

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНОСИМЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ И АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ СКАНИРОВАНИИ СПИРАЛЬНОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПРОВОЛОКИ ПОЛЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Запропоновані критерії для оцінювання величин внесених індуктивностей та активних опорів при дослідженні спірального ферромагнітного дроту броні одножильних силових кабелів параметричним електромагнітним перетворювачем. Досліджена зміна запропонованих критеріїв в діапазоні частот від 100 Гц до 100 кГц при різному кроці спіралі. Обґрунтована можливість використання соленоїдів у якості датчиків для визначення впливу кроку накладання броні на втрати, що обумовлені протіканням повздожніх та вихрових струмів.

Предложены критерии для оценки величин вносимых индуктивностей и активных сопротивлений при исследовании спиральной ферромагнитной проволоки броні одножильных силовых кабелей параметрическим электромагнитным преобразователем. Исследовано изменение предложенных критериев в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц при различном шаге спирали. Обоснована возможность применения соленоидов в качестве датчиков для определения влияния шага наложения броні на потери, обусловленные протеканием продольных и вихревых токов.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде приложений кабельной техники возникает задача определения влияния конструктивных параметров элементов конструкции кабеля со сложной геометрической формой, в частности спиральной, на электромагнитные характеристики кабельной линии. Непосредственное определение экспериментальным путем такого влияния может быть затруднено, как вследствие необходимости иметь достаточно дорогостоящее оборудование, так и вследствие наличия сложной картины магнитного поля в элементах конструкции кабеля в реальных условиях. Последнее обстоятельство может быть обусловлено, например, явлениями искажения картины поля из-за необходимости учета магнитных полей не только от собственной жилы кабеля, но и от соседних кабелей линии. Учитывая сказанное, в некоторых случаях для приближенного определения влияния конструктивных параметров на электромагнитные характеристики кабельной линии, целесообразно обосновать использование электромагнитных преобразователей. В частности, с продольным зондирующим магнитным полем H_z , поскольку при исполнении их обмоток с достаточно большим отношением длины к диаметру зондирующее поле, по величине равно линейной плотности тока в соленоиде, с высокой степенью достоверности можно считать близким к однородному.

С учетом сложной геометрической формы исследуемого образца возникает необходимость учета и анализа некоторых факторов, определяющих импеданс датчика с образцом, и не учитываемых при зондировании продольным полем прямолинейных образцов. К таким факторам относится, например, радиус образующего цилиндра спирали. С увеличением шага спирали указанный выше фактор, в частности, может привести к необходимости работать при очень низком коэффициенте заполнения, который в практике применения электромагнитных преобразователей при контроле прямолинейных образцов определяется из следующего выражения [1, 2]:

$$\eta = a^2 / a_n^2 . \quad (1)$$

где a – радиус исследуемого образца, a_n – радиус электромагнитного преобразователя.

При контроле электромагнитных параметров прямолинейных образцов параметрическими электромагнитными преобразователями информацию об электромагнитных характеристиках изделия получают на основании измерения абсолютных значений приращений, как индуктивностей, так и активных сопротивлений [2, 3]. При зондировании продольным полем образцов со сложной геометрической формой, с учетом необходимости определения влияния какого-либо параметра образца (например, шага спирали) на электромагнитные параметры датчика, возникает также задача поиска новых критериев для определения влияния рассматриваемого параметра на индуктивные и активные характеристики датчика.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обоснование чувствительности активных и индуктивных характеристик параметрического вихретокового преобразователя к шагу наложения спиральной проволоки, а также выбор критериев для определения указанной чувствительности. Исследование характера изменения предложенных критериев в широком диапазоне частот.

КОРРЕЛЯЦИЯ ВНОСИМЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ И АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ СПИРАЛЬНОГО ОБРАЗЦА

С целью обоснования чувствительности импеданса параметрического электромагнитного преобразователя к шагу спирали, определенный интерес представляет исследование корреляции вносимых индуктивностей и активных сопротивлений при различном шаге наложения спиральной проволоки и при сканировании проволоки продольным магнитным полем в широком диапазоне частот. Для случая прямолинейного образца при расчете коэффициента линейной корреляции между указанными выше величинами естественно ожидать его значимости, поскольку

совокупный $tg\delta$ и соответствующая ему добротность схемы Q , при отсутствии влияния паразитных емкостей, будут определяться как активным сопротивлением, так и индуктивностью датчика. Так, для последовательной схемы замещения датчика [4].

$$tg\delta = \frac{U_R}{U_L} = \frac{R_s}{\omega L_s}, \quad (2)$$

где L_s – индуктивность, R_s – активное сопротивление, ω – угловая частота, U_R – падение напряжения на активном сопротивлении, U_L – падение напряжения на индуктивности.

