

УДК 534.1:621.313

Е.В. Ивойлов, С.М. Слободян

## Изменение свойств индуктивности при замыкании витков на корпус

Представлено исследование обмоток индуктивности как модели витковой топологии индуктивной структуры, проводящей ток, с замыканиями смежных витков. Изложена методика преобразования принципа действия индуктивных структур с исходно однородной топологией витков и с нарушенной межвитковым замыканием топологией.

**Ключевые слова:** короткое замыкание, виток, модель, индуктивность.

Во многих областях науки и техники индуктивные элементы находят широкое применение [1–10]: 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  $0,1 \dots 10$  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, эффективности их функционирования, отражаемой величиной коэффициента полезного действия электромагнитного и электрического устройства часто является определяющим для самого факта существования не только самого индуктивного элемента, но и содержащих его машин и оборудования. Индуктивные структуры являются базовым элементом блоков бесконтактной передачи энергии [2–3], резонансных ( $LC$ ) контуров [3–5] и реактивных шунтов, называемых реакторами [6–7], и многих [1, 8–10] систем, выполненных с использованием электромагнитного индукционного принципа создания электромагнитного 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 выявления особенностей смены принципа действия при замыкании витков исходной индуктивной структуры на примере резонансного контура шунта с целью определения взаимосвязи его параметров и их изменения в трансформированной замыканием индуктивности с однородной 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 [3–10].

В настоящей статье кратко изложены результаты исследования изменения принципа действия индуктивной структуры с исходно однородной топологией витков при возникновении в ней замыкания витков на землю (корпус прибора), меняющего её топологию.

**Основные положения исследования.** Анализ источников [1–10] показал, что замыкания витков в индуктивных структурах создают проблемы не только из-за падения коэффициента полезного действия и снижения эффективности резонансного шунта, в энергетике – реактора [6–7], но могут приводить к аварийному отказу в связанных с безопасностью задачах типа [1]. Поведение индуктивности типа резонансной структуры подробно для задач резонансного шунтирования, но в идеализированном представлении впервые рассмотрены У. Петерсеном в 1916 г. [6]. Влияние замыканий витков на эффективность выполнения заданных индуктивности функций 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 замыкания витков в индуктивности может так снизить эффективность её использования, что к электромагнитному воздействию она может оказаться неприменима.

Суть принципа действия резонансного шунта, предложенного сто лет назад, не претерпела заметных изменений до настоящего времени: параметры резонансного устройства, как правило индуктивной топологии, должны быть выбраны так, чтобы при замыкании в цепи нагрузки устройство настраивалось в резонанс с учетом емкости нагрузки. Формулировка правила Петерсена имеет вид

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

или задается в виде условия

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

где  $\omega$  – частота воздействия электрического сигнала;  $L_0$  – исходная величина индуктивности;  $C_i$  – емкости, вносимые в электрическую цепь элементами индуктивной структуры, включая элементарные емкости топологии её витков. Соотношения (1) и (2) отражают идею заземления электрического центра тяжести эквивалентной электрической цепи через эквивалентное реактивное сопротивление  $Z_0 = \omega L_0$  резонансного контура шунта.

При анализе влияния емкостей цепей нагрузки  $\sum_i C_i$  считают, что индуктивность в резонансном режиме настроена «более или менее точно» по условию резонанса (2). Известные методики оценки качества работы такого элемента не учитывают факт и физику явления возможного замыкания витков как нарушения топологии элемента резонансной индуктивности [6–7]. Влияние же нарушения его исходной топологии на условия резонанса упускается практически всеми исследователями. По-видимому, считают, что нарушение не скажется на результатах исследований и полноте анализа электрических устройств и систем, а если 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 этого материала, к очагам ионизации межвиткового промежутка – источника частичных разрядов, образованию неплотного контакта витков с большим переходным сопротивлением, смежных в пространстве и топологии, образованию полного замыкания витков с очень малым сопротивлением контакта и, наконец, образованию парных замыканий, обуславливающих формирование групп взаимных индуктивностей [9–11]. В результате замыкания витков резонансный шунт может произвольно превратиться в высокочастотный (с частотой среза) заградитель [6–8], выполняющий прямо противоположную функцию, а именно, будет препятствовать входу в резонанс как наиболее эффективный по энергосбережению режим работы. Такое проявление функции, противоположной предназначению резонансного шунта, обусловлено изменением при замыкании витков структуры топологии и величины индуктивности, а также изменением его эквивалентной схемы в полосовой (сложный) фильтр. Такой фильтр в полосе подавления имеет большое активное сопротивление (оно может снижать коэффициент передачи сигнала на несколько порядков). Активное сопротивление и коэффициент передачи при нарушении топологии резонансного шунта зависят от типа межвиткового замыкания структуры (Г-, Т- или П-фильтра) с произвольно образованными элементами его частотной настройки. Причем может образоваться множество вариантов структур с ослабленным основным резонансом: двух- и многочастотная резонансная; двух-, трех- или многоконтурная широкополосная структуры фильтров и т.п.

