

4. Пат. 2464755 Российская Федерация, МПК А01В35/16, А01В35/18. А01В39/20. Рабочий орган культиватора / В.И. Курдюмов, Е.С. Зыкин, И.А. Шаронов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА». – № 2011145008/13; заявл. 07.11.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. № 30.

5. Курдюмов В.И., Зыкин Е.С. К обоснованию угла атаки плоского диска рабочего органа гребневой сеялки // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 4 (20). – С. 127-130.

References

1. Pat. 2443094 Rossiiskaya Federatsiya, MPK A01V79/02, A01G1/00. Sposob vozdeystviya propashnykh kul'tur / V.I. Kurdyumov, E.S. Zykin; заявитель i patentoobladatel' FGOU VPO «Ul'yanovskaya GSKhA». – № 2010141211/13; заявл. 07.10.2010; opubl. 27.02.2012, Byul. № 6.

2. Pat. 2507730 Rossiiskaya Federatsiya, MPK A01V39/18. Propashnoi kul'tivator / V.I. Kurdyumov, E.S. Zykin; заявитель i paten-

toobladatel' FGBOU VPO «Ul'yanovskaya GSKhA im. P.A. Stolypina». – № 2012137736/13; заявл. 04.09.2012; opubl. 27.02.2014, Byul. № 6.

3. Pat. 2507729 Rossiiskaya Federatsiya, MPK A01V35/00. Propashnoi kul'tivator / V.I. Kurdyumov, E.S. Zykin; заявитель i patentoobladatel' FGBOU VPO «Ul'yanovskaya GSKhA im. P.A. Stolypina». – № 2012136083/13; заявл. 21.08.2012; opubl. 27.02.2014, Byul. № 6.

4. Pat. 2464755 Rossiiskaya Federatsiya, MPK A01V35/16, A01V35/18. A01V39/20. Rabochii organ kul'tivatora / V.I. Kurdyumov, E.S. Zykin, I.A. Sharonov; заявитель i patentoobladatel' FGBOU VPO «Ul'yanovskaya GSKhA». – № 2011145008/13; заявл. 07.11.2011; opubl. 27.10.2012, Byul. № 30.

5. Kurdyumov V.I., Zykin E.S. K obosnovaniyu ugla ataki ploskogo diska rabochego organa grebnevoi seyalki // Vestnik Ul'yanovskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii. – 2012. – № 4 (20). – S. 127-130.



УДК 621.315: 620.193

Г.А. Елгина, Е.В. Ивойлов, С.М. Слободян
G.A. Yelgina, Ye.V. Ivoylov, S.M. Slobodyan

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАМЫКАНИЙ В РЕЗОНАНСНОМ ШУНТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

ESTIMATION OF CLOSINGS EFFECT IN RESONANT SHUNT OF ELECTRICAL GRID

Ключевые слова: оценка, эффективность, контакт, виток, модель, индуктивность реактор.

Представлено оригинальное теоретическое и экспериментальное научное исследование индуктивности реактора как модели витковой топологии индуктивной структуры, проводящей ток, с замыканиями смежных витков. Показаны особенности аппаратной реализации физической модели реактора на примере описания её практического исполнения и приведены фрагменты закономерностей, полученных на конкретных практических моделях индуктивности, что позволяет более чётко увязать при испытаниях реактора искажения

тестового сигнала с особенностями нарушений его топологии. Использовано преобразование замены электрической цепи индуктивной структуры реактора с точками замыкания витков как токовыми отводами в эквивалентную ей схему без взаимных индуктивностей. Предложена методика преобразования эквивалентных схем индуктивных структур реактора с исходно однородной топологией витков и с нарушенной межвитковым замыканием топологией индуктивных структур реактора в параметры эквивалентной схемы реактора с межвитковыми замыканиями. Для этого введены коэффициенты, определяемые отношениями токов в точках замыкания, величина которых зависит

от координат места замыкания витков и мощности группы межвиткового замыкания. Приведены рекомендации применения и распространения методики оценки влияния межвиткового замыкания на особенности трансформирования схем и выполняемых функций преобразования энергии индуктивной структурой реактора с исходно однородной топологией витков в индуктивно сложные полосовые (по частотному распределению коэффициента передачи) структуры с нарушенной межвитковым замыканием топологией витков. Показано, что предложенная методика проведенного топологического анализа влияния межвиткового замыкания на трансформирование схем и осуществляемых индуктивной структурой реактора функций преобразования может быть распространена на анализ любых цепей индуктивных структур и эквивалентных схем цепи реактора, в том числе с учётом влияния свойств, характера и особенностей цепи нагрузки реактора.