В практике применения как трансформаторных, так и параметрических электромагнитных преобразователей, с целью нивелирования влияния краевых эффектов на результаты измерений, длина образца, обычно, принимается равной или несколько превышающей длину электромагнитного преобразователя. При контроле спиральных образцов, учитывая необходимость корректного сравнения величин вносимого импеданса при различном шаге спиральной проволоки, необходимо определить критерии для оценки величин вносимых индуктивностей и активных сопротивлений, независимые от длины датчика и образца.

Перед тем как формулировать критерии для спирального образца, целесообразно проанализировать корреляцию между значениями приращений индуктивности и активного сопротивления при контроле прямолинейных образцов при увеличении длины образца и связанным с этим увеличением длинны датчика. Учитывая указанное выше обстоятельство относительно совместного влияния L_s и R_s на $tg\delta$ схемы (формула (2)), естественно ожидать значимой линейной корреляции и между абсолютными значениями приращения активного сопротивления и индуктивности при увеличении длинны образца и датчика. Такая корреляция должна наблюдаться в широком диапазоне частот, за исключением, быть может, достаточно низких, на которых при данных конструктивных параметрах (сечение обмоточного провода датчика, сечение исследуемого образца, количество витков), слабо выражены действие скин-эффекта и реакция вихревых токов в исследуемом образце. А также слишком высоких, на которых ярко выражено действие размагничивающего фактора. Наличие или отсутствие значимой корреляции здесь будет определяться, очевидно, точностью измерительной аппаратуры и ее возможностями фиксировать малые приращения индуктивностей или сопротивлений.

В качестве примера можно привести коэффициенты корреляции между приращением указанных выше параметров датчика для соленоидов с диаметром $D_0 = 32$ мм, и с количеством витков $W_1 = 310$; $W_2 = 355$; $W_3 = 400$; $W_4 = 445$; $W_5 = 490$; $W_6 = 535$; $W_7 = 580$; $W_8 = 625$; $W_9 = 670$. Следует отметить, что отношение диаметра к длине для указанных соленоидов в зависимости от количества витков менялось от 5 (для соленоида с наименьшим количеством витков) до 10,9 (для соленоида с наибольшим количеством витков). Для соленоидов с наименьшим отношением диаметра к длине, по-видимому, нет возможности говорить о достаточной степени однородности зондирующего поля.

Данный фактор может оказывать свое влияние, как на величины вносимого импеданса, так и на собственную индуктивность датчика при отсутствии в нем образца. При измерениях длина прямолинейной проволоки во всех случаях совпадала с длиной соленоида.

Таблица 1

Собственные активные и индуктивные параметры датчика и величины их приращений

Исходные значения индуктивности и активного сопротивления датчика				Приращение индуктивности и активного сопротивления датчика с прямолинейным образцом			
10 кГц		100 кГц		10 кГц		100 кГц	
L , мкГн	R , Ом	L , мкГн	R , Ом	L , мкГн	R , Ом	L , мкГн	R , Ом
590	3,66	588,7	4,87	33	1,97	8,7	6,41
683	4,17	681	5,61	34,8	2,09	9,2	6,61
778	4,69	775	6,3	40	2,46	11,6	7,95
873	5,26	871	7,12	46	2,72	12,4	8,88
963	5,74	961	7,81	49,7	3,11	11,8	9,96
1049	6,28	1046	8,48	53	3,34	14	10,4
1131	6,8	1128	9,2	60,4	3,5	17	11,5
1231	7,35	1227	10,1	68	4,1	19,8	13
1310	7,9	1306	10,5	71	4,1	21,5	13,6