Если следовать условию возникновения резонанса  $Z_C = Z_L$ , то можно найти емкость или частоту напряжений на линии, при которой изменённым замыканием индуктивная структура в определённой мере сможет выполнять 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 витков топологии из индуктивной структуры полосового двухчастотного фильтра емкость, соответствующую верхней частоте настройки, определит формула  $C_B = (4\pi^2 f_B^2 L_T)^{-1}$ . Тогда емкость  $C_H$ , соответствующая нижней частоте настройки фильтра трансформированного замыканием витков шунта, найдётся из соотношения

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

Для емкости нагрузки при использовании резонансного контура как шунта в электрической линии

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

где  $f_H$  – нижняя частота полосы резонансной настройки ( $\omega_H = 2\pi f_H$ );  $L_{T2} + L_{T1} = L_T$  – исходное значение индуктивности шунта, разделённое на две составляющие точкой замыкания (без учёта фактора самоиндукции).

Воспользуемся известным [10–11] подходом эквивалентирования – замещения индуктивно связанного элемента некоторой эквивалентной схемой – цепью, которая не содержит в явной форме индуктивных связей. Принцип эквивалентирования существенно упрощает расчеты цепей, придавая большую наглядность особенностям физического взаимодействия. Поскольку напряжение, подаваемое на резонансный шунт, от одного источника питания, то токи, протекающие во всех витках его индуктивности и, конечно, в ответвлениях топологии его индуктивной структуры, связаны линейно. При одиночном, парном и замыкании витков на землю (корпус) его индуктивная однородной топологии структура преобразуется в цепь индуктивностей, взаимодействующих своими магнитными потоками, т.е. превращается в цепь с взаимной индуктивностью или индуктивно связанную цепь. В зависимости от вида замыкания топологии трансформированная замыканием структура может быть соединением «согласно включенных» частей индуктивности (с одинаковой ориентацией токов относительно направления намотки витков) или встречным включением частей структуры. В каждой части индуктивной структуры будет индуцироваться ЭДС, одновременно обусловленная собственным  $\psi_c$  и потокоцеплением  $\psi_m$  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 замыкания составлявших  $L_0$  – 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 расчете цепи по законам Кирхгофа дополнительное напряжение, обусловленное взаимной индукцией  $U_M = \pm j\omega L_M$ , учитывают как компоненту с учетом особенностей включения частей индуктивности.

В принципе последовательно и параллельно соединенные 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 –  $L_{0\Omega} = L_2 + L_1 + 2L_M$ ; во встречном –  $L_{0\Omega} = L_2 + L_1 - 2L_M$ . Энергия от одной части к другой передаётся через общее магнитное поле индуктивно связанных частей.

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

Эквивалентную схему индуктивности однородной топологии для внутреннего замыкания витков и любого парного замыкания витков на землю (корпус) можно представить индуктивной структурой, приведенной на рис. 1.

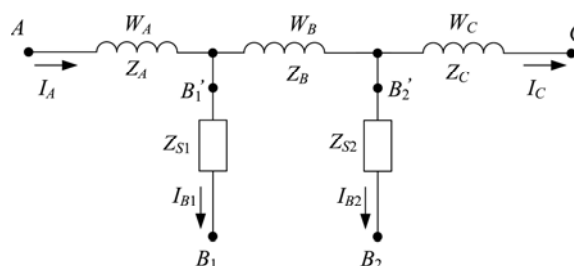


Рис. 1. Иллюстрация эквивалентной схемы типичного парного замыкания витков индуктивной структуры

На рис. 1 обозначено:  $A$  – 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 индуктивности

