

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Конесев С.Г.¹, Мухаметшин А.В.¹

¹ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия (450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), e-mail: KonesevSG@yandex.ru

В статье приведены результаты исследования влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы резонансной испытательной установки (РИУ). Авторами предложено техническое решение РИУ, в котором резонанс создается в первичной цепи высокопотенциального испытательного трансформатора, что позволяет производить испытание изоляции электрооборудования как большой, так и малой емкости. В качестве ключевого доказательства влияния емкости испытуемого объекта на параметры резонансного контура в первичной цепи высоковольтной испытательной установки используются результаты практических исследований и компьютерного моделирования в среде Matlab. На основе результатов работ по созданию и исследованию резонансных испытательных установок, выполненных в лаборатории научно-инженерного центра, создан макетный образец РИУ. В ходе исследования макетного образца РИУ определены его основные параметры, выполнен перерасчет и произведена оптимизация основных узлов схемы. Полученные результаты могут быть использованы в технике высокого напряжения для исследования высоковольтного испытательного оборудования.

Ключевые слова: испытательная установка, емкость объекта, резонанс, высоковольтные испытания, моделирование, техника высоких напряжений, энергетика, электроэнергетика, электрические аппараты высокого напряжения, изоляция, экспериментальные исследования.

ESTIMATION OF INFLUENCE OF THE INSULATION OF HIGH VOLTAGE EQUIPMENT ON AN OPERATING MODE TEST SET

Konesev S.G.¹, Mukhametshin A.V.¹

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia (450062, Ufa, street Kosmonavtov, 1), e-mail: KonesevSG@yandex.ru

The article presents the results of investigation of the insulation of high voltage equipment for the resonance modes of the test unit (RTS). The authors proposed a technical solution RTS, which creates a resonance in the primary circuit of the transformer high-grade test that allows testing of electrical insulation as big and small capacity. As a key evidence of the impact of the capacity of the test object on the parameters of the resonant circuit in primary circuit of high voltage test set used by the results of empirical research and computer modeling in Matlab. Based on the results of works on creation and study of resonant test sets performed in the laboratory of scientific and engineering center established model sample RTS. In the study, the model sample RTS defined its basic parameters, recalculated, and Optimization of the main nodes of the circuit. The results can be used in the technique for the study of high voltage HV test equipment.

Keywords: test equipment, the capacity of the object, resonance, high-voltage testing, modeling, high voltage equipment, power, electricity, electrical equipment of high voltage, insulation, experimental studies.

Для поддержания заданного уровня безопасной эксплуатации электроустановок и высоковольтного оборудования требуется регулярная оценка качества изоляции. Одним из основных методов оценки качества изоляции и обнаружения сосредоточенных дефектов, не выявленных в предварительных испытаниях изоляции, является испытание на переменном токе промышленной частоты. По требованиям нормативно-технической документации (НТД) [1] высоковольтные испытания на переменном токе промышленной частоты проводятся для электрооборудования при первом вводе его в работу и после капитального ремонта.

Особенностью испытаний изоляции высоковольтных электродвигателей является необходимость применения испытательных установок мощностью порядка 3-5 кВ·А, поскольку изоляция данного электрооборудования является объектом большой емкости (десятки-сотни нФ) и мощности стандартных промышленных испытательных установок недостаточно [2; 3].

Стремление обеспечить необходимую мощность привело разработчиков к созданию испытательных установок высоких переменных напряжений, работающих в резонансном режиме [4-7]. В предлагаемых технических решениях высоковольтных испытательных установок, работающих с объектами большой емкости, как правило, емкость испытуемого объекта используется для создания резонансного контура испытательной установки. Одним из важных достоинств установок данного типа является эффект исчезновения резонанса при пробое испытуемого объекта из-за мгновенного изменения параметров цепи. Однако эти установки ограничены в своем применении, поскольку не могут работать с объектами малой емкости и имеют сложную конструкцию испытательного трансформатора.

Авторами предложено техническое решение резонансной испытательной установки (РИУ) [6], где резонанс создается в первичной цепи высокопотенциального испытательного трансформатора, что позволяет производить испытание изоляции электрооборудования как большой, так и малой емкости.

Результаты экспериментальных исследований при проведении высоковольтных испытаний на переменном токе промышленной частоты показали, что емкость испытуемого объекта оказывает существенное влияние на добротность резонансного контура и на режим работы РИУ. Задачей дальнейшего исследования является оценка влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки. Измерения показали, что емкость изоляции высоковольтных электродвигателей, эксплуатируемых на объектах нефтегазовой отрасли, находится в диапазоне от 35 до 150 нФ.

