

ИЗМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ ИНДУКТИВНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ

Г.А. Елгина, С.М. Слободян
(Национальный исследовательский
Томский политехнический университет)
Е.В. Ивойлов
(Филиал ОАО «РЖД» СП Трансэнерго)

Представлено исследование обмоток индуктивности как модели витковой топологии индуктивной структуры, проводящей ток, с замыканиями смежных витков. Изложена методика преобразования эквивалентных схем индуктивных структур с исходно однородной топологией витков и с нарушенной межвитковым замыканием топологией индуктивных структур в параметры эквивалентной схемы с межвитковыми замыканиями.

Ключевые слова: оценка, преобразование, замыкание, виток, модель, индуктивность.

Введение

В применяемых в области электромеханики механизмах, машинах и оборудовании, индуктивные элементы различного типа находят весьма широкое применение [1–13]: в устройствах управления электромагнитными подшипниками с обратной связью по магнитному потоку, называемых активными подшипниками; при реализации электромагнитного принципа бесконтактной передачи энергии, основанной на взаимодействии катушек с определёнными числами витков, аналогично открытому трансформатору; при передаче энергии на резонансных частотах с применением резонансных контуров (LC); в современных технологиях создания IP -модулей и СФ-блоков систем на кристалле на индуктивности, с величиной значений лежащих в интервале $0,1 - 10$ нГн и применяемых в схемах усилителей мощности, в составе активных фильтров СВЧ-диапазона, пассивных трансформаторов, устройствах оптической связи и т. д.

Поэтому вопрос о качестве технического состояния индуктивных структур, в том числе самого элемента – индуктивности, эффективности их функционирования, отражаемой величиной коэффициента полезного действия электромагнитного и электрического устройства, часто является определяющим для самого факта существования не только индуктивности как устройства, но и содержащих его машин и оборудования. Индуктивные структуры являются базовым элементом блоков бесконтактной передачи энергии [3–5], резонансных (LC) контуров [5–7] и реактивных шунтов, называемых реакторами [8, 9] и многих [1–3, 10–13] систем, выполненных на электромагнитном и индукционном принципе создания электро-

магнитного поля как источника воздействия на среды и объекты управления.

Цель и задачи анализа

Указанные обстоятельства определяют цель и задачи, изложенного ниже, анализа. Они приводят к необходимости изучения особенностей явления трансформирования замыканием смежных витков исходно однородной индуктивной структуры на примере резонансного контура шунта с целью определения взаимосвязи его параметров и закономерностей их изменения в трансформированной замыканием индуктивной структуре с однородно распределённой начальной топологией витков.

Это же обстоятельство определяет и актуальность задачи исследования влияния возникновения аварийных ситуаций, например, типа замыканий витков индуктивной структуры резонансного шунта, на эффективность функций, определённых проектировщиками при его применении [5–13].

В настоящей статье кратко изложены результаты исследования изменения функции преобразования индуктивной структуры с исходно однородной топологией витков при возникновении в ней нарушения вида замыкания смежных витков, меняющим топологию индуктивной структуры.

Основные положения исследования

Анализ литературных источников [1–13] показал, что витковые замыкания в индуктивных структурах создают проблемы не только из-за падения коэффициента полезного действия и снижения эффективности резонансного реактивного шунта в энергетике реактора [8, 9], но могут приводить к аварийному отказу в связанных с безопасностью

задачах типа [1, 2]. Закономерности поведения индуктивности типа резонансной структуры очень подробно для задач резонансного шунтирования, но в идеализированном представлении впервые были рассмотрены У. Петерсенем ещё в 1916 г. [8]. Влияние витковых замыканий на свойства и эффективность выполнения функций преобразования энергии индуктивностью в разных режимах её работы практически оставлены без надлежащего внимания. Физическая модель протекания процессов преобразования энергии для формирования электромагнитного воздействия на объекты и объяснения закономерности изменения этих процессов будут совершенно иными. Наличие межвиткового замыкания в индуктивности может существенно снизить эффективность её использования, либо к рассматриваемому электромагнитному воздействию она может оказаться неприменима.

