

УДК 621.3.04

РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Конев Александр Александрович¹,
sashaknv@gmail.com

Хакимьянов Марат Ильгизович¹,
hakimyanovmi@gmail.com

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность. Моральный и физический износ кабельных линий напряжения 6–10 кВ в нашей стране составляет от 40 до 80 %. При этом до 63 % всех аварий электрооборудования приходится на неисправности кабельных линий. В последнее время стали активно использоваться кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, для диагностики которых требуются особые подходы. Поэтому вопросы разработки высоковольтных испытательных установок для диагностики состояния изоляции электрооборудования являются достаточно актуальными. Авторами предложена оригинальная конструкция высоковольтной испытательной установки, позволяющая генерировать как постоянное напряжение, так и переменные напряжения промышленной и сверхнизкой частот. Особенностью устройства является использование в нем многофункционального интегрированного электромагнитного компонента, сочетающего в себе функции как катушки индуктивности, так и конденсатора. Использование данного компонента позволяет уменьшить габариты и массу испытательной установки.

Цель: разработать конструкцию высоковольтной испытательной установки и провести исследование ее характеристик; построить математическую модель и получить графики зависимостей.

Объекты: кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, высоковольтные испытательные установки.

Методы: теория электрических цепей, математическое моделирование, программа для математических и инженерных вычислений Mathcad, MATLAB Simulink.

Результаты. Предложена оригинальная конструкция высоковольтной испытательной установки, позволяющей генерировать как постоянное напряжение, так и переменные напряжения промышленной и сверхнизкой частот. Произведено моделирование установки. Предложена методика расчета высоковольтных испытательных установок.

Ключевые слова:

Кабель, изоляция из сшитого полиэтилена, частичный разряд, высоковольтные испытания, многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, математическая модель.

Введение

Надежность электроснабжения промышленных предприятий в значительной степени зависит от состояния изоляции кабельных линий (КЛ) высокого напряжения [1, 2]. Ухудшения состояния изоляции могут приводить к периодическим отключениям из-за коротких замыканий, возникающих из-за атмосферных осадков, изменения влажности почвы и других факторов [3]. Всеми энергетиками признается тот факт, что надежное функционирование кабельных линий является важным вопросом в обеспечении стабильного функционирования любых промышленных объектов.

По некоторым данным моральный и физический износ кабелей в сетях 6–10 кВ составляет 40–80 %. До 63 % всех аварий электрооборудования приходится на неисправности кабельных линий. По данным служб эксплуатации 42 % пробоев происходит под нагрузкой, 37 % – во время высоковольтных испытаний, а 21 % приходится на порывы при вскрытии грунта [4, 5].

В настоящее время основным способом диагностики состояния кабельных линий являются высоковольтные испытания с использованием постоянного тока, или тока промышленной частоты [6, 7]. Однако во время таких испытаний могут происходить пробой ранее исправной изоляции. Даже если пробой не про-

изошло, проведение высоковольтных испытаний часто сокращает срок службы изоляции кабельных линий. Особенно опасными являются высоковольтные испытания кабельных линий со значительным сроком эксплуатации [8]. Кроме того, проведение таких испытаний оказывается малоэффективным при диагностике состояния кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), которая обладает высокой диэлектрической прочностью и малыми токами утечки [9–12].

Особенности кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена

Кабели с изоляцией из СПЭ – основной тип силовых кабелей на среднее и высокое напряжение (рис. 1). Под СПЭ понимают полимер с поперечно сшитыми молекулами. Такой полиэтилен является наиболее плотным, а также обладает повышенными техническими характеристиками [13]. В результате сшивки изменяется внутренняя молекулярная структура материала, но химический состав сохраняется. Полиэтилен приобретает новые физические свойства, расширяется сфера его применения.

Такие кабели обладают рядом преимуществ по сравнению с КЛ с бумажно-пропитанной изоляцией: высокое значение допустимой температуры перегрева (90 °С в длительном режиме и 130 °С в режиме перегрузки), благодаря чему увеличивается токовая про-

пуская способность жилы; высокий ток термической стойкости при коротком замыкании (до 250 °С); незначительное поглощение влаги; стойкость к воздействию химических реагентов и растрескиванию; малые масса и диаметр кабеля; кабели допускают меньший радиус изгиба при прокладке КЛ; экологическая безопасность, так как в кабеле отсутствуют жидкие включения; нет необходимости в использовании оболочек из свинца и алюминия; большая строительная длина (до 4000 м) [14, 15].