Исследование влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки осуществлялось с помощью экспериментальных испытаний опытного образца РИУ и компьютерного моделирования в среде Matlab.

Описание РИУ и ее схема

РИУ предназначена для проведения испытания изоляции высоковольтных электродвигателей повышенным переменным синусоидальным напряжением промышленной частоты 50 Гц.

Для проведения экспериментальных исследований в лаборатории научно-инженерного центра ООО НИЦ «Энергодиагностика» (г. Уфа) разработан и изготовлен макетный образец,

на котором было исследовано влияние параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки.

Принципиальная схема резонансной испытательной установки с испытательным объектом представлена на рис.1.

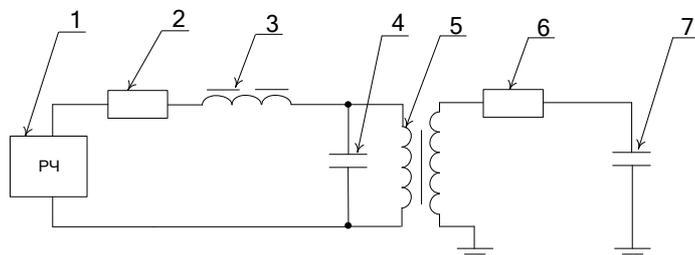


Рис.1. Принципиальная схема РИУ:

1 – источник питания с регулируемой выходной частотой; 2 – активное сопротивление дросселя, Ом; 3 – дроссель (индуктивность дросселя), мГн; 4 – конденсатор, мкФ; 5 – высокопотенциальный повышающий трансформатор; 6 – ограничительное сопротивление, кОм; 7 – емкость испытуемого объекта, нФ.

Экспериментальное исследование

В ходе исследования макетного образца РИУ определены его основные параметры, выполнен перерасчет и произведена оптимизация основных узлов схемы. Созданный макетный образец РИУ для исследования влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки представлен на рис. 2.

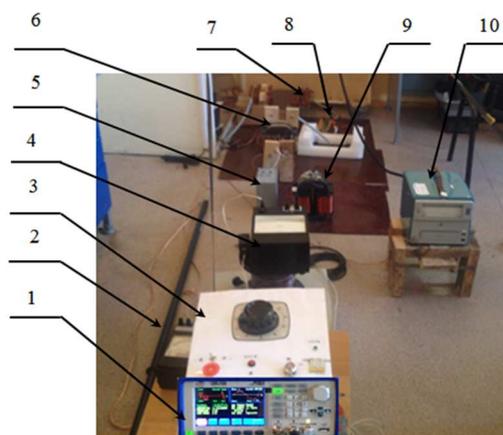


Рис. 2. Макетный образец РИУ:

1 – источник питания с регулируемой выходной частотой; 2 – штанга разрядная; конденсатор, мкФ; 3 – автотрансформатор; 4 – киловольтметр (0–3 кВ); 5 – конденсатор; 6 – высокопотенциальный повышающий трансформатор; 7 – емкость объекта, нФ; 8 – ограничительное сопротивление, кОм; 9 – дроссель; 10 – киловольтметр (0–30 кВ).