Сущность принципа действия резонансного шунта, предложенного почти сто лет назад, не претерпела заметных изменений до настоящего времени: параметры резонансного устройства, как правило, индуктивной топологии, должны быть выбраны так, чтобы при возникновении замыкания в цепях нагрузки устройство настраивалось в резонанс с учётом ёмкости нагрузки. Формулировка правила Петерсена имеет вид:

$$\omega L_0 = \left[\sum_i \omega C_i \right]^{-1} \quad (1)$$

или задаётся в виде условия:

$$\omega^2 L_0 \sum_i C_i = 1, \quad (2)$$

где ω – частота воздействия напряжения электрического сигнала; L_0 – исходная величина индуктивности; C_i – ёмкости, вносимые в электрическую цепь индуктивной структуры разными элементами цепи, включая элементарные ёмкости межвитковой его топологии.

Приведённые соотношения отражают идею заземления электрического центра тяжести эквивалентной электрической цепи через эквивалентное реактивное сопротивление $Z_0 = \omega L_0$ резонансного контура шунта.

При анализе влияния ёмкостей цепей нагрузки $\sum_i C_i$ считают, что индуктивность в резонансном режиме настроена «более или менее точно» по условию резонанса (2). Известные методики оцен-

ки качества работы такого элемента не учитывают факт и физику явления возможного замыкания витков как нарушения топологии элемента резонансной индуктивности [8, 9]. Влияние же возможного нарушения его исходной топологии на условия резонанса упускается практически всеми исследователями. По-видимому, считают, что отмеченное обстоятельство не скажется на результатах исследований и полноте анализа электрических устройств и систем, а если данный факт нарушения и происходит, то его проявление считают малосущественным.

Постановка решения

Нарушение топологии витков индуктивной структуры, в зависимости от ранга нарушения, может приводить к разным явлениям: росту токов межвитковых утечек через слой изоляции, резкому снижению изоляционных свойств материала межвитковых промежутков, появлению очагов ионизации межвиткового промежутка – источника частичных разрядов, образованию неплотного с большим переходным сопротивлением контакта витков смежных в пространстве и витковой топологии, образованию полного замыкания смежных витков с очень малым переходным сопротивлением контакта и, наконец, образованию парных замыканий, обуславливающих формирование парных групп взаимных индуктивностей [11–14]. Например, в результате замыкания витков резонансный шунт может произвольно трансформироваться в высокочастотный (с большей или меньшей частотой среза) заградитель [8–11], выполняющий прямо противоположную функцию, а именно будет препятствовать выполнению функции выхода на резонанс как наиболее эффективный по энергосбережению режим работы. Такое проявление функции, противоположной основному предназначению резонансного шунта, обусловлено изменением из-за замыкания витков структуры его витковой топологии и величины его индуктивности, а также изменением его эквивалентной схемы ввиду её трансформирования в полосовой (сложный) фильтр. Такой фильтр в полосе подавления имеет весьма большое активное сопротивление (сопротивление изменённой его структуры может снижать коэффициент передачи сигнала на несколько порядков). Активное сопротивление и коэффициент передачи при нарушении витковой топологии резонансного шунта в сильной мере зависит от типа межвиткового замыкания структуры (G -, T - или Π -фильтра) с произвольно образованными элементами его частотной настройки. Причём может об-

разоваться множество вариантов структур с ослабленным основным резонансом: двух- и многократная резонансная; двух-, трёх- или многоконтурная широкополосная структуры фильтров и т. п.

Если следовать условию возникновения резонанса $Z_C = Z_L$, то можно найти ёмкость или частоту формы напряжений на линии, при которой трансформированная индуктивная структура в большей или меньшей мере сможет выполнять основную, предназначенную ей при проектировании, роль резонансного шунта:

$$C' = (4\pi^2 f^2 L_T)^{-1} \text{ и } f_T = (4\pi^2 C' L_T)^{-1/2}.$$

При образовании точкой замыкания смежных витков топологии из индуктивной структуры полюсового двухчастотного фильтра значение ёмкости, соответствующей верхней частоте настройки, определит формула:

$$C_B = (4\pi^2 f_B^2 L_T)^{-1}.$$

Тогда ёмкость C_H , соответствующая нижней частоте настройки фильтра трансформированного замыканием витков шунта, найдётся из соотношения:

$$C_H = C_B L_{T1} / L_{T2}.$$

Для ёмкости нагрузки при использовании резонансного контура как шунта в электрической линии:

$$C_H = C_B (f_B^2 f_H^2 - 1) [(4R + L_{T2}) / L_{T1}],$$

где f_H – нижняя частота полосы резонансной настройки ($\omega_H = 2\pi f_H$); $L_{T2} + L_{T1} = L_T$ – исходное значение индуктивности шунта.