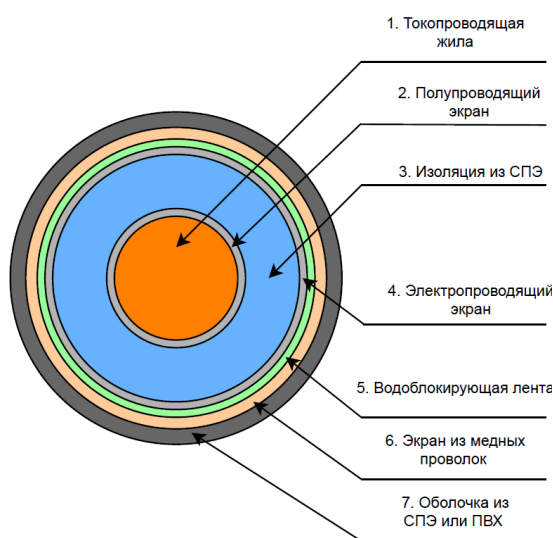


Рис. 1. Электрический кабель с изоляцией из СПЭ
 Fig. 1. XLPE electrical cable

Методы диагностики кабельных линий с изоляцией из СПЭ

Дефекты кабельных линий могут быть поделены на группы: проектировочные и технологические; прокладочные и монтажные (вызывающие механические повреждения кабелей); эксплуатационные [16]. Для кабелей с изоляцией из СПЭ характерным является возникновение триингов – проводящих каналов в СПЭ, которые могут иметь водную и электрическую природу.

К основным способам неразрушающего контроля изоляции кабельных линий из СПЭ относятся измерение тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ и измерение частичных разрядов (ЧР) [17, 18]. В табл. 1 приведен перечень нормативно-технической документации по испытаниям кабелей с изоляцией из СПЭ от различных разработчиков.

При проведении высоковольтных испытаний кабелей с изоляцией из СПЭ обычно нормируют следующие параметры: род тока (постоянный или переменный); значение прикладываемого напряжения, частота и длительность. Во всех стандартах (табл. 1) кабельная линия считается исправной при отсутствии пробоя. При этом токи утечки не контролируются.

Сейчас для диагностики состояния изоляции кабельных линий используются испытательные установки со следующими выходными напряжениями: высоковольтным постоянным; высоковольтным промышленной частоты; сверхнизкой частоты с импульсами прямоугольной и синусоидальной формы [19, 20].

Таблица 1. Перечень нормативно-технической документации, определяющей параметры испытаний изоляции силовых кабелей на напряжение до 35 кВ

Table 1. List of normative and technical documentation defining parameters for testing the insulation of power cables for voltages up to 35 kV

Источник НТД Documentation source	Нормативный документ Regulatory document
Международная электротехническая комиссия (МЭК) International Electrotechnical Commission (IEC)	МЭК 60502-2, МЭК 60502-4 IEC 60502-2, IEC 60502-4
CENELEC, Европа CENELES, Europe	HD 620, HD 629-1
ОАО «Электрокabelь» Кольчугинский завод, Россия JSC «Electrokabel» Kolchuginsky plant, Russia	ТУ 16.K71-359-2005 (6 кВ), ТУ 16.K71-335-2004 (10 кВ) TS 16.K71-359-2005 (6 kV), TS 16.K71-335-2004 (10 kV)
ОАО «Камкабель», Россия JSC «Kamkabel», Russia	ТУ 16.K71-335-2004 TS 16.K71-335-2004
ОАО «ВНИИКП», Россия JSC «VNIIPK», Russia	ТУ 16.K71-343-2004 (6,10 кВ) TS 16.K71-343-2004 (6,10 kV)
IEEE	IEEE 400.2-2013
ОАО «ВНИИКП» JSC «VNIIPK», Russia	ГОСТ Р 55025-2012 SS R 55025-2012

Наиболее предпочтительным для испытаний кабелей с изоляцией из СПЭ является прикладывание напряжения сверхнизкой частоты (0,1 Гц) синусоидальной или прямоугольной формы, так как в этом случае эффективно диагностируются дефекты и минимизируется разрушающее воздействие на изоляцию.

Директива IEEE 400.2-2013 рекомендует для испытаний кабелей применять сверхнизкие частоты до 0,01 Гц.

В табл. 2 приведены нормативные значения испытательных напряжений для кабелей 10 кВ.

Разработка испытательной установки

На основании изложенного выше могут быть сформулированы требования к установке для испытаний кабелей с изоляцией из СПЭ.

1. Установка должна быть функциональной, то есть обеспечивать генерацию как постоянного испытательного напряжения, так и переменных напряжений промышленной частоты 50 Гц и сверхнизкой частоты 0,1 Гц.
2. Переменное напряжение должно иметь синусоидальную форму.
3. Установка должна обладать приемлемыми массогабаритными показателями, чтобы ее транспортировка к месту проведения испытаний не вызвала затруднений.
4. Установка должна обеспечивать необходимую мощность испытательного сигнала.
5. Мощность установки для испытания кабельных линий определяется по следующей формуле:

$$S_{\text{исп}} = \omega \cdot C_n \cdot U^2, \quad (1)$$

где $S_{\text{исп}}$ – испытательная мощность, В·А; C_n – емкость испытываемого кабеля, Ф; U – необходимое напряжение, В; ω – угловая частота, с⁻¹.