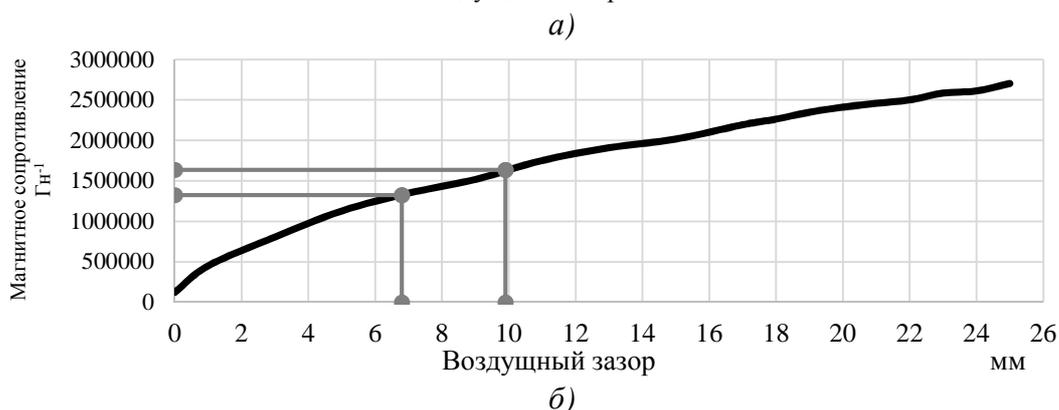
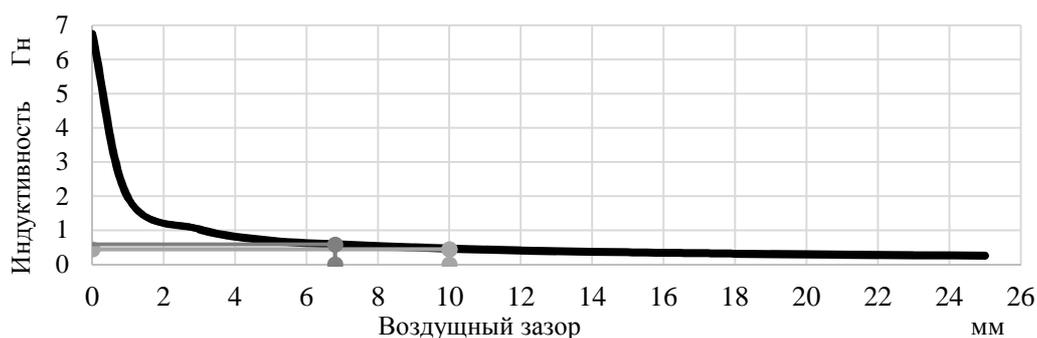
В табл. 1 приведены результаты эксперимента по исследованию влияния емкости испытательного объекта на резонансную частоту.

Результаты экспериментального исследования

Емкость объекта, нФ	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Резонансная частота макетного образца, Гц	38	38	38	37	36	36	35	35	34	34	33	32	32
L расчетное (резонансное), Гн	0,439	0,439	0,439	0,463	0,462	0,462	0,517	0,517	0,548	0,548	0,571	0,582	0,582
Напряжение на дросселе, В	10,1	10,2	10,2	9,9	9,7	9,6	9,3	9,3	9	8,7	8,7	8,7	8,43
Напряжение на конденсаторе, В	10,4	10,3	10	10	9,9	9,6	9,5	9,2	9,2	8,8	8,5	8,5	8,58
Напряжение на испытательном объекте, В	113	113	112	115	117	117	119	119	120	121	120	120	121

По результатам практических исследований построен график зависимости частоты резонансного контура от емкости испытательного объекта (рис.5). Величина отклонения частоты резонансного контура при изменении емкости объекта от 35 до 150 нФ находится в диапазоне от 38 до 32 Гц.

Определим причину влияния изменения емкости испытуемого объекта на резонансную частоту контура. Очевидно, что единственная изменяемая величина в первичной цепи - это величина индуктивности дросселя 3 (рис. 1). Индуктивность дросселя может изменяться только при изменении воздушного зазора магнитного сердечника дросселя. Для оценки данных зависимостей проведены исследования на макетном образце РИУ. На рис. Запредставлены результаты полученной зависимости индуктивности дросселя от воздушного зазора при наличии резонанса в цепи.



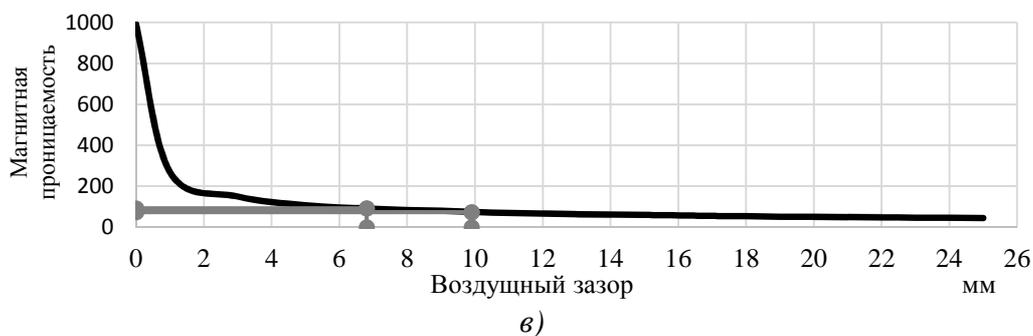


Рис.3. Исследование дросселя: а) зависимость индуктивности дросселя от воздушного зазора магнитопровода; б) зависимость магнитного сопротивления магнитопровода дросселя от воздушного зазора; в) зависимость магнитной проницаемости магнитопровода дросселя от воздушного зазора.