Keywords: estimation, effectiveness, contact, turn, model, inductance, reactor.

The original theoretical and experimental research of the reactor inductance as a model of coil inductive topology of current conductive structure, with short circuits of adjacent turns is presented. The features of the hardware implementation of a physical model of the reactor by the example of the description of its practical implementation are shown. The fragments of laws, obtained on practical models of in-

ductance, which allows linking more clearly the test signal with the features of violations of its topology, are presented. The conversion of inductive structure circuit with short circuit points as current circuit terminals into equivalent circuit without mutual inductances is used. The methodology for conversion techniques of inductive coil structures 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 reactor with interturn fault short circuit is proposed. To do this, we introduce the coefficients determined by the ratio of currents in the points of the closure, the value of which depends on the coordinates of the fault and turns power group interturn circuit. The recommendations of the application and distribution of the methodology to estimate the impact of the interturn fault on features of circuits transformation and functions of energy conversion of inductive coil structure with initially homogeneous turns topology in inductively complex bandpass (according to the frequency distribution of the transfer coefficient) structure with interturn short circuit of topology turns are proposed. It is shown that the proposed methodology of the topological analysis of the impact of the interturn fault transformation circuits and the inductive coil structure transformation functions may be extended to the analysis of any circuit of inductive structure and equivalent circuits of the reactors, taking into account the influence of the properties, nature and characteristics of the reactor load circuit.

Елгина Галина Александровна, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Тел.: (3822) 563-821. E-mail: galinaelgina@mail.ru.

Ивойлов Евгений Вячеславович, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: zhekaiv@mail.ru.

Слободян Степан Михайлович, д.т.н., проф., каф. прикладной математики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: sms_46@ngs.ru.

Yelgina Galina Aleksandrovna, Post-Graduate Student, Natl. Research Tomsk Polytechnic University. Ph.: (3822) 563-821. E-mail: galinaelgina@mail.ru.

Ivoylov Yevgeniy Vyacheslavovich, Post-Graduate Student, Natl. Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: zhekaiv@mail.ru.

Slobodyan Stepan Mikhaylovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Chair of Applied Mathematics, Natl. Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: sms_46@ngs.ru.

Введение

Одним из основных распространённых способов поддержания высокой эксплуатационной надёжности элементов сложной техники является эффективный контроль и диагностика состояния объекта наблюдения или его параметров [1-3]. Методы диагностики состояния объекта наблюдения индуктивной структуры могут использовать различных участки диапазона электромагнитного спектра сигналов [4-16]: оптический, инфракрасный, акустический, тепловой и т.п. Диагностика состояния силовых электрических трансформаторов в процессе работы и обслуживания входит в перечень профилактических мероприятий по поддержанию их работоспособности [9-13]. Выявление нарушений индуктивных структур на ранней стадии их развития, определение вида нарушения и путей их устранения для эксплуатации весьма важно.

Распространённым методом электромагнитного подавления случайно возникающих или детерминировано нежелательных процессов и явлений в слабых и мощных электрических цепях является их резонансное шунтирование. Впервые принцип резонансного шунтирования применён У. Петерсеном (W. Petersen) [4-5] в 1916 г. для подавления дуговых процессов при с замыкании на землю линий и систем генерации электрической энергии. За сто лет сущность принципа резонансного шунтирования не претерпела заметных изменений: параметры шунта – устройства, как правило, индуктивной топологии, должны быть выбраны так, чтобы при возникновении замыкания в цепях нагрузки шунтирующее устройство настраивалось в резонанс с учетом емкости нагрузки системы. Математическая формулировка правила Петерсена имеет два вида:

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

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

отражающего заземление электрического центра тяжести эквивалентной электрической или электроэнергетической системы через эквивалентное реактивное сопротивление $Z_0 = \omega L_0$ резонансного шунта. Смысл условий (1) и (2) заключается в том, что емкостной ток нагрузки, шунтируемой при резонансе шунта, и ток, протекающий (при резонансе) через реактивное сопротивление индуктивного шунта, компенсируют друг друга в точке замыкания в линии нагрузки. Существует широкое многообразие путей применения и вариантов реактивного шунта. Значения его параметров определяются особенностями требований, предъявляемых к шунтам, в реальных задачах и областях их конкретного использования [4-18]. Обратим внимание на то, что при создании индуктивных устройств для резонансного шунтирования процессов и явлений принимают за основу постоянство индуктивности $L_0 = const$, определенной условиями применения, и ω – частоты изменения нежелательного сигнала возмущающего электрического воздействия при произвольности ее изменения в некотором диапазоне значений емкостей элементов защищаемой от замыкания нагрузки – подключенной сети.