Таблица 2. Нормативные значения испытательных напряжений для кабеля 10 кВ

Table 2. Normative values of test voltages for cable of 10 kV

Испытательное напряжение Test voltage	Нормативные значения/Standard values									
	ЗАО «АББ-Москабель» CJSC «ABB-Moskabel»		«Иркутск-кабель», «Камкабель», «Электро-кабель» «Irkutsk-kabel», «Kamkabel», «Electro-kabel»		Nexans		МЭК 60502-2 IEC 60502-2		ПУЭ EIR	
	$U_{исп}$, кВ U_{test} , kV	$t_{исп}$, ч t_{test} , h	$U_{исп}$, кВ U_{test} , kV	$t_{исп}$, ч t_{test} , h	$U_{исп}$, кВ U_{test} , kV	$t_{исп}$, ч t_{test} , h	$U_{исп}$, кВ U_{test} , kV	$t_{исп}$, ч t_{test} , h	$U_{исп}$, кВ U_{test} , kV	$t_{исп}$, ч t_{test} , h
Переменное напряжение частотой 0,1 Гц AC voltage with a frequency of 0,1 Hz	30	0,4	30	0,4	25	0,4	–	–	–	–
Переменное напряжение частотой 50 Гц AC voltage with a frequency of 50 Hz	10	24	10	24	10	24	10	24	–	–
Постоянное напряжение DC voltage	60	0,4	40	0,4	60	0,4	24	0,4	60	0,1

В настоящее время на рынке представлен ряд установок для испытаний изоляции, таких как: СНЦ 25, АИСТ-30 СНЧ, АИД-70М, FRIDA-24, HVA 28, KPG 20 и других. Технические характеристики некоторых из них приведены в табл. 3. Также в табл. 3 отдельной строкой приведены параметры разработанной испытательной установки.

Разрабатываемая испытательная установка содержит генераторный блок, многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент (МИЭК) [21–23], демодулятор и блок контроля частичных разрядов. Схема разрабатываемой установки приведена на рис. 2. Генераторный блок состоит из выпрямителя «В» напряжения из сети «С», сглаживающего фильтра «Ф», инвертора «И» и системы управления «СУ». Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент имеет первую и вторую проводящие обкладки и проволоочную обмотку. Демодулятор выполнен из двух выпрямительных диодов, разрядного резистора и коммутационных ключей. Испытуемый объект может быть представлен как параллельное соединение резистора и конденсатора. К испытуемому объекту подключается блок контроля частичных разрядов.

Таблица 3. Технические характеристики установок для высоковольтных испытаний изоляции

Table 3. Specifications for high voltage insulation testers

Наименование Name	$U_{исп}$, кВ U_{test} , kV			S , кВ·А/кВ·А	Масса, кг Weight, kg
	Постоянное напряжение DC voltage	Переменное напряжение 50 Гц AC voltage with a frequency of 50 Hz	Переменное напряжение 0,1 Гц AC voltage with a frequency of 0,1 Hz		
СНЦ 25 SNCH 25	–	–	25	0,7	45
АИСТ-30 СНЧ AIST-30 SNCH	30	–	30	1,5	49
FRIDA 24	35	–	35	0,3	20
HVA 28	0–28	–	0–28	0,4	20
KPG 20	0–30	–	5–20	–	55
Разрабатываемая установка Installation under development	24	16	17,5	3,2	40

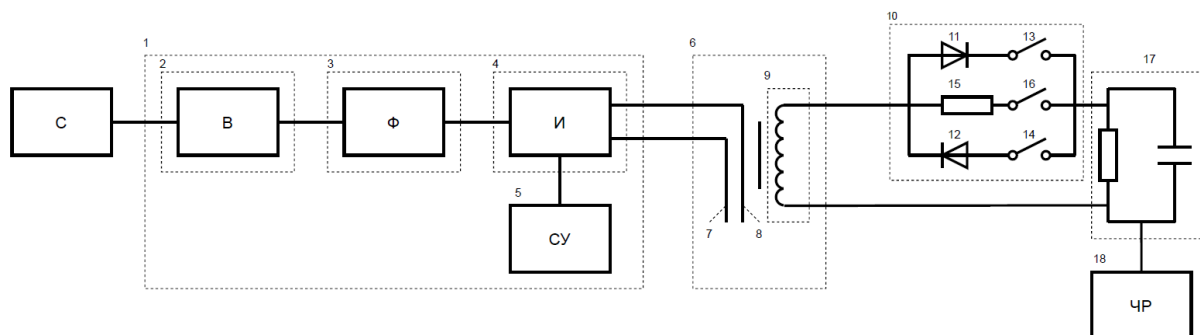


Рис. 2. Структурная схема испытательной установки: 1 – генераторный блок; 2 – выпрямитель; 3 – сглаживающий фильтр; 4 – ШИМ инвертор; 5 – система управления; 6 – МИЭК; 7 – первая проводящая обкладка; 8 – вторая проводящая обкладка; 9 – проволоочная обмотка; 10 – демодулятор; 11, 12 – выпрямительные диоды; 13, 14, 16 – коммутационные ключи; 15 – разрядный резистор; 17 – испытываемый объект; 18 – блок контроля ЧР

Fig. 2. Structural diagram of the test facility: 1 – generating unit; 2 – rectifier; 3 – smoothing filter; 4 – PWM inverter; 5 – control system; 6 – multifunctional integrated electromagnetic component; 7 – first conductive lining; 8 – second conductive lining; 9 – wire winding; 10 – demodulator; 11, 12 – rectifier diodes; 13, 14, 16 – switching keys; 15 – bit resistor; 17 – tested object; 18 – PD control unit

Процесс формирования испытательного напряжения показан на рис. 3. Компьютерное моделирование

проводилось с использованием математического пакета MATLAB/Simulink.