Из рис. 3а видно, что при индуктивности дросселя от 0,439 до 0,582 Гн рабочий зазор находится в диапазоне от 6,8 до 9,9 мм. По полученному графику зависимости индуктивности дросселя от воздушного зазора магнитопровода (рис.3а) определяем магнитное сопротивление магнитопровода.

На рис. 3б представлены результаты расчета зависимости магнитного сопротивления магнитопровода дросселя от воздушного зазора. Из рис.3б видно, что при изменении воздушного зазора магнитопровода дросселя в диапазоне от 6,8 до 9,9 мм магнитное сопротивление изменяется от 1325805 до 1634382 Гн⁻¹.

По полученному графику зависимости магнитного сопротивления магнитопровода дросселя от воздушного зазора (рис.3б) определяем магнитную проницаемость магнитопровода. На рис.3в получены результаты расчета магнитной проницаемости магнитопровода дросселя от воздушного зазора. Из рис.3в видно, что при изменении воздушного зазора магнитопровода дросселя в диапазоне от 6,8 до 9,9 мм магнитная проницаемость изменяется от 93 до 74.

Компьютерное моделирование в среде Matlab

В компьютерной модели РИУ исследуем влияние параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки, с учетом нелинейности характеристики намагничивания материала сердечника двухобмоточного высокопотенциального трансформатора. Схема моделирования РИУ в программе Matlab представлена на рис.4, с известными входными параметрами (табл.2). В модели сопротивление цепи намагничивания учитывает активные потери в сердечнике. Нелинейная индуктивность учитывает насыщение сердечника трансформатора. Нелинейная характеристика в модели задается как кусочно–линейная зависимость между магнитным потоком сердечника и током намагничивания, также имеется возможность задать остаточный магнитный поток в сердечнике.

Активные сопротивления, индуктивности обмоток и сопротивления цепи намагничивания задаются в относительных единицах аналогично модели линейного трансформатора.

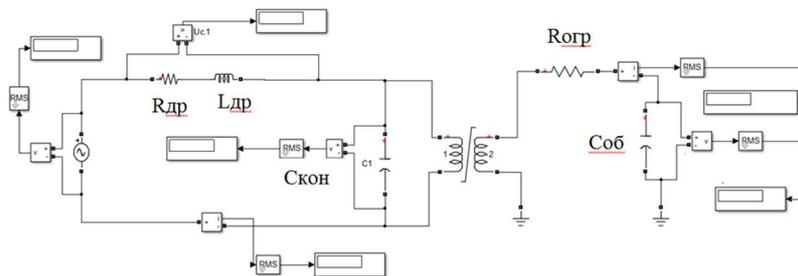


Рис.4. Схема моделирования в Matlab.

Таблица 2

Исходные данные для моделирования

№	Наименование	Ед. изм.	Значение
1	Активное сопротивление дросселя, $R_{др}$	Ом	2,69
3	Емкость конденсатора, $C_{кон}$	мкФ	40
4	Индуктивность первичной обмотки трансформатора, $L_{тр1}$	Гн	3,81
5	Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора, $R_{тр1}$	Ом	5,6
6	Индуктивность вторичной обмотки трансформатора, $L_{тр2}$	Гн	336
7	Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, $R_{тр2}$	Ом	577
8	R_0 учитывает потери в магнитопроводе (на вихревые токи и на гистерезис)	Ом	0,86
9	L_0 учитывает намагниченность материала сердечника	Гн	0,158
10	Емкость объекта, $C_{об}$	нФ	35 – 150
11	Активное сопротивление ограничительного сопротивления, $R_{огр}$	кОм	2

Моделирование производилось при условии сохранения резонанса напряжения, а именно равенства напряжения на конденсаторе и дросселе в первичной цепи трансформатора.

В табл.3 представлены результаты моделирования в программе Matlab.

Таблица 3

Результаты компьютерного моделирования

Емкость объекта, нФ	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Резонансная частота комп. модели, Гц	38	38	38	38	38	38	37	37	37	36	35	34	33
L расчетное (резонансное), Гн	0,439	0,439	0,439	0,463	0,462	0,462	0,517	0,517	0,548	0,548	0,571	0,582	0,582
Напряжение на дросселе, В	9,54	9,53	9,55	9,84	9,80	10,02	9,68	9,06	8,92	8,71	8,90	8,92	8,92
Напряжение на	10,0	9,98	9,90	9,71	9,63	9,37	9,06	8,96	8,56	8,85	8,49	8,01	8,63

конденсаторе, В	2												
Напряжение на испытательном объекте, В	116,5	115,1	114,1	118,8	117,8	119,6	121,8	120,6	119,7	122,6	121,8	118,0	123,2

По результатам компьютерного моделирования построен график зависимости частоты резонансного контура от емкости испытательного объекта (рис.5).