При анализе влияния емкостей цепей нагрузки $\sum_i C_i$ считают, что реактор – резонансный шунт настроен «более или менее точно» по условию резонанса (2). Известные методики оценки качества работы шунта не учитывают факт и физику явлений возможного замыкания в результате нарушения топологии самого резонансного шунта [4-5]. Влияние же возможного нарушения его исходной топологии на условия резонанса упускается практически всеми исследователями. По-видимому, считают, что отмеченное обстоятельство не скажется на результатах и полноте анализа электрических систем, а если данный факт нарушения и происходит, то его проявление считают малозначительным, а какие-либо даже заметные ухудшения работы системы с индуктивным шунтом-реактором относят на необъяснимые явления, происходящие в сложных цепях электрической емкостной нагрузки. Намного хуже, что часто это опускают как несущественный акт выброса данных эксперимента.

Цель и задачи. Указанные обстоятельства определяют цель и задачи излагаемого ниже анализа и приводят к необходимости изучения особенностей трансформирования замы-

канием смежных витков исходно однородной индуктивной структуры резонансного шунта-реактора и определения взаимосвязи его параметров и закономерностей их изменения в трансформированной замыканием витков структуре с однородной начальной топологией.

Постановка решения. Для оценки свойств эквивалентной схемы замещения реактора после произошедшей трансформации его топологии необходим анализ особенностей трансформирования структуры реактора – резонансного шунта и выполняемых им функций при наличии в нём замыкания витков и определения закономерностей изменения взаимосвязи основных параметров изменённой замыканием структуры реактора.

Основные положения. Достоинства резонансных шунтов-реакторов заключаются в том, что в электрических системах генерации энергии присутствие резонансного шунта исключает реакцию источника энергии на произошедшее замыкание на землю одной из «поврежденных» фаз. При наличии реактора в области замыкания протекает меньшая часть тока; большая его часть передается по поврежденной линии. Кратко можно сказать, что общая энергия тока в этом случае практически не зависит от области повреждения и в среднем остается постоянной в такой системе при любых актах замыкания в ней. Другими словами, в системах с реакторами заземления источники генерации энергии избавлены от однофазной нагрузки, обусловленной токами замыкания на землю. Это справедливо при условии точной настройки реактора по правилу Петерсена, которая по разным причинам выполняется крайне редко. Во-первых, кроме остаточного тока, связанного с потерями энергии, проходящей через место повреждения, в таких линиях существуют токи более высоких гармоник и реактивные токи основной частоты. Поэтому для оценки эффективности реального применения реакторов вводят термин недо- и перекомпенсации. Перекомпенсация – когда индуктивная составляющая характеристики тока реактора превышает емкостной ток. Недокомпенсация – наоборот, остаточный ток, имеет емкостной характер [4]. В обоих случаях в точке замыкания протекает ток пропорциональный этой дифференциальной разности токов.

Для расчета токов как меры эффективности применения резонансного индуктивного шунта-реактора необходимо использовать эквивалентную схему замещения. Отношение остаточного тока I_{Δ} в области нарушения к

$$I_{C3} = E_{ист} \sum_i \omega C_i$$

емкостному току замыкания служит относительной мерой δ -отклонения состояния настройки реактивного шунта-

реактора от точки его точной резонансной настройки [4-5]:

$$\delta = I_{\Delta}/I_{C3} = \left[1 - \left(\omega^2 L_0 \sum_i C_i \right)^{-1} \right]$$