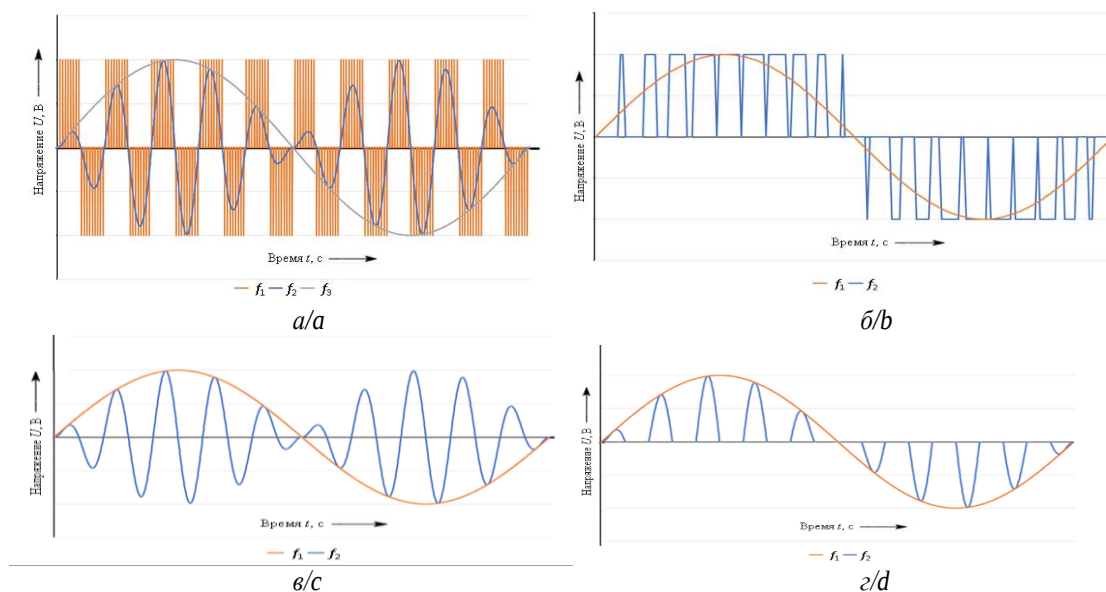


Рис. 3. Формирование испытательного напряжения: а) высокочастотный ШИМ сигнал с выхода инвертора; б) один период ШИМ сигнала с выхода инвертора; в) форма сигнала после трансформации; г) сигнал на выходе демодулятора

Fig. 3. Formation of the test voltage: а) high-frequency PWM signal from the inverter output; б) one period of the PWM signal from the inverter output; в) shape of the signal after transformation; г) demodulator output signal

Принцип работы представленной установки следующий. Напряжение от сети подается на выпрямитель – 2, с выхода выпрямителя поступает на сглаживающий фильтр – 3. Сглаженное напряжение подается на вход инвертора – 4. После инвертора сигнал с несущей частотой f_1 модулируется комбинацией частот f_2 и f_3 . Проводящие обкладки МИЭК – 7 и 8 образуют колебательный контур, за счет резонанса в котором сигнал усиливается на частоте f_2 . Сигнал высокого напряжения с проволоочной обмотки – 9 поступает на демодулятор – 10. Работающий согласовано с частотой f_2 демодулятор – 10 выделяет сигнал с частотой f_3 . С выхода демодулятора сигнал необходимой амплитуды прикладывается к испытуемому объекту в течение определенного времени в соответствии с требованиями нормативно-технических документов.

Установка также способна генерировать постоянное напряжение. Для этого для получения положительного постоянного напряжения коммутационный ключ – 13 должен быть замкнут, а коммутационные ключи – 14 и 16 разомкнуты. Для генерации отрицательного постоянного напряжения должен быть замкнут коммутационный ключ – 14, а коммутационные ключи – 13 и 16 должны быть разомкнуты.

В данной схеме f_1 – несущая частота широтно-импульсной модуляции, f_2 – резонансная частота обкладок МИЭК, f_3 – частота требуемого испытательного напряжения, 50 Гц, 0,1 Гц либо другая. При этом частота f_2 может составлять от единиц до десятков килогерц, а также должно выполняться условие $f_1 \geq 3 \cdot f_2$.

Использование в конструкции высоковольтной испытательной установки МИЭК, который обладает свойствами и катушки индуктивности, и конденсатора, поз-

воляет уменьшить массогабаритные показатели установки. Другим фактором, также положительно влияющим на массогабаритные показатели, является преобразование электрической энергии на повышенной частоте.