Для приведенных в таблице приращений индуктивности и активного сопротивления коэффициенты корреляции между этими величинами составляют 0,99 и 0,97, соответственно, для частот 10 кГц и 100 кГц. Указанное обстоятельство – следствие линейной зависимости, определяемой формулой (2). Увеличение значения приращений индуктивности и активного сопротивления здесь – следствие увеличения величины зондирующего магнитного потока при увеличении длинны соленоида. Таким образом, непосредственно величины приращений индуктивностей и активных сопротивлений не могут быть выбраны в качестве чувствительного критерия для оценки влияния шага наложения спирали на параметры датчика с образцом, поскольку в этих величинах находит свое отображение также и увеличение количества витков датчика, связанное с увеличением длинны образца при увеличении шага спирали. Зависимость этих параметров от длины соленоида подтверждается высокой корреляцией между приращениями индуктивностей и активных сопротивлений при увеличении длины исследуемого образца и датчика. Учитывая, что индуктивность датчика с образцом определяется полным потокосцеплением, то в качестве критерия N (с размерностью индуктивности), определяющего величину магнитного потока в датчике, независимого от его длинны, целесообразно принять отношение приращения индуктивности соленоида к его количеству витков. Так, для всех данных, приведенных в табл. 1, такое отношение составляет 0,1 мкГн для частоты 10 кГц. При частоте 100 кГц отношение приращения индуктивности к количеству витков уменьшается до 0,026-0,032 мкГн. Непостоянство данного отношения здесь вызвано, видимо, наличием некоторой дисперсии при измерениях на частоте 100 кГц, которая здесь более выражена, чем при измерениях на частоте 10 кГц. При частоте 1000 Гц отношение приращения индуктивности

к количеству витков принимает значение от 0,335 мкГн до 0,36 мкГн. При измерениях на частоте 100 Гц предложенный параметр для оценки величин вносимых индуктивностей принимает значения от 0,51 мкГн до 0,57 мкГн. Колебания этого параметра здесь, видимо, можно считать незначительными и связанными со случайными погрешностями измерений. Постоянство этого отношения, для прямолинейного образца является признаком работы на начальном участке кривой намагничивания. Таким образом, отношение приращения индуктивности к количеству витков является характеристикой датчика, независимой от его длины. В качестве критерия K , определяющего приращение активного сопротивления, целесообразно принять отношение приращения активного сопротивления к количеству витков соленоида. Для данных, приведенных в табл. 1, такое отношение составляет $5,8 \cdot 10^{-3} - 6,5 \cdot 10^{-3}$ при частоте 10 кГц и увеличивается до $18 \cdot 10^{-3} - 21 \cdot 10^{-3}$ при частоте 100 кГц (более выражено влияние скин-эффекта и реакция вихревых токов в исследуемом образце). При исследовании спиральной проволоки, при произвольном шаге ее наложения, с учетом сложности учета части индуктивности датчика, которая обусловлена магнитным потоком, пересекающим основание образующего цилиндра, а также возможных погрешностей измерения вопрос об исследовании корреляции предложенных критериев для величин приращения индуктивностей и активных сопротивлений требует дополнительного исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНОСИМОГО В ДАТЧИК ИМПЕДАНСА ПРИ РАЗНОМ ШАГЕ СПИРАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

С целью качественного определения влияния шага намотки ферромагнитной спиральной проволоки на параметры датчика были проведены ряд измерений импеданса датчика при различном шаге спирали, но при одном и том же радиусе образующего цилиндра спирали. Измерения проводились портативным цифровым измерителем иммитанса DE-5000. Тестовые частоты: 100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц. Уровень зондирующего сигнала 0,6 В. Диаметр образующего цилиндра спирали составлял 11 мм. Диаметр спиральной проволоки составлял 3 мм. Максимальный шаг спирали составлял 25 мм, 35 мм, 40 мм, 45 мм, 60 мм, 70 мм, 100 мм, 140 мм, 150 мм, соответственно, для количества витков датчика $W_1 = 310$; $W_2 = 355$; $W_3 = 400$; $W_4 = 445$; $W_5 = 490$; $W_6 = 535$; $W_7 = 580$; $W_8 = 625$; $W_9 = 670$. При этом следует отметить, что при одном и том же радиусе образующего цилиндра увеличение шага приводит к уменьшению количества витков исследуемого образца.

На рис. 1-5 приведены значения предложенного критерия для приращения индуктивности, в зависимости от количества витков катушки, при линейной регрессии.