В пренебрежении влияния нарушения индуктивной топологии реактора считают, что для эффективной работы реактора не требуется точной настройки. Обосновывают тем, что при значительных расстройках реактора не происходит заметного снижения его эффективности по сравнению с точкой его точного резонанса. Хотя экспериментальные данные показывают обратное: 30%-ное отклонение по току настройки реактора от точки точного резонанса, минимизирующего активные потери энергии, приводит к более чем трехкратному (в 3,2 раза) ухудшению эффективности применения резонансного шунта [4]. Возможно, в каких-то областях применения резонансного шунтирования это и допустимо. Но если учесть, что индуктивная топология реактора также подвержена пробоям и замыканию части витков, то по вероятности совпадения дугового замыкания в емкостной нагрузке, обуславливающего эффект перенапряжения в электрических линиях, это приводит к повышению вероятности пробоя и коротких замыканий витков индуктивного шунта. Возникновение замыканий витков в индуктивной топологии реактора в зависимости от точки замыкания витков любого его применения в связи с изменением величины индуктивности L_0 и возникшим из-за замыкания витков преобразованием индуктивной однородной топологии в структуру с неоднородной топологией и, соответственно, с другой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ). Условия применения реактора с случайно трансформированной витковой топологией при этом остаются. Трансформированная структура реактора с изменившейся АЧХ выполняет функцию резонансного шунта чаще всего на основной частоте изменения напряжений и токов в системе, но эффективность ее после трансформации структуры замыканием может сильно измениться. Более того, она может оказаться подверженной большему влиянию других (низших или высших) гармоник и их комбинационного взаимодействия в цепи реактора.

Неполное замыкание (замыкание с потерями) смежных витков учитывается в его эквивалентной схеме введением дополнительного сопротивления R_K трансформированного реактора, последовательно включаемого с индуктивностью L_T . Коэффициент передачи реактора такой структуры падает во всей полосе частотной характеристики передачи при максимальной ширине полосы на нижней ее частоте среза.

В случае широкополосной настройки, образованной смежными замыканиями витков двух- или трехконтурной полосовой структуры из одноконтурной структуры реактора, значение емкостей, определяющих границы областей резонанса этой полосовой структуры, дают соотношения:

$$C_{\epsilon} = \left(4\pi^2 f_{\epsilon}^2 L_T \right); \quad C_H = \left(L_T / K_R R_K \right);$$

$$L_{T2} = \left(4\pi^2 f_{\epsilon}^2 C_{\epsilon} \right); \quad L_{T3} = L_{T1} / K_L;$$

$$C_{HL} = \omega^2 L_{T3} = 4\pi^2 f_{\epsilon}^2 L_{T3},$$

где $K_R = 1$ и $K_L = 0$ – двухконтурная структура (одноточечное замыкание витка структуры на землю); $K_R \approx 1,08$ и $K_L \approx 0,65$ – трехконтурная эквивалентная структура (парное замыкание смежных витков структуры реактора). Нижняя граница частот $\omega_H(R_K) = 2\pi f_H(R_K)$ полосы фильтра верхних частот, образованного замыканием витковой топологии реактора, является функцией отношения величины индуктивности L_T к значению R_K активной составляющей полного комплексного сопротивления. Используя вышеприведенные формулы, величину емкости определит соотношение

$$C_H = 10^{-3} L_T / R_K,$$

если R_K имеет значение порядка 10^3 Ом (C_H будет иметь величину порядка 10^{-6} Ф). Следует учитывать, что значение R_K – активной части полного комплексного сопротивления структуры на частотах $\omega > \omega_H$ будет расти.

Величины комплексного полного сопротивления образованной замыканием полосовой частотной индуктивной структуры и его активной составляющей могут быть определены по соотношениям теории двух- и четырехполюсников [17].

Нарушения топологии витков индуктивной структуры реактора в зависимости от ранга нарушения могут приводить к разным явлениям: повышению токов межвитковых утечек через слой изоляции, резкому снижению изоляционных свойств материала межвитковых промежутков, проявлению очагов ионизации межвиткового промежутка – источника частичных разрядов, образованию неплотного с большим переходным сопротивлением контакта витков смежных в пространстве и в топологии, образованию полного замыкания смежных витков с очень малым переходным сопротивлением контакта и, наконец, образованию парных замыканий, обуславливающих формирование парных групп взаимных индуктивностей [6-8]. Например, в результате возникновения замыкания витков реактор как резонансный индуктивный шунт может