Разработка математической модели высоковольтной испытательной установки

Построение математической модели установки производится с целью получения осциллограмм сигналов в различных частях схемы и выходного напряжения, исследования влияния параметров элементов схемы (емкости фильтра, параметров резонансного контура, сопротивления разрядного резистора, емкости нагрузки и других) на форму выходного напряжения, а также анализа работы отдельных компонентов.

Для моделирования работы схемы необходимо заменить компоненты установки схемами замещения. МИЭК представляет собой две обкладки, разделенные диэлектриком, а также дополнительную проволоочную обмотку. С учетом сопротивления и емкости испытуемого объекта схема замещения может быть представлена, как показано на рис. 4.

Была составлена модель, позволяющая определить параметры схемы замещения и зависимость емкости МИЭК от его индуктивности. Полное сопротивление схемы (рис. 4) определяется выражением:

$$Z = \frac{\left(\frac{R'_h(-jxC'_h)}{R'_h + (-jxC'_h)} + R'_{rp} + jxL'_{rp} \right) (R_m + jxL_m)}{\left(\frac{R'_h(-jxC'_h)}{R'_h + (-jxC'_h)} + R'_{rp} + jxL'_{rp} \right) + (R_m + jxL_m)} + (R_k + jxL_k - jxC_k), \quad (2)$$

где $\underline{Z}$ – полное комплексное сопротивление; R_k – активное сопротивление компонента; jxL_k – реактивное индуктивное сопротивление компонента; jxC_k – реактивное емкостное сопротивление компонента; $R'_{тр}$ – приведенное активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора; $jxL'_{тр}$ – приведенное реактивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора; $R'_н$ – приведенное активное сопротивление нагрузки; jxC' – приведенное реактивное емкостное сопротивление нагрузки; R_m – активное сопротивление ветви намагничивания; jxL_m – реактивное сопротивление ветви намагничивания.

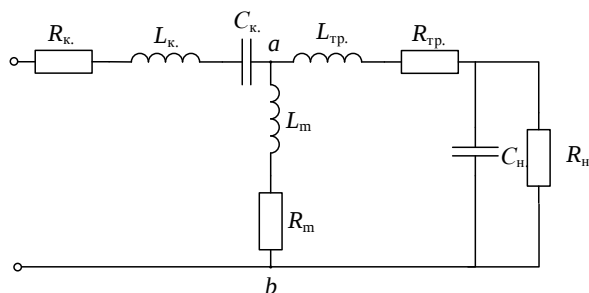


Рис. 4. Схема замещения МИЭК вместе с нагрузкой

Fig. 4. Equivalent circuit of a multifunctional integrated electromagnetic component together with a load

При резонансе сумма реактивных сопротивлений должна быть равна нулю. Решив уравнение (2) относительно емкости нагрузки $C_н$, можно определить зависимость емкости МИЭК от индуктивной составляющей $C_k = f(L_k)$ (рис. 5).

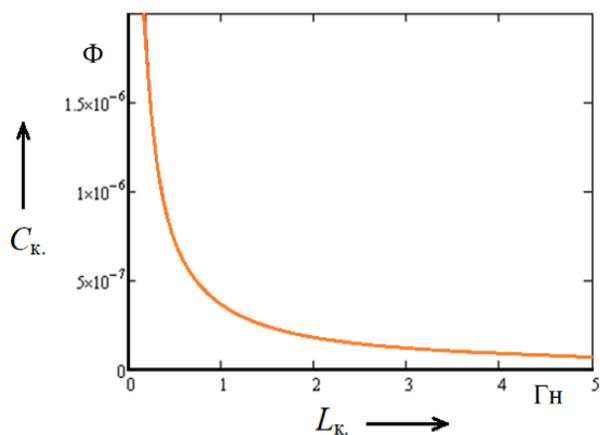


Рис. 5. Зависимость емкости МИЭК от индуктивной составляющей $C_k = f(L_k)$

Fig. 5. Dependence of the capacitance of a multifunctional integrated electromagnetic component on the inductive component $C_k = f(L_k)$

Используя данную зависимость можно определить параметры МИЭК, чтобы обеспечить резонанс в испытательной установке. Емкость и сопротивление испытываемого объекта $C_н$, $R_н$ также влияют на собственную частоту колебаний резонансного контура. Для обеспечения режима резонанса необходимо изменять частоту широтно-импульсной модуляции.

Методика расчета высоковольтной испытательной установки

Авторами была разработана методика расчета высоковольтной испытательной установки. Порядок расчета следующий:

1. Ввести исходные данные.
2. Выбрать оптимальную структуру и число секций МИЭК.
3. Определить параметры МИЭК.
4. Построить амплитудно-частотную характеристику МИЭК.
5. Если контур не обладает достаточной добротностью, то перейти к п. 2.
6. Произвести расчет мостового выпрямителя.
7. Выполнить расчет фильтра.
8. Рассчитать инвертор.
9. Выполнить расчет трансформатора.
10. Рассчитать демодулятор.