без учета влияния взаимных индуктивных связей отдельных частей;  $W_i$  – количество витков соответствующих участков;  $Z_{AB1}$ ,  $Z_{B1B2}$ ,  $Z_{B2C}$  – взаимные комплексные сопротивления соответствующих её участков. При линейной зависимости параметров для токов, протекающих в индуктивности, примем для упрощения:  $I_{B1} = I_B$ ,  $I_{B2} = K_I I_B$ ,  $K_I = I_{B2} / I_{B1}$  – отношение токов как особый признак координат точек парного замыкания. Например,  $K_I = 1$  соответствует общей точке замыкания витков однородной топологии. При относительном числе витков частей шунта  $AB_1$  и  $B_1B_2$ , выраженных в виде коэффициентов  $K_1 = W_A / W$  и  $K_2 = W_B / W_A$ , комплексные сопротивления каждого из указанных участков отразит система соотношений, аналогичная [12]

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

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 [11–12] решения задачи нахождения значений параметров эквивалентной схемы индуктивности с нарушенной замыканием витков топологией в изложенной постановке, и опуская промежуточные алгебраические преобразования, придем к системе уравнений, позволяющей определить параметры нарушенной замыканием топологии индуктивности:

$$\begin{cases} Z_1 = Z; Z_2 = (K_1 + K_2)Z; Z_3 = (1 + K_1)Z; Z_H = K_2 Z; \\ Z_{S1} = Z_{12} = \frac{[K_I K_2 + (K_1 + K_2)Z_S - (K_1 + K_2)Z]}{(1 + K_1 + K_2)}; \\ Z_{S2} = Z_{3H} = \frac{[(K_I^{-1} K_2 + K_2 + K_1 K_2)Z_S - (K_2 + K_1 K_2)Z]}{(1 + K_1 + K_2)}; \\ Z = 2[(1 + K_1 + K_2)Z_0 + Z_S]. \end{cases}$$

Здесь:  $Z_1$  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 топологии индуктивности.

В идеальной однородной топологии индуктивности сопротивлением рассеяния ( $Z_S \cong 0$ ) можно пренебречь по той причине, что основным фактором влияния на преобразованную замыканием витков структуру  $T$ -схемы остается общий магнитный поток, создаваемый витками её структуры. Тогда [11–12] в идеальной индуктивности распределение напряжений на ее выводах ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) при любом типе нагрузки будет пропорционально числу витков в структуре. Оно не будет зависеть от тока нагрузки ( $I_C$ ). При расчете падения напряжения в структуре с замыканием витков топологией, потому обладающей сопротивлением рассеяния магнитного потока  $Z_S$  в поперечных отводах эквивалентных  $T$ -схем 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:

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

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

$$K_{1\Pi} = K_1 / (1 + K_1). \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) хорошо отражают характер ухудшения коэффициента передачи сигналов индуктивностью с замыканием витков топологии [8].

**Результаты и их обсуждение.** При неплотном контакте замыкания витков в средней части индуктивности с хорошей долей приближения к реальности схему индуктивной структуры можно представить в виде фильтра низкой частоты (ФНЧ) симметричного *T*-образного четырехполюсника (рис. 2) с равными по значению индуктивными продольными плечами  $L/2$  ( $L$  – исходное значение индуктивности катушки).

Зависимость изменения коэффициента  $K_2=K_{2П}$ , получаемая согласно второму уравнению из системы уравнений (3), имеет монотонный характер и показывает степень относительного роста влияния мощности ( $W$  – числа витков в замкнувшей группе) замыкания витков в средней части топологии индуктивности с общим числом  $W_{\Sigma} = 200$  витков от числа замкнувших витков на  $K_{2П}$  – коэффициент передачи сигнала индуктивностью при наличии замыкания (для  $W_a = 100$ ;  $W_b \equiv W = 1 \div 10$ ;  $W_{\Sigma} = 200$ ), приведена на рис. 3.

**Заключение.** Авторами показана возможность оценки меры влияния факта замыкания витков исходно однородной топологии индуктивности на эффективность выполнения ею возложенных на индуктивный элемент функций при её применении в различных радио- и электротехнических устройствах. Выполнен теоретический анализ изменения принципа действия индуктивности как элемента в предположении соответствия его конструкции индуктивной структуре однородной топологии, проводящей ток, при наличии и отсутствии замыканий витков. Исследован характер ухудшения коэффициента передачи катушки индуктивности с учётом собственной ёмкости и ёмкости области контактного соприкосновения витков как некоторого контура (фильтра) с нарушенной замыканием витков исходно однородной топологии его структуры. Создана математическая модель эквивалентной схемы замещения катушки индуктивности с нарушенной замыканием витков исходно однородной топологии её структуры. Таким образом, применение изложенных в настоящей статье подхода и методики оценки влияния витковых замыканий на изменение принципа действия, типа и способности к выполнению исходно задаваемой катушке индуктивности, функции преобразования электрической энергии как одно из направлений, является решением проблемы получения количественной оценки степени снижения эффективности индуктивных устройств электромагнитного воздействия поля при наличии в катушке замыкания.