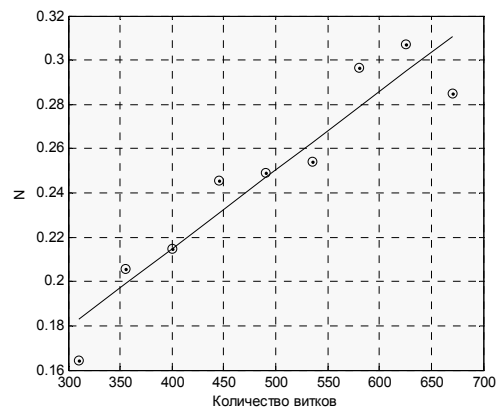


Рис. 1. Значения критерия для оценки вносимых индуктивностей в зависимости от количества витков соленоида при частоте 100 Гц

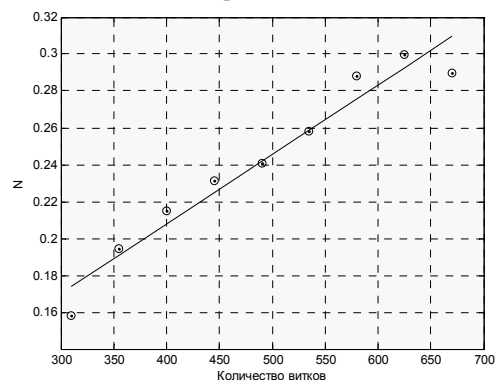


Рис. 2. Экспериментальные значения критерия для оценки вносимых индуктивностей в зависимости от количества витков соленоида при частоте 120 Гц

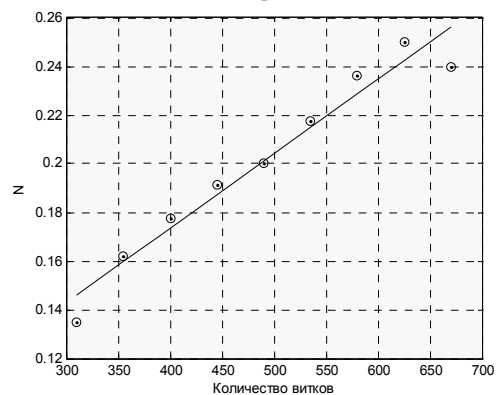


Рис. 3. Экспериментальные значения критерия для оценки вносимых индуктивностей в зависимости от количества витков соленоида при частоте 1 кГц

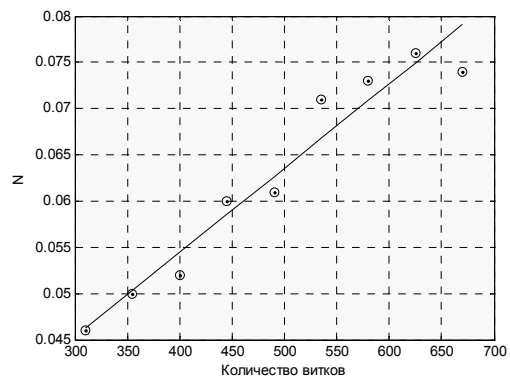


Рис. 4. Экспериментальные значения критерия для оценки вносимых индуктивностей в зависимости от количества витков соленоида при частоте 10 кГц

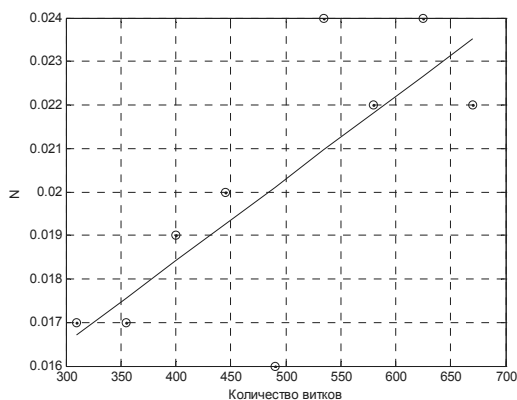


Рис. 5. Экспериментальные значения критерия для оценки вносимых индуктивностей в зависимости от количества витков соленоида при частоте 100 кГц

Увеличение критерия, равного отношению приращения индуктивности к количеству витков при увеличении их количества, вместе с увеличением шага спирали, свидетельствует об увеличении магнитного потока в датчике. Это связано с увеличением влияния продольной магнитной проницаемости проволоки, при увеличении шага спирали, на параметры датчика.

На рис. 6-7 приведены значения предложенного критерия для приращения активного сопротивления в зависимости от количества витков катушки для оценки величин вносимых активных сопротивлений при линейной регрессии при измерениях на частоте 100 кГц.