Воспользуемся известным [13, 14] подходом эквивалентирования – замещения индуктивно связанного элемента некоторой эквивалентной схемой – цепью, которая не содержит в явной форме индуктивных связей. Принцип эквивалентирования существенно упрощает расчёты электрических цепей, придавая при этом большую наглядность особенностям физического взаимодействия. Поскольку напряжение, подаваемое на резонансный шунт, от одного источника питания, то токи, протекаю-

щие во всех витках его индуктивности и, конечно, в ответвлениях витковой топологии его индуктивной структуры, связаны линейными зависимостями. При одиночном, парном межвитковом и замыкании на землю (корпус) его индуктивная однородной топологии структура трансформируется в цепь отдельных индуктивностей взаимодействующих своими магнитными потоками, т. е. превращается в цепь с взаимной индуктивностью или индуктивно связанную цепь. В зависимости от вида межвиткового замыкания индуктивной структуры трансформированная замыканием структура может оказаться соединением «согласно включённых» частей индуктивности (с одинаковой ориентацией токов относительно направления намотки витков) или встречным включением частей структуры. В каждой части индуктивной структуры будет индуктироваться ЭДС, одновременно обусловленная собственным Ψ_C и потокосцеплением Ψ_M связанной с ней части:

$$-e_C = L_K \frac{di_K}{dt} \pm L_M \frac{di_M}{dt},$$

где $L_M = k_{cb} [L_{K1} / L_{K2}]$ – взаимная индуктивность частей шунта L_{K1} и L_{K2} до акта замыкания составлявших L_0 – его исходную индуктивность; $k_{cb} \leq 1$ – коэффициент связи, характеризующий меру взаимного влияния друг на друга частей L_{K1} и L_{K2} одной и той же изначально общей индуктивной структуры. Обычно знак «+» принимают при согласном включении частей индуктивности; знак «-» – при встречном их включении. При расчёте цепи по законам Кирхгофа дополнительное напряжение, обусловленное взаимной индукцией $U_M = \pm j\omega L_M$ учитывают как компоненту с учётом особенностей включения частей индуктивности.

В принципе последовательно и параллельно соединённые индуктивно связанные элементы шунта с замыканием могут быть представлены в виде эквивалентных схем без индуктивных связей, т. е. в виде, развязанном по индуктивным связям. Эквивалентная индуктивность при последовательном их соединении равна: в согласном включении $L_{0\exists} = L_2 + L_1 + 2L_M$; во встречном – $L_{0\exists} = L_2 + L_1 - 2L_M$. При развязке индуктивных связей частей индуктивности, имеющих общий узел, учитывают только расположение частей индуктивной топологии относительно точек их включения. Энергия от одной части индуктивности к другой передаётся

через общее магнитное поле индуктивно связанных частей.

При соблюдении технологии проектирования и изготовления индуктивно связанных структур применяют специальные типы намоток витковой топологии, обеспечивающие равномерное и пропорциональное количеству витков однородное распределение электромагнитных полей рассеяния по длине витковой топологии индуктивной структуры шунтов.