*Литература*

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчёт, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
2. 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.
3. High efficiency contactless energy transfer system with power electronic resonant converter / A.J. Moradewicz, M.P. Kazmierkowski // Electrotechnical Institute IEI, 04–703 Warsaw, Poland. – 2009. – Vol. 57, № 4. – P. 33–36.
4. Шахов С. Проектирование планарных трансформаторов // Компоненты и технологии. – 2003. – № 7. – С. 6–7.
5. A New Process for On-Chip Inductors with High Q-Factor Performance / K. Büyüktas, K. Koller, K.-H. Müller, A. Geiselbrechtner // 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/

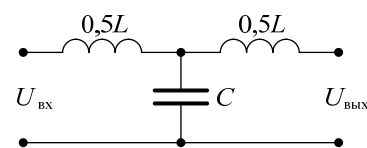


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения катушки индуктивности при замыкании в средней части её топологии витков:  $U_{вх}$  – входной сигнал;  $U_{вых}$  – выходной сигнал;  $C$  – ёмкость контакта в области замыкания;  $L$  – исходное значение индуктивности катушки.

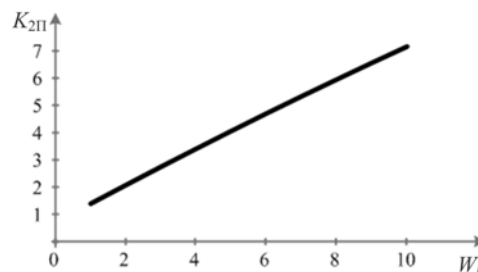


Рис. 3. Влияние мощности межвиткового замыкания в средней части катушки индуктивности на  $K_{2П}$  – коэффициент передачи ею сигнала при:  $W_a = 100$  витков;  $W_b = 1 \div 10$  витков;  $W_{\Sigma} = 200$  витков

6. Petersen W. Over currents and over voltages in systems with large ground fault current // E.T.Z. – 1916. – Vol. 37. – P. 129–131.
7. Willheim R. Neutral grounding in high-voltage transmission / R. Willheim, M. Waters. – New York: John Wiley and Sons, 1953. – 414 p.
8. Веер Паравея в диагностике состояния вихревой структуры / Г.А. Елгина, Е.В. Ивойлов, В.С. Деева // Молодежь и наука: труды X Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф.: 15–25 апреля 2014 г., Красноярск: Сибирский федеральный университет, сайт: <http://conf.sfu-kras.ru/conf/mn2014/>.
9. Holmes D.G. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice / D.G. Holmes, T.A. Lipo. – New Jersey: IEEE Press, Wiley-Interscience, 2003. – P. 259–381.
10. Kundur P. Power system stability and control. – New York: McGraw Hill, 1994. – 1176 p.
11. Толстов Ю.Г. Теория электрических цепей / Ю.Г. Толстов, А.А. Теврюков. – М.: Высшая школа, 1971. – 296 с.
12. Преобразование и расчёт измерительных цепей с индуктивной связью / Л.Н. Тавдгиридзе, Л.Н. Лобжанидзе, Э.В. Мелкумян // Электричество. – 1974. – № 9. – С. 83–84.

---

**Ивойлов Евгений Вячеславович**

Аспирант Института природных ресурсов

Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ)

Тел.: 8-903-068-89-20

Эл. почта: zhekaiv@mail.ru

**Слободян Степан Михайлович**

Д-р техн. наук, профессор Института природных ресурсов НИТПУ

Тел.: 8-952-886-72-24

Эл. почта: sms\_46@ngs.ru

Ivoylov E.V., Slobodyan S.M.

**Inductive structure variation during interturn short circuits on the housing**

The paper presents the original theoretical and experimental research of the inductance as a model of coil inductive topology of current conductive structure, with short circuits of adjacent turns. We propose the methodology for conversion techniques of inductive coil structures of equivalent circuits with initially homogeneous topology of turns and violated by interturn fault inductive coil structure short circuit topology within the parameters of the equivalent circuit of the inductive with interturn fault short circuit is proposed.

**Keywords:** estimation, closing, turn, model, inductive.