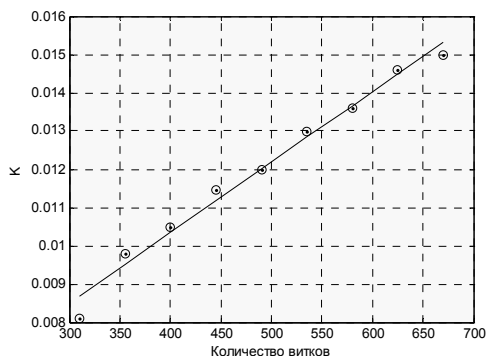


Рис. 6. Экспериментальные значения критерия для оценки вносимых активных сопротивлений в зависимости от количества витков соленоида при частоте 100 кГц

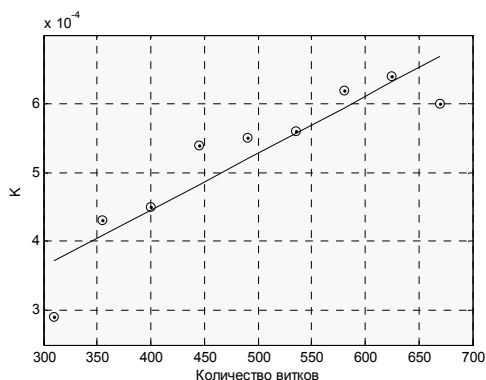


Рис. 7. Критерий для оценки вносимых активных сопротивлений при частоте 1 кГц

Следует отметить существенно меньшие значения критерия N для спирального образца по сравнению с прямолинейным образцом, при низких частотах

зондирующего поля. При частоте 100 Гц минимальное значение критерия N для прямолинейного образца составляет 0,51 в то же время максимальные значения критерия N для спирального образца составляет 0,3. При увеличении частоты указанная разница несколько уменьшается. При частоте 100 кГц максимальное значение критерия N составляет 0,032 для прямолинейного образца и 0,024 для спирального.

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ КРИТЕРИЯМИ ПРИРАЩЕНИЯ ИМПЕДАНСА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ ЗОНДИРУЮЩЕГО ПОЛЯ

Учитывая отмеченную выше корреляцию между приращениями активных сопротивлений и индуктивностей, следствие формулы (2), возникает интерес к определению корреляции между значениями предложенных критериев при одной и той же частоте зондирующего поля и при разном шаге наложения спиральной проволоки. Ожидать такую корреляцию тем более оправдано, с учетом монотонного возрастания критериев K и N с увеличением шага спирали и количества витков датчика. Так, при частоте зондирующего поля 1 кГц коэффициент корреляции между величинами предложенных критериев K и N составляет $r_{K,N(1 \text{ кГц})} = 0,96$. В то же время линейная корреляция между предложенными критериями, измеренными на частоте 100 Гц, практически отсутствует. Коэффициент корреляции здесь составляет $r_{K,N(0,1 \text{ кГц})} = 0,26$. При малом количестве результатов измерений говорить о значимости такого коэффициента корреляции нельзя. Коэффициент корреляции между предложенными критериями при частоте 100 кГц (данные на рис. 5 и рис. 6) составляет $r_{K,N(100 \text{ кГц})} = 0,77$. Причина уменьшения коэффициента корреляции – увеличение влияния погрешностей измерения, связанных с недостаточной чувствительностью прибора к малым приращениям активного сопротивления при измерениях на низких частотах и малым приращениям индуктивности при измерениях на высоких частотах. Наглядное действие таких погрешностей на величины критериев K и N видно, например, на рис. 5. Из результатов, приведенных на рис. 5, следует значительно более высокий разброс экспериментальных данных при частоте 100 кГц, чем при частоте 120 Гц (рис. 2). При контроле спиральных образцов, по сравнению с контролем прямолинейных, влияние случайных погрешностей существенно повышается, поскольку величины приращений индуктивностей и активных сопротивлений здесь существенно меньше.

ВЫВОДЫ

Показана достаточно высокая чувствительность импеданса параметрического вихретокового преобразователя к шагу спирального образца. Предложены критерии для оценки величин вносимых индуктивностей и активных сопротивлений при исследовании спиральной проволоки с учетом влияния шага спирали на параметры датчика. Характер изменения предложенных критериев с увеличением шага спирали связан с увеличением влияния продольной магнитной проницаемости и, соответственно, продольной компоненты напряженности магнитного поля H_z на параметры датчика с образцом.