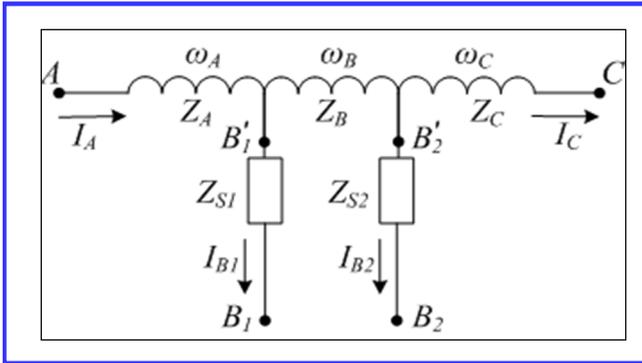


Рис. 1. Эквивалентная схема типичного парного межвиткового замыкания индуктивной структуры соленоида

Эквивалентная схема индуктивности однородной топологии для внутреннего замыкания витков и любого парного замыкания витков на землю (корпус) можно представить индуктивной структурой, приведённой на рис. 1, где A – вход; C – выход; B_1 и B_2 – точки замыкания витков структуры; Z_A, Z_B, Z_C – комплексные сопротивления участков AB_1, B_1B_2 и B_2C исходно однородной индуктивной структуры без учёта влияния взаимных индуктивных связей отдельных частей; Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{AC} – взаимные комплексные сопротивления соответствующих участков структуры.

С учётом ранее сделанного предположения линейной взаимозависимости параметров для токов, протекающих в индуктивной структуре, примем для упрощения записи следующие отношения: $I_{B1} = I_B, I_{B2} = K_1 I_B, K_1 = I_{B2} / I_{B1}$ – весовое отношение токов как особый признак координат точек парного замыкания. Например, $K_1 = 1$ будет соответствовать общей точке витков замыкания внутри однородной топологии. Приняв относительное число витков частей шунта AB_1 и B_1B_2 в виде коэффициентов $K_1 = \omega_1 / \omega_{K1}$ и $K_2 = \omega_2 / \omega_1$, комплексные сопротивления каждого из указанных участков в этом случае отразит система алгебраических соотношений аналогичная [15]:

$$\begin{cases} Z_A = Z_0 + Z_S; Z_B = K_1(K_1 Z_0 + Z_S); \\ Z_C = K_2(K_2 Z_0 + Z_S); \\ Z_{AB} = K_1 Z_0; Z_{BC} = K_1 K_2 Z_0; Z_{AC} = K_2 Z_0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z_{BC} = \sqrt{Z_B Z_C}; Z_{AB} = \sqrt{Z_A Z_B}; \\ Z_{AC} = \sqrt{Z_A Z_C}, \end{cases}$$

где Z_0 – полное комплексное сопротивление исходной индуктивности; Z_S – полное комплексное сопротивление рассеяния поля части AB_1 при условии замыкания витков в точке B_1 .

Используя методологию [14, 15] решения задачи нахождения значений параметров эквивалентной схемы соленоида с нарушенной замыканием витков топологией в изложенной выше постановке и опуская промежуточные алгебраические преобразования, придём к системе уравнений взаимосвязи, позволяющей определить основные параметры нарушенной замыканием топологии индуктивности:

$$\begin{cases} Z_1 = Z; Z_2 = (K_1 + K_2)Z; Z_3 = (1 + K_1)Z; Z_H = K_2 Z; \\ Z_{S1} = Z_{I2} = \frac{[K_1 K_2 + (K_1 + K_2)Z_S - (K_1 + K_2)Z]}{(1 + K_1 + K_2)}; \\ Z_{S2} = Z_{3H} = \frac{[(K_1^{-1} K_2 + K_2 + K_1 K_2)Z_S - (K_2 + K_1 K_2)Z]}{(1 + K_1 + K_2)}; \\ Z = 2[(1 + K_1 + K_2)Z_0 + Z_S], \end{cases}$$

где Z_1 и Z_2 – продольные и Z_{12} – поперечное комплексные сопротивления эквивалентной T -схемы первой точки замыкания; Z_3 и Z_4 – продольные и Z_{34} – поперечное комплексные сопротивления второй, параллельной первой, T -схемы второй точки замыкания; обе T -схемы своими входами подключены к входу A , а выходами – к C ; точки B_1 и B_2 – вторые точки подключения поперечных (т. $B_1 - Z_{12}$; т. $B_2 - Z_{34}$) сопротивлений соответствующих двух T -схем фильтров как индуктивных структур, образованных точками замыкания витков и трансформированных в полосовые T -схемы фильтров исходно однородной витковой топологии индуктивности.