произвольно трансформироваться в высоко-частотный (с большей или меньшей частотой среза) заградитель с совершенно противоположной функцией, а именно, он будет препятствовать выполнению реактором функции шунтирования при возникновении дугового процесса на электрической линии. Подобное проявление функции, противоположной основному назначению реактора обусловлено изменением его структуры витковой топологии, из-за изменения величины его индуктивности при изменении эквивалентной схемы и ее трансформирования в полосовой (сложный) фильтр. Такой фильтр в полосе подавления имеет большое сопротивление (активная часть сопротивления изменённой его структуры может снижать коэффициент передачи сигнала на несколько порядков). Активное сопротивление и коэффициент передачи в случае нарушения топологии витков реактора в сильной мере зависят от типа межвиткового замыкания структуры (Γ -, T -, Π -фильтры) с произвольной частотной настройкой. Может образоваться много структур с ослабленным основным резонансом: многочастотные резонансные; многоконтурные широкополосные фильтры и т.п.

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

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

При образовании точкой замыкания витков индуктивной топологии реактора структуры полосового двухчастотного фильтра значение емкости, соответствующей верхней частоте его настройки, определит соотношение:

$$C_6 = (4\pi^2 f_6^2 L_T)^{-1}$$

Отсюда емкость C_H , соответствующая нижней частоте настройки фильтра, трансформированного замыканием витков реактора, найдётся из формулы:

$$C_H = C_6 L_{T1} / L_{T2};$$

для емкости нагрузки – электрической линии – из формулы:

$$C_H = C_6 (f_6^2 f_n^2 - 1) [(4R + L_{T2}) / L_{T1}]$$

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

Воспользуемся широко известным стандартным подходом эквивалентирования – замещения индуктивно связанного элемента

некоторой эквивалентной схемой – цепью, которая не содержит в явной форме индуктивных связей [17-18]. Принцип эквивалентирования упрощает расчеты электрических цепей с большей наглядностью физического взаимодействия. Поскольку реактор питается от одного источника, то токи, протекающие в его витках и в ответвлениях витковой топологии индуктивной структуры реактора, связаны линейными зависимостями. При одиночном, парном межвитковом замыкании на землю (корпус) индуктивная однородная топология реактора 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 замыкания витков индуктивной структуры реактора трансформированная замыканием структура может оказаться соединением «согласно включенным» частям индуктивного реактора (с одинаковой ориентацией токов относительно направления намотки витков индуктивности) или встречным включением катушек – частей его индуктивности. При этом в каждой части реактора будет индуцироваться ЭДС, одновременно обусловленная собственным потокосцеплением ψ_c и потокосцеплением ψ_m связанной катушки:

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

где $L_M = k_{cs} [L_{K1} / L_{K2}]$ – взаимная индуктивность частей катушек L_{K1} и L_{K2} до акта замыкания составлявших L_0 -исходную индуктивность реактора; $k_{cs} \leq 1$ – коэффициент связи, характеризующий меру взаимного влияния друг на друга частей L_{K1} и L_{K2} одной и той же изначально общей индуктивности. Обычно знак «+» принимают при согласном включении частей индуктивности; знак «-» – при встречном их включении. При расчете цепи по законам Кирхгофа дополнительное напряжение, обусловленное явлением взаимной индукции $U_M = \pm j\omega L_M$, имеют в виду как компоненту с учетом особенностей включения катушек – частей.

В принципе последовательно и параллельно соединенные индуктивно связанные элементы реактора могут быть представлены в виде эквивалентных схем без индуктивных связей, то есть в виде, развязанном по индуктивным связям. Эквивалентная индуктивность последовательного соединения равна: при согласном включении – $L_{0Э} = L_2 + L_1 + 2L_M$; при встречном – $L_{0Э} = L_2 + L_1 - 2L_M$. При развязке индуктивных связей частей индуктивности, имеющих общий узел, принимают во внима-

ние только расположение частей индуктивной топологии относительно точек их включения. Энергия от одной части индуктивности к другой передается через общее магнитное поле индуктивно связанных частей. При соблюдении технологии, дисциплины изготовления индуктивных структур применяют специальные типы намоток витков, обеспечивающие равномерное и пропорциональное числу витков однородное распределение электромагнитных полей рассеяния по длине топологии витков реактора.

Эквивалентную схему реактора индуктивной структуры для примера замыкания смежных витков и любого их парного замыкания на землю (корпус) можно представить видом структуры, приведенной на рисунке 1.