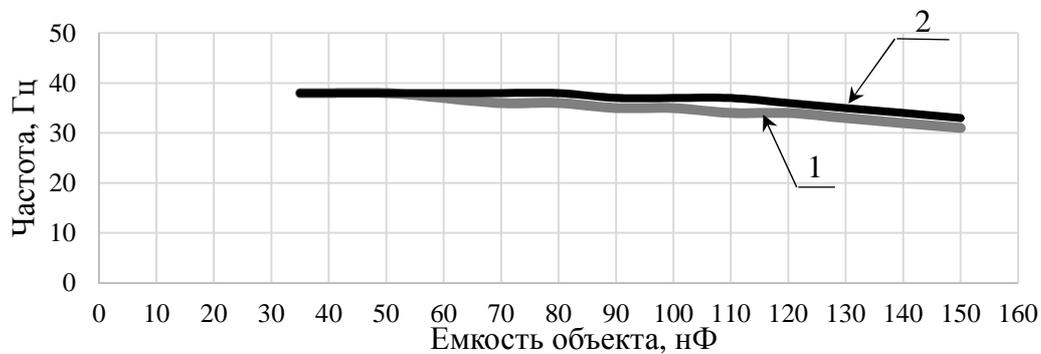


Рис. 5. Результаты исследования:

1 – макетный образец РИУ; 2 – компьютерная модель РИУ в Matlab

Выводы:

1. Получены результаты зависимости частоты резонансного контура от емкости испытательного объекта РИУ опытного образца и компьютерной модели.

При работе исследуемой схемы от сети промышленной частоты 50 Гц схема переходит в квазирезонансный режим работы. Это объясняется тем, что при подключении нагрузки к вторичной обмотке испытательного трансформатора она начинает отдавать нагрузке некоторую мощность. Соответственно увеличивается и мощность, получаемая первичной обмоткой из питающей сети. Следовательно, при увеличении испытательного тока во вторичной обмотке возрастает и ток в резонансном контуре в первичной обмотке, тем самым магнитное сопротивление магнитопровода дросселя увеличивается, магнитный поток соответственно уменьшается, и, следовательно, изменяется воздушный зазор дросселя. При изменении воздушного зазора в схеме появляется «плавающая индуктивность» которая и определяет резонансный режим.

2. Результаты экспериментальных данных опытного образца РИУ и компьютерного моделирования показали, что при изменении емкости изоляции высоковольтного оборудования в диапазоне от 35 до 150 нФ изменяется частота резонансного контура в диапазоне от 38 до 32 Гц, что связано с изменением воздушного зазора магнитопровода дросселя в диапазоне от 6,8 до 9,9 мм.

Список литературы

1. Библия электрика: ПУЭ (шестое и седьмое издания, все действующие разделы); МПОТ; ПТЭ. – Новосибирск: Сиб. унив. изд–во, 2008.
2. Диагностика технического состояния электрооборудования систем электроснабжения: учебное пособие /под ред. Шабанова В.А. - Уфа: Нефтегазовое дело, 2012.
3. Конесев С.Г., Стрижев Д.А. Особенности проектирования высоковольтных испытательных установок//Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. трудов.–Уфа : УГНТУ, 2010.– С.122–127.
4. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Хазиева Р.Т., Стрижев Д.А. Новые схемотехнические решения резонансной высоковольтной испытательной установки // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования:межвуз. сб. науч. трудов. – Уфа : УГНТУ, 2012.– С.178–183.
5. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В., Выбор схемы ВИУ для работы в резонансном режиме // I Международная (IV Всероссийская научно–техническая конференция: сб. науч. трудов конференции. – Уфа : УГНТУ, 2013.– С.209–215.
6. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Компактная испытательная установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением:патент РФ № 132213, 10.09.2013. Бюл. №25.
7. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Стрижев Д.Ю. Устройство для испытания изоляции повышенным напряжением :патент РФ № 105468, 10.06.2011. Бюл. №16.

Рецензенты:

Баширов М.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» филиала ФГБОУ ВПО «УГНТУ», г. Салават;

Ураксеев М.А., д.т.н., профессор кафедры информационно-измерительной техники ФГБОУ ВПО «УГАТУ», г. Уфа.