В идеальной однородной витковой топологии индуктивности, сопротивлением рассеяния ($Z_S \cong 0$) можно пренебречь, по той причине, что основным фактором влияния на трансформированную замыка-

нием витков структуру T -схемы остаётся общий магнитный поток, создаваемый витковой топологией её структуры. Тогда [14, 15] в идеальной индуктивной структуре распределение напряжений на её выводах (A , B , C) при любом типе нагрузки будет пропорционально числу витков в структуре. Оно не будет зависеть от тока нагрузки I_C . При расчёте падения напряжения в структуре с нарушенной замыканием витков топологией и потому обладающей большим или меньшим сопротивлением рассеяния магнитного потока Z_S в поперечных отводах эквивалентных T -схем его структуры включаются сопротивления, учитывающие значение Z_S , которые и обуславливают падение напряжения при наличии нагрузки на выходе индуктивности с межвитковым замыканием.

Мера относительного влияния числа витков в замкнувшей группе – мощности межвиткового парного замыкания на коэффициент передачи индуктивности определит система уравнений:

$$\begin{cases} K_{1П} = Z_{S1}/Z_S = (K_1 K_2 + K_1 + K_2)/(1 + K_1 + K_2) \\ K_{2П} = Z_{S2}/Z_S = (K_1^{-1} K_2 + K_2 + K_1 K_2)/(1 + K_1 + K_2). \end{cases} (3)$$

При одиночном замыкании витков (замыкания на землю) снижение коэффициента передачи как меры влияния сопротивления рассеяния магнитного потока Z_S и факт подтверждения нарушения однородной топологии индуктивности определит простое выражение:

$$K_{1П} = K_1/(1 + K_1). \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) хорошо отражают характер закономерности ухудшения коэффициента передачи сигналов индуктивностью с нарушенной парным и одиночным замыканием витков исходно однородной топологии [10, 11].

Результаты и их обсуждение

Для наглядной иллюстрации характера поведения закономерности изменения коэффициента $K_2 = K_{2П}$ второго уравнения из системы уравнений (3) на рис. 2 приведена зависимость, иллюстрирующая монотонный характер относительного влияния мощности (изменения числа витков в замкнувшей парной группе) замыкания витков в средней части топологии индуктивности на её коэффициент передачи $K_{2П}$ при $\omega_a = 100$; $\omega_b = 1 \div 10$; $\omega_\Sigma = 100$.

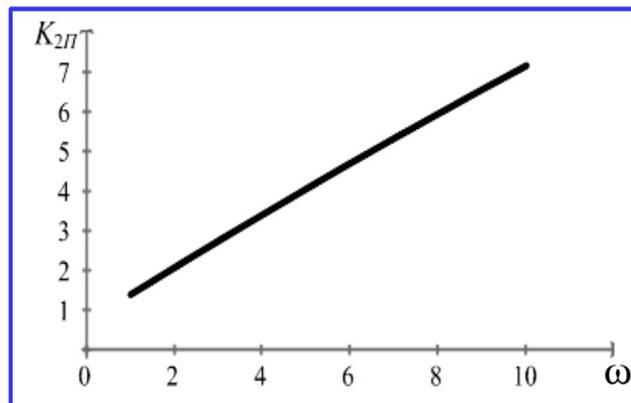


Рис. 2. Степень относительного влияния мощности межвиткового замыкания в средней части индуктивности соленоида на его коэффициент передачи напряжения $K_{2П}$ при $\omega_a = 100$; $\omega_b = 1 \div 10$; $\omega_\Sigma = 100$

Заключение

Авторами показана возможность оценки степени влияния одиночным и парным замыканием витков исходно однородной топологии индуктивности на эффективность её применения в различных устройствах. Выполнен теоретический анализ индуктивности резонансного шунта в предположении соответствия его конструкции индуктивной структуре однородной топологии, проводящей ток, при наличии и отсутствии замыканий витков. Исследован характер ухудшения коэффициента передачи шунта (контура) с нарушенной одиночным и парным замыканием витков исходно однородной топологии его структуры. Создана математическая модель шунта (контура) с нарушенной замыканием витков исходно однородной топологии его структуры.