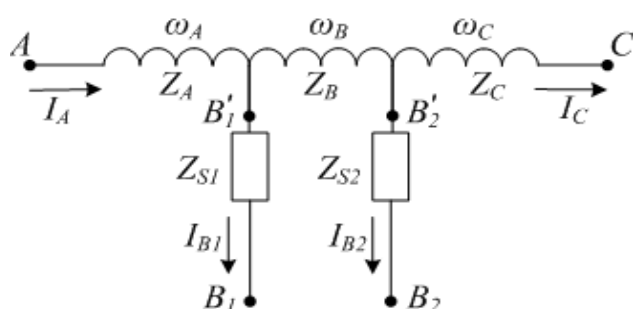


Рис. 1. Иллюстрация эквивалентной схемы типичного парного межвиткового замыкания индуктивной структуры реактора

Обозначения на рисунке 1 следующие: А – вход; С – выход; B_1' и B_2' – точки замыкания витков реактора; Z_A, Z_B, Z_C – комплексные сопротивления участков AB_1, B_1B_2 и B_2C исходно однородной индуктивной структуры реактора без учета влияния взаимных индуктивных связей отдельных частей; Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{AC} – взаимные комплексные сопротивления участков (АВ, ВС, АС) индуктивности реактора. Учтя ранее сделанное предположение линейной взаимозависимости параметров для токов, протекающих в индуктивности реактора, для упрощения записи формул примем соотношения: $I_{B1} = I_B, I_{B2} = K_1 I_{B1}, K_1 = I_{B2} / I_{B1}$ – весовой коэффициент дифференциального отношения токов как признак особенности места положения координат точек парного замыкания. Например, $K_1 = 1$ будет соответствовать совместной точке витков замыкания внутри однородной топологии реактора. Обозначим относительное число витков частей индуктивности AB_1 и B_1B_2 коэффициентами $K_1 = \omega_1 / \omega$ и $K_2 = \omega_2 / \omega_1$, а комплексные сопротивления каждого из указанных участков в таком случае отразит следующая система алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} Z_A = Z_0 + Z_S; & Z_B = K_1(K_1 Z_0 + Z_S); \\ Z_C = K_2(K_2 Z_0 + Z_S); & Z_{AB} = K_1 Z_0; \\ Z_{BC} = K_1 K_2 Z_0; & Z_{AC} = K_2 Z_0; \end{cases} \quad Z_{BC} = \sqrt{Z_B Z_C}; \\ Z_{AB} = \sqrt{Z_A Z_B}; \quad Z_{AC} = \sqrt{Z_A Z_C}, \quad (3)$$

где Z_0 – полное комплексное сопротивление исходной индуктивной структуры реактора; Z_S – полное комплексное сопротивление рассеяния поля части AB_1 этой структуры при нахождении замыкания в точке B_1' .

Используя в изложенной выше постановке методологию [17-18] решения задачи нахождения значений параметров эквивалентной схемы реактора с нарушенным замыканием витков топологией, можно вывести систему уравнений взаимосвязи, позволяющую определить основные параметры нарушенной замыканием топологии индуктивности реактора:

Результаты и их обсуждение

Для примера закономерности изменения коэффициента $K_{2П} = K_{2П}$ из системы уравнений (3) на рисунке 2 приведена зависимость, иллюстрирующая характер влияния мощности (числа витков в парной группе) замыкания в середине топологии реактора на его коэффициент передачи $K_{2П}$ при $\omega_a = 100$; $\omega_b = 1$ ч 10 ; $\omega_\Sigma = 100$.

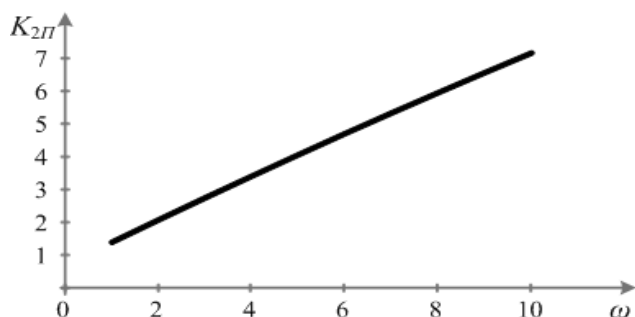


Рис. 2. Относительное влияние мощности межвиткового замыкания в средней части реактора на его коэффициента передачи $K_{2П}$ при $\omega_a = 100$; $\omega_b = 1$ ч 10 ; $\omega_\Sigma = 100$