Обсуждение результатов

Диагностика кабелей с изоляцией из СПЭ традиционными методами малоэффективна, так как их нельзя испытывать повышенным постоянным напряжением. Для диагностики кабелей с изоляцией из СПЭ требуется разработка испытательных установок, генерирующих напряжение сверхнизкой частоты (0,1 Гц). Представленные на рынке установки для высоковольтных испытаний изоляции либо не обеспечивают необходимого уровня выходного напряжения, либо имеют большие габариты и массу, что затрудняет их транспортировку к местам проведения испытательных работ. Кроме того, закупка, эксплуатация и ремонт импортных испытательных установок (FRIDA-24, HVA 28, KPG 20 и других) в настоящее время затруднен из-за санкционной политики. В этих условиях становится актуальной разработка отечественных установок для высоковольтных испытаний изоляции с приемлемыми массогабаритными показателями, способных генерировать постоянное напряжение и напряжение сверхнизкой частоты, а также осуществлять контроль частичных разрядов.

Авторы предлагают уменьшить массогабаритные показатели испытательной установки за счет применения МИЭК, сочетающего в одном устройстве свойства как катушки индуктивности, так и конденсатора. Преобразование напряжения в установке на повышенной частоте также позволяет уменьшить размеры и массу установки.

С целью проверки адекватности предложенных технических решений проводилось компьютерное моделирование схемы установки. Преобразование энергии в установке происходит на резонансной частоте, которая меняется в зависимости от активного сопротивления и емкости изоляции испытываемого объекта. Поэтому для обеспечения режима резонанса изменяется частота широтно-импульсной модуляции.

Была разработана методика расчета элементов испытательной установки. Методика позволяет значительно сократить затраты времени на проектирование высоковольтных испытательных установок с заданными свойствами, унифицировав весь процесс.

Опытный образец высоковольтной испытательной установки был собран на производственной базе ООО НИЦ «Энергодиагностика» (г. Уфа).

Выводы

1. Применение в конструкции высоковольтной испытательной установки МИЭК, который обладает свойствами и катушки индуктивности, и конденсатора, позволяет уменьшить массогабаритные показатели установки аналогичной мощности. Другим фактором, также положительно влияющим на массогабаритные показатели, является

преобразование электрической энергии на повышенной частоте.

2. Авторами разработана схема высоковольтной испытательной установки, а также методика расчета элементов высоковольтной испытательной установки, которая позволяет значительно сократить затраты времени на проектирование испытательной установки с определенными характеристиками, унифицировав данный процесс. Так, длительность процесса проектирования высоковольтной испытательной установки с заданными заказчиком параметрами сократилась с 6–8 до 1–2 месяцев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендации по повышению надежности электроснабжения промышленной площадки линейно-производственного управления магистральных газопроводов / М.Г. Баширов, Г.Н. Грибовский, Р.У. Галлямов, И.М. Гареев, А.С. Хисматуллин // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 2 (31). – С. 23–26.
2. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В., Кучеров Ю.Н. Неотложные задачи надежности электроснабжения промышленных потребителей // Электричество. – 2005. – № 1. – С. 3–14.
3. Application of neuro-fuzzy scheme to investigate the winding insulation paper deterioration in oil-immersed power transformer / H. Malik, A.K. Yadav, S. Mishra, T. Mehto // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2013. – V. 53. – P. 256–271.
4. Новикова Ф.Ш., Баширов М.Г., Прахов И.В. Разработка метода количественной оценки технического состояния кабельных линий 6 кВ // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 9. – С. 63–67.
5. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
6. The leakage current components as a diagnostic tool to estimate contamination level on high voltage insulators / A.A. Salem, R. Abd-Rahman, S.A. Al-Gailani, M.S. Kamarudin, H. Ahmad, Z. Salam // IEEE Access. – 2020. – V. 8. – P. 92514–92528.
7. Modeling of high-frequency current transformer based partial discharge detection in high-voltage cables / X. Hu, W.H. Siew, M.D. Judd, A.J. Reid, B. Sheng // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2019. – V. 34. – № 4. – P. 1549–1556.
8. Measurement, diagnostics and monitoring of partial discharges on high-voltage equipment on-line and off-line / Z. Sun, X. Zhao, J. Li, Y. Li // 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – IEEE, 2009. – P. 1521–1526.
9. Correlation between thermal parameters and morphology of cross-linked polyethylene / Y. Zhao, Z. Han, Y. Xie, X. Fan, Y. Nie, P. Wang, W. Zhu // IEEE Access. – 2020. – V. 8. – P. 19726–19736.
10. Монастырский А.Е. Методы испытаний и диагностики кабельных линий с изоляцией из СПЭ // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2019. – № 10. – С. 43–47.
11. The cable fault diagnosis for XLPE cable based on 1DCNNs-BiLSTM network / Q. Wang, D. Cao, S. Zhang, Y. Zhou, L. Yao // Journal of Control Science and Engineering. – 2023. – V. 2023. – P. 1–10.
12. Feature selection of XLPE cable condition diagnosis based on PSO-SVM / F. Yun, H. Dong, C. Liang, T. Weimin, T. Chao // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – V. 48. – № 5. – P. 5953–5963.
13. Кабель из сшитого полиэтилена, описание и характеристики // ООО «Бонком». 2022. URL: <https://www.boncom.by/papers/kabel-iz-sshitogo-polietilena> (дата обращения 12.08.2023).
14. Преимущества использования кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // ООО «ИнКабель». 2021. URL: <https://inkabel.ru/preimushhestva-ispolzovaniya-kabelej-s-izolyaciej-iz-sshitogo-polietilena/> (дата обращения 12.08.2023).
15. Partial discharges classification methods in XLPE cable: a review / N. Rosle, N.A. Muhamad, M.N. Rohani, M.K. Jamil // IEEE Access. – 2021. – V. 9. – P. 133258–133273.
16. Конев А.А., Хакимьянов М.И. Диагностика состояния изоляции кабелей из сшитого полиэтилена // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Г.П. Корнилова, Ю.Н. Кондрашовой. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. – Вып. 9. – С. 181–186.
17. The influence of the electromagnetic field on the neural network monitoring of insulation materials for electric cable networks / N.K. Poluyanovich, D.V. Burkov, M.N. Dubyago, A.A. Shurykin, E.Y. Kosenko // 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME). – IEEE, 2021. – P. 1–6.
18. Уракова Е.Н. Диагностика состояния кабельных линий неразрушающими методами в АО «ЕЭСК» // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3. – С. 114–117.
19. Методика калибровки переменного тока резонансной испытательной установки / А.В. Белов, Б.А. Мартынов, Р.Т. Хазиева, А.В. Мухаметшин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2021. – Т. 17. – № 2. – С. 55–66.
20. A high voltage multi level arbitrary waveform generator for insulation testing / P. Lei, Y. Mingtian, L. Geqi, Z. Qiaogen, H. Kun // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2019. – V. 26. – № 2. – P. 405–411.
21. Gamisonia G.K., Solovev B.A., Khazieva R.T. Mathematical and physical modeling of inductive-capacitive converters based on multifunctional integrated electromagnetic component // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2021. – P. 914–918.
22. Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Купцов Д.В. Исследование стабилизирующих свойств двухсекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020. – Т. 16. – № 3. – С. 36–42.
23. Разработка схемы и моделирование резонансного трансформатора на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента / Р.Р. Афлятунов, П.И. Васильев, И.Д. Каекбирдина, Р.В. Кириллов, Р.Т. Хазиева // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 13–20.

