьшается, т.е. имеет отрицательную производную с максимумом по отрицательному значению при $\gamma = 0$. Согласно (9)

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} P'_{10} = -V_1/6. \tag{11}$$

Численные значения модуля общей характеристики преобразования P_{10} , и аргумента (фазового сдвига), показал, что для резонансного преобразователя следует использовать амплитудный метод выделения полезной информации, который технически проще реализовать чем фазовый метод.

Анализ работы резонансных ВТП в ряде электрических режимов показывает, что включение возбуждающей обмотки ВТП в последовательный или параллельный контуры дает одинаковые функции преобразования, при условии если первый питать от генератора с малым внутренним сопротивлением ($R_i = 0$), а второй - с большим ($R_i = \infty$).

Выводы. Анализ функции преобразования для резонансной системы и аperiodической систем, ранее рассмотренной нами в работе [1], показывает, что в рабочей области ВТП, производная функции

преобразования P'_{10} , резонансного ВТП, имеет сравнительно большее значение аналогичной функции для аperiodического ВТП [3]. Смещение параметра γ в зону малых величин означает, что для выявления структурных дефектов тонких ферромагнитных пленок с помощью резонансного ВТП, оптимальная частота питающего тока может быть на 1–2 порядка ниже чем аperiodического. При этом максимальное значение производной функции преобразования резонансного ВТП, значительно больше аналогичной производной функции преобразования аperiodического ВТП. Сравнивая значение (11) и выражения для аperiodического ВТП, ранее показанное в работе [1], следует, констатировать, что:

- чувствительность резонансного ВТП определяется его добротностью;
- максимальная чувствительность резонансного ВТП больше чем такая же чувствительность аperiodического ВТП в 2 и более раз.

Анализ предельных значений фазы и ее производной выходного сигнала других типов исследуемых резонансных ВТП, рассмотренных нами в [3], показывает, что они не обладают существенно

большей чувствительностью к выявлению дефектов тонких неферромагнитных пленок, при значительно более сложном конструктивном исполнении и и настройки в рабочий режим.

Таким образом для выявления структурных дефектов тонких неферромагнитных пленок более эффективно применять последовательный резонансный ВТП первого вида.

Список литературы

1. *Світличний В.А.* Аналіз моделі аперіодичного екранного вихрострумowego перетворювача для контролю тонких неферромагнітних плівок / В.А. Світличний, Ю.Е. Хорошайло // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 51, – С. 117–125.
2. *Хорошайло Ю.Е.* Вихретоковый контроль тонких электропроводящих пленок и неэлектропроводящих покрытий / Ю.Е. Хорошайло, Г.М. Сучков, В.А. Светличный, В.Н. Ерошечков // Монография - Харків: «Щедра садиба плюс», 2014 –с.228.
3. *Світличний В.А.* Резонансна вихрострумова дефектоскопія тонких неферромагнітних плівок :

дисертація на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.11.13 / Світличний Віталій Анатолійович; М-во освіти і науки України, НТУ «ХПІ» ; наук. кер. Хорошайло Ю.Е. – Харків, 2015. – 196 с.

References (transliterated)

1. Svetlychny V.A. Analysis of the model of the aperiodic screen eddy current converter for control of thin non-ferromagnetic films / VA Svetlychny, Yu.E. Good news // Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". - Kharkiv: NTU "KhPI", 2013. – No. 51, - pp. 117-125.
2. Khoroshailo Yu.E. Eddy current control of thin electrically conductive films and non-conducting coatings / Yu.E. Khoroshailo, G.M. Suchkov, V.A. Svetlychny, V.N. Eroschenkov // Monograph - Kharkiv: "Generous Estate Plus", 2014 - 228 p.
3. Svetlychniy V. A. Resonance eddy-current defectoscopy of thin non-ferromagnetic films: a thesis for obtaining sciences. Degree Candidate Tech. Sciences: 05.11.13 / Svitlychniy Vitaliy Anatoliyovych; Ministry of Education and Science of Ukraine, NTU "KhPI"; Sciences Manager Khoroshailo Yu.E. - Kharkiv, 2015. - 196 p.

Поступила (received) 10.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Модель резонансного вихрострумowego перетворювача призначеного для контролю тонких неферромагнітних плівок / В. А. Світличний, Ю. Є. Хорошайло, М. А. Ампилогов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 68–71. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-4525.

Модель резонансного вихретокового преобразователя предназначенного для контроля тонких неферромагнитных пленок / В. А. Светличный, Ю. Е. Хорошайло, М. А. Ампилогов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 4 (1226). – С. 68–71. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-4525.

Model of resonant eddy current converter designed for control of thin non-ferromagnetic films / V. A. Svetlychny, Yu. E. Khoroshailo, M.A. Ampilogov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 4 (1226). – P. 68–71.– Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-4525.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Світличний Віталій Анатолійович – кандидат технічних наук, викладач кафедри, Харківський національний університет внутрішніх справ, м. Харків; тел.: (057) 739-88-22; e-mail: vit.svet@ukr.net.

Светличный Виталий Анатольевич - кандидат технических наук, преподаватель кафедры, Харьковский национальный университет внутренних дел, г. Харьков. тел. : (057) 739 88 22; e-mail: vit.svet@ukr.net.

Svetlychny Vitaliy Anatolyevich - Candidate of Engineering Science, Lecturer of the department, Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkov. Tel: (057) 739 88 22; E mail: vit.svet@ukr.net.

Хорошайло Юрій Євгенєвич, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057)–702–14–22.

Хорошайло Юрий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, тел.: (057) 702-14-22.

Khoroshaylo Yury Evgenievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, tel. : (057)–702–14–22.

Ампилогов Михайло Олександрович, студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057)–702–14–22.

Ампилогов Михаил Александрович, студент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харків, тел. : (057)–702–14–22.

Ampilogov Mikhail Aleksandrovich, student, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, tel.: (057)–702–14–22.