Заключение

Теоретически показана возможность оценки влияния одиночным и парным замыканием витков исходно однородной топологии индуктивности реактора на эффективность его применения. Выполнен теоретический анализ реактора в предположении соответствия его индуктивной структуры однородной топологии, проводящей ток, при наличии и отсутствии замыканий витков. Исследован характер ухудшения коэффициента передачи реактора с нарушенным одиночным и парным замыканием витков исходно однородной

топологии его структуры. Создана математическая модель реактора с нарушенным замыканием витков исходно однородной топологии его структуры.

Библиографический список

1. Костюков А.Ф., Никольский О.К., Черкасова Н.И. Анализ методов диагностики технического состояния и ресурса электроустановок // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 1. – С. 100-103.

2. Чарыков В.И., Евдокимов А.А., Митюнин А.А. Исследование теплового режима катушки намагничивания электромагнитного сепаратора // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 5. – С. 118-121.

3. Наумов И.В., Ланин А.В. Прогнозирование отказов сельских распределительных сетей напряжением 10 кВ (на примере филиала восточных электрических сетей ОАО «ИЭСК») // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 1. – С. 86-90.

4. Petersen W. Over currents and over voltages in systems with large ground fault current // E.T.Z. – 1916. – Vol. 37. – P. 129-131.

5. Willheim R., Waters M. Neutral grounding in high-voltage transmission // John Wiley and Sons. – New York, 1953. – 414 p.

6. Елгина Г.А., Ивойлов Е.В., Деева В.С. Вектор Паравея в диагностике состояния вихревой структуры // Молодежь 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/>.

7. Bugaev A.S., Elgina G.A., Tsupin A.A., Slobodyan S.M. Phase analysis of inductive structure probing // [Digests 9th International Forum on Strategic Technology 2014, October 21-23, 2014. Chittagong University of Engineering and Technology, Bangladesh], in press.

8. 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.

9. Holmes D.G., Lipo T.A. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice / M.E. El-Hawary, Ed. – New Jersey: IEEE Press, Wiley-Interscience, 2003. – P. 259-381.

10. Kundur P. Power system stability and control. – McGraw Hill: New York, 1994. – 1176 p.

11. Reichert K., Kaufelerle J., Glavitsch H. Controllable reactor compensator for more extensive utilization of high voltage transmission systems. CIGRE 1974. Rep. 31-04.206.

12. www.transform.ru.

13. Saleh S.H. Diagnosis of mixed eccentricity in 400 kW induction machine based on inspection of stator current spectrums // Renewable Energies and Power Quality. – 2014. – № 12. – pp. 12-18.

14. Bellini A., Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C., Kliman G.B. Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Analysis // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2001. – Vol. 37 (5). – P. 1248-1255.

15. Rusek J. Categorization of Induction Machines Resulting from Their Harmonic-Balance Model // Electromagnetics. – 2003. – Vol. 23. – P. 277-292.

16. Mattavelli P. A closed-loop selective harmonic compensation for active filters // IEEE Trans. on Industry Applications. – 2001. – Vol. 37 (1). – P. 81-89.

17. Толстов Ю.Г., Теврюков А.А. Теория электрических цепей. – М.: Высшая школа, 1971. – 296 с.

18. Тавдгиридзе Л.Н., Лобжанидзе Л.Н., Мелкумян Э.В. Преобразование и расчёт измерительных цепей с индуктивной связью // Электричество. – 1974. – № 9. – С. 83-84.

References

1. Kostyukov A.F., Nikol'skii O.K., Cherkasova N.I. Analiz metodov diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya i resursa elektroustanovok // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 1. – S. 100-103.

2. Charykov V.I., Evdokimov A.A., Mityunin A.A. Issledovanie teplovogo rezhima katushki namagnichivaniya elektromagnitnogo sепaratora // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 5. – S. 118-121.

3. Naumov I.V., Lanin A.V. Prognozirovanie otkazov sel'skikh raspredelitel'nykh setei napryazheniem 10 kV (na primere filiala vostochnykh elektricheskikh setei ОАО «IESK») // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – № 1. – S. 86-90.

4. Petersen W. Over currents and over voltages in systems with large ground fault current // E.T.Z. – 1916. – Vol. 37. – P. 129-131.