Поступила 24.08.2023 г.

Прошла рецензирование: 14.09.2023 г.

Информация об авторах

Конев А.А., аспирант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Хакимьянов М.И., доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 621.3.04

DEVELOPMENT OF A TESTER FOR DIAGNOSTICS OF STATE OF CABLE LINES WITH XLPE INSULATION

Alexander A. Konev¹,
sashaknv@gmail.com

Marat I. Khakimyanov¹,
hakimyanovmi@gmail.com

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

Relevance. The moral and physical deterioration of cable lines voltage of 6–10 kV in our country ranges from 40 to 80 %. At the same time, up to 63 % of all accidents in electrical equipment are due to cable line failures. Recently, cables with cross-linked polyethylene insulation have been actively used, for the diagnosis of which special approaches are required. Therefore, the issues of developing high-voltage test facilities for diagnosing the state of insulation of electrical equipment are quite relevant. The authors proposed an original design of a high-voltage test facility that allows generating both direct voltage and alternating voltages of industrial and ultra-low frequencies. A feature of the device is the use of a multifunctional integrated electromagnetic component in it, which combines the functions of both an inductor and a capacitor. The use of this component allows reducing the dimensions and weight of the test facility.

The main aims of the research are to develop a design of a high-voltage test facility and to study its characteristics; build a mathematical model and get dependency graphs.

Objects: cables with XLPE insulation, high voltage test facilities.

Methods: theory of electrical circuits, mathematical modeling, program for mathematical and engineering calculations Mathcad, MATLAB Simulink.

Results. The authors proposed the original design of a high-voltage test facility, which makes it possible to generate both direct voltage and alternating voltages of industrial and ultra-low frequencies. The simulation of the installation was carried out. A method for calculating high-voltage test facilities is proposed.

Key words:

Cable, XLPE insulation, partial discharge, high voltage testing, multifunctional integrated electromagnetic component, mathematical model.