Таким образом, применение изложенных подхода и методики оценки влияния витковых замыканий на изменение свойств, типа и способности к выполнению, исходно задаваемой индуктивности, функции преобразования электрической энергии, как одно из направлений, является решением проблемы получения количественного значения оценки величины снижения эффективности устройств электромагнитного воздействия при наличии виткового замыкания.

Литература

1. Верещагин В. П., Клабуков В. А., Рогоза А. В. Управление электромагнитными подшипниками с обратной связью по магнитному потоку // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2012. – Т. 131. – № 3. – С. 3–10.

2. Журавлёв Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчёт, применение / Ю. Н. Журавлёв. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
3. Афонская С. А., Афонский С. А., Дульцев А. А., Шепталин Д. С. Разработка блока бесконтактной передачи энергии для системы ориентации солнечной батареи космического аппарата // Вопросы электромеханики. Труды НИИ ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НИИ ВНИИЭМ», 2012. – Т. 129. – № 4. – С. 15 – 10.
4. Contactless power transfer to a rotating disk / J. P. C. Smeets, D. C. J. Krop, J. W. Jansen, E. A. Lomonova // Electromechanics and Power Electronics Group. – Eindhoven University of Technology, Netherlands, 2010. July. – P. 748 – 753.
5. High efficiency contactless energy transfer system with power electronic resonant converter / A. J. Moradewicz, M. P. Kazmierkowski // Electrotechnical Institute IEL, 04–703 Warsaw, Poland. – 2009. – Vol. 57. – № 4
6. Шахов С. Проектирование планарных трансформаторов // Компоненты и технологии. – 2003. – № 7.
7. Büyüktas K., Koller K., Müller K.-H., Geiselbrechtinger A. A New Process for On-Chip Inductors with High Q-Factor Performance // International Journal of Microwave Science and Technology. Vol. 2010, Article ID 517187, 9 p., doi: 10.1155/2010/517187, <http://www.hindawi.com/journals/ijmst/2010/517187/>.
8. Petersen W. Over currents and over voltages in systems with large ground fault current // E.T.Z. – 1916. – Vol. 37. – P. 129 – 131.
9. Willheim R., Waters M. Neutral grounding in high-voltage transmission / R. Willheim, M. Waters. – New York: John Wiley and Sons, 1953. – 414 p.
10. Елгина Г. А., Ивойлов Е. В., Деева В.С. Вектор Паравек в диагностике состояния вихревой структуры // Молодёжь и наука: труды X Всероссийской с международным участием научно-технической конференции: 15 – 25 апреля 2014 г., Красноярск: Сибирский федеральный университет, сайт: <http://conf.sfu-kras.ru/conf/mn2014/>.
11. Elgina G. A., Ivoylov E. V., Slobodyan S. M. Harmonic diagnostics structures inductive topology // [Digests 9th International Forum on Strategic Technology 2014, October 21 – 23, 2014. Chittagong University of Engineering and Technology, Bangladesh], in press.
12. Holmes D. G., Lipo T. A. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. – New Jersey: IEEE Press, Wiley-Interscience, 2003. – P. 259 – 381.
13. Kundur P. Power system stability and control / P. Kundur. – McGraw Hill: New York, 1994. – 1176 p.
14. Толстов Ю. Г., Теврюков А. А. Теория электрических цепей / Ю. Г. Толстов, А. А. Теврюков – М.: Высшая школа, 1971. – 296 с.
15. Тавдгиридзе Л. Н., Лобжанидзе Л. Н., Мелкумян Э. В. Преобразование и расчёт измерительных цепей с индуктивной связью // Электричество. – 1974. – № 9. – С. 83 – 84.
16. Слободян М. С., Слободян С. М. Модель динамики электрического контакта // Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 2. – С. 42 – 47.

Поступила в редакцию 20.08.2014

*Галина Александровна Елгина, аспирант,
Степан Михайлович Слободян, д-р техн. наук, профессор
(Институт природных ресурсов НИИ ТПУ),
т. (8-3822) 701-777. E-mail: sms_46@ngs.ru
Евгений Вячеславович Ивойлов, аспирант, электромеханик.*