5. Willheim R., Waters M. Neutral grounding in high-voltage transmission. John Wiley and Sons. – New York, 1953. – 414 p.

6. Elgina G.A., Ivoylov E.V., Deeva V.S. Вектор Паравея в диагностике состояния вихревой структуры // Молодежь и наука: труды X Всероссийской с международным участием

nauchno-tehnicheskoi konferentsii: 15-25 aprelya 2014 g., Krasnoyarsk: Sibirskii federal'nyi universitet. Sait: <http://conf.sfu-kras.ru/conf/mn2014/>.

7. Bugaev A.S., Elgina G.A., Tsupin A.A., Slobodyan S.M. Phase analysis of inductive structure probing // [Digests 9th International Forum on Strategic Technology 2014, October 21-23, 2014. Chittagong University of Engineering and Technology, Bangladesh], in press.

8. 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.

9. Holmes D.G., Lipo T.A. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice / M.E. El-Hawary, Ed. – New Jersey: IEEE Press. Wiley-Interscience, 2003. – P. 259-381.

10. Kundur P. Power system stability and control. – McGraw Hill: New York, 1994. – 1176 p.

11. Reichert K., Kauferle J., Glavitsch N. Controllable reactor compensator for more extensive utilization of high voltage transmission systems. CIGRE 1974. Rep. 31-04.206.

12. www.transform.ru.

13. Saleh S.H. Diagnosis of mixed eccentricity in 400 kW induction machine based on inspection of stator current spectrums // Renewable Energies and Power Quality. – 2014. – № 12. – P. 12-18.

14. Bellini A., Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C., Kliman G.B. Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Analysis // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2001. – Vol. 37 (5). – P. 1248-1255.

15. Rusek J. Categorization of Induction Machines Resulting from Their Harmonic-Balance Model // Electromagnetics. – 2003. – Vol. 23. – P. 277-292.

16. Mattavelli P. A closed-loop selective harmonic compensation for active filters // IEEE Trans. on Industry Applications. – 2001. – Vol. 37 (1). – P. 81-89.

17. Tolstov Yu.G., Tevryukov A.A. Teoriya elektricheskikh tsepei. – M.: Vysshaya shkola, 1971. – 296 s.

18. Tavdgiridze L.N., Lobzhanidze L.N., Melkumyan E.V. Preobrazovanie i raschet izmeritel'nykh tsepei s induktivnoi svyaz'yu // Elektrichestvo. – 1974. – № 9. – S. 83-84.



УДК 621.31.658.382.2

А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова, О.К. Никольский
A.F. Kostyukov, N.I. Cherkasova, O.K. Nikolskiy

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РИСКОВ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

RISK MANAGEMENT OF AGRICULTURAL ELECTRIC MAINS

Ключевые слова: интегральный риск, моделирование, оценка риска, ущерб, экспертная оценка.

Целью исследования является создание методов и средств управления техногенными рисками, методологической основой которых служит теория принятия решений (ТПР). Для принятия управленческих решений по минимизации техногенных рисков электроустановок в условиях неопределенности исходных данных необходимы аналитические и информационные инструментари, с помощью которых представляется возможным прогнозировать опасные техногенные ситуации (ОТС) и возможный ущерб от них. Рекомендации по принятию решений, полученных с помощью формальных моделей, можно учитывать лишь в тех случаях, когда предположения, лежащие в основе таких моделей, адекватны объекту исследования и источнику неопределенностей. Это требует рассмотрения алгоритмов информационно-анали-

тической системы принятия решений (ИАСПР). Методология оценки техногенных рисков и многофакторный и многокритериальный анализ на объектах энергетики, в электроустановках зданий находятся на ранней стадии своего развития и, как правило, несут фрагментарный характер. Критерии опасности ЭУ являются основными и должны учитывать накопление потенциальной энергии и неконтролируемый ее выброс. Для получения необходимой информации могут быть использованы статистические данные по аварийности и травматизму, логические методы анализа деревьев, усложняющих причинно-следственные связи, экспертная оценка. В условиях неопределенности целесообразно также использовать ранжирование рисков. Возникающее противоречие между трудоемкостью определения количественных показателей риска и объективной сложностью исследуемой системы (Ч-ЭУ-С) преодолевается с помощью имитационного моделирования процесса возникновения риска аварии, электротравматизма,