REFERENCES

1. Bashirov M.G., Gribovsky G.N., Gallyamov R.U., Gareev I.M., Khismatullin A.S. Recommendations for improving the reliability of electricity supply at industrial site of linear pipe operation. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2016, no. 2 (31), pp. 23–26. In Rus.
2. Gurevich Yu.E., Kabikov K.V., Kucherov Yu.N. Urgent problems of reliability of power supply to industrial consumers. *Electricity*, 2005, no. 1, pp. 3–14. In Rus.
3. Malik H., Yadav A.K., Mishra S., Mehto T. Application of neuro-fuzzy scheme to investigate the winding insulation paper deterioration in oil-immersed power transformer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, vol. 53, pp. 256–271.
4. Novikova F.Sh., Bashirov M.G., Prakhov I.V. Development of a method for quantitative assessment of the technical condition of 6 kV cable lines. *Modern science-intensive technologies*, 2015, no. 9, pp. 63–67. In Rus.
5. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Lavrinovich A.V. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. In Rus.
6. Salem A.A., Abd-Rahman R., Al-Gailani S.A., Kamarudin M.S., Ahmad H., Salam Z. The leakage current components as a diagnostic tool to estimate contamination level on high voltage insulators. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 92514–92528.
7. Hu X., Siew W.H., Judd M.D., Reid A.J., Sheng B. Modeling of high-frequency current transformer based partial discharge detection in high-voltage cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, vol. 34, no. 4, pp. 1549–1556.
8. Sun Z., Zhao X., Li J., Li Y. Measurement, diagnostics and monitoring of partial discharges on high-voltage equipment on-line and off-line. *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, IEEE, 2009. pp. 1521–1526.
9. Zhao Y., Han Z., Xie Y., Fan X., Nie Y., Wang P., Zhu W. Correlation between thermal parameters and morphology of cross-linked polyethylene. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 19726–19736.
10. Monastyrsky A.E. Methods of testing and diagnostics of cable lines with XLPE. *Electrical equipment: operation and repair*, 2019, no. 10, pp. 43–47. In Rus.
11. Wang Q., Cao D., Zhang S., Zhou Y., Yao L. The cable fault diagnosis for XLPE cable based on 1DCNNs-BiLSTM network. *Journal of Control Science and Engineering*, 2023, vol. 2023, pp. 1–10.
12. Yun F., Dong H., Liang C., Weimin T., Chao T. Feature selection of XLPE cable condition diagnosis based on PSO-SVM. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 48, no. 5, pp. 5953–5963.
13. Kabel iz sshitogo polietilena, opisanie i kharakteristiki [Cable made of cross-linked polyethylene, description and characteristics]. *OOO «Bonkom»*, 2022. Available at: <https://www.bonkom.by/papers/kabel-iz-sshitogo-polietilena> (accessed: 12 August 2023).
14. Preimushchestva ispolzovaniya kabeley s izolyatsiey iz sshitogo polietilena [Advantages of using cables with cross-linked polyethylene insulation]. *OOO «InKabel»*, 2021. Available at: <https://inkabel.ru/preimushchestva-ispolzovaniya-kabelej-s-izolyatsiej-iz-sshitogo-polietilena/> (accessed: 12 August 2023).
15. Rosle N., Muhamad N.A., Rohani M.N., Jamil M.K. Partial discharges classification methods in XLPE cable: a review. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 133258–133273.
16. Konev A.A., Khakimyanov M.I. Diagnostika sostoyaniya izolyatsii kabeley iz sshitogo polietilena [Diagnostics of the insulation condition of cables made of cross-linked polyethylene]. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy. Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov* [Energy and electrical systems. International Scientific Proceedings]. Eds. G.P. Kornilov, Yu.N. Kondrashova. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova Publ. house, 2022. Iss. 9, pp. 181–186.
17. Poluyanovich K., Burkov D.V., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Kosenko E.Y. The influence of the electromagnetic field on the neural network monitoring of insulation materials for electric cable networks. *2021 International Conference on Electrical, Computer,*

- Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, IEEE, 2021. pp. 1–6.
18. Urakova E.N. Diagnostics of the condition of cable lines using non-destructive methods in JSC «EESK». *Relay protection and automation*, 2021, no. 3, pp. 114–117. In Rus.
 19. Belov A.V., Martynov B.A., Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Methodology for calibrating alternating current of a resonant testing installation. *Electrical and information complexes and systems*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 55–66. In Rus.
 20. Lei P., Mingtian Y., Geqi L., Qiaogen Z., Kun H. A high voltage multi level arbitrary waveform generator for insulation testing. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 405–411.
 21. Gamisonia G.K., Solovov B.A., Khazieva R.T. Mathematical and Physical Modeling of Inductive-Capacitive Converters Based on Multifunctional Integrated Electromagnetic Component. *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, IEEE, 2021. pp. 914–918.
 22. Khazieva R.T., Vasilyev P.I., Kuptsov D.V. Study of the stabilization properties of a two-section multifunctional integrated electromagnetic component. *Electrical and information complexes and systems*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 36–42. In Rus.
 23. Aflyatunov R.R., Vasiliev P.I., Kaekbirdina I.D., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Development of a circuit and modeling of a resonant transformer based on a multifunctional integrated electromagnetic component. *Electrical and information complexes and systems*, 2022, vol. 18, no. 2, pp. 13–20. In Rus.

Received: 24 August 2023.

Reviewed: 14 September 2023.

Information about the authors

Alexander A. Konev, postgraduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

Marat I. Khakimyanov, Dr. Sc., associate professor, head of the department, Ufa State Petroleum Technological University.