С учетом различных длин датчиков и, соответствующих им, различных величин импеданса, которые определяют различную напряженность зондирующего магнитного поля на поверхности проволоки, анализ с применением предложенных критериев целесообразно проводить при работе на начальном участке кривой намагничивания. При исследовании в широком диапазоне частот, от 100 Гц до 100 кГц, на которых в различной степени выражено влияние скин-эффекта, различиями фактора, реакции вихревых токов в исследуемом образце совместное применение предложенных критериев целесообразно только при наличии между ними корреляции. Отсутствие корреляции указывает на существенные погрешности в измерениях какого-либо параметра. Совместное применение критериев наиболее целесообразно при промежуточных частотах, например, в диапазоне от 1 кГц до 10 кГц. Что верно, как минимум, при используемых здесь диаметре обмоточного провода катушки и диаметре проволоки стальной спирали. При низких и при высоких частотах целесообразно только применение одного из предложенных критериев. Соответственно, N при низких, и K при больших. Учитывая малые величины абсолютных значений предложенных критериев, вызванные необходимостью находить отношения приращения параметров датчика к его количеству витков, с целью показать увеличение магнитного потока в датчике, целесообразно их использование только для качественной оценки влияния продольной магнитной проницаемости на величину магнитного потока в контролируемом изделии при разном шаге спиральной проволоки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.Е. Бесконтактный вихретоковый преобразователь для контроля диаметра и удельного электрического сопротивления немагнитных цилиндрических изделий в полях различной ориентации // *Электротехника і електромеханіка*. – 2003. – №2. – С. 5-10.
2. Себко В.П., Юданова Н.Н., Ноздрачева Е.Л., Жаркова О.С. Расчет параметрического и трансформаторного электромагнитных преобразователей. – Х.: НТУ "ХПИ", 2004. – 72 с.
3. Егоров А.В., Поляков В.В., Иваков С.В. Измерительно-вычислительный комплекс для определения удельной электропроводности и магнитной проницаемости методом вихревых токов // *Ползуновский вестник*. – 2010. – №2. – С. 129-132.

4. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. – Х.: НТУ "ХПИ", 2012. – 108 с.

REFERENCES: 1. Bondarenko V.E. Beskontaktnyj vihretokovyy preobrazovatel' dlja kontrolja diametra i udel'nogo elektricheskogo soprotivlenija nemagnitnyh cilindricheskikh izdelij v poljah razlichnoj orientacii [Contactless eddy-current converter for diameter and specific conductivity control of cylindrical products in magnetic fields of different orientation]. *Elektrotehnika i elektromehaniка – Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no.2. pp. 5-10. 2. Sebko V.P., Judanova N.N., Nozdracheva E.L., Zharkova O.S. Raschet parametricheskogo i transformatornogo elektromagnitnyh preobrazovatelej [Calculation of parametric and transformer electromagnetic converters]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2004. 72 p. 3. Egorov A.V., Poljakov V.V., Ivakov S.V. Izmeritel'no-vychislitel'nyj kompleks dlja opredelenija udel'noj elektroprovodnosti i magnitnoj pronicaemosti metodom vihrevykh tokov [Metrical and calculative complex for determination specific conductivity and magnetic permeability by eddy-current method]. *Polzunovskij vestnik – The Polzunov Bulletin*, 2010, no.2. pp. 129-132. 4. Besprozvannyh A.V., Naboka B.G. Matematicheskie modeli i metody rascheta jelektroizoljacionnyh konstrukcij [Mathematical models and methods of calculation electrical insulation constructions]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2012. 108 p.

Поступила (received) 16.05.2014

*Костиуков Иван Александрович, аспирант,
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076010,
e-mail: Kostiukow.Ivan@yandex.ru*

*I.A. Kostiukov
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine*

Research on added inductance and resistance during spiral ferromagnetic wire scanning with magnetic field of a parametric eddy-current sensor.

Criteria for estimation of added inductance and resistance during spiral ferromagnetic wire scanning of single-core power cable armour by means of a parametric electromagnetic converter are proposed. Research into variation of the introduced criteria in the frequency range from 100 Hz up to 100 kHz for different wire spiral steps is done. Possibility of using coils as sensors for determination armour step influence on power losses caused by eddy-currents and circulating currents in power cable line is shown.

Key words – power cable, spiral wire, armour, axial magnetic permeability, eddy-current sensor.