

ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ИЗОЛЯЦИИ В 2D-МОДЕЛИ ЗВЕНА «КАБЕЛЬ 6(10) КВ – ГРУНТ» В ANSYS С УЧЕТОМ ПОДВИЖЕК ГРУНТА И УСТАВОК УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

А.В. Коржов

В статье на примере действующих городских кабельных линий 6(10) кВ и опытных образцов определены подвижки грунта и кабеля в течение годового цикла эксплуатации. Экспериментальные исследования проводились путем замеров глубины залегания в выбранных точках кабельных линий, проложенных в разных условиях с использованием прибора RIDGID SeekTech SR-20. Анализ результатов показал, что подвижки кабельных линий в течение годового цикла значимы и могут приводить к образованию опасных механических напряжений и образованию пустот. Для оценки теплового режима изоляции кабелей с учетом вероятных размеров, образующихся при подвижках кабеля и грунта пустот, были разработаны 2D-модели звена «кабель 6(10) кВ – грунт» в ANSYS. Тепловой режим работы изоляции анализировался в рабочих и аварийных режимах работы кабеля с учетом принятых уставок устройств релейной защиты и автоматики. По результатам моделирования были определены вероятные зоны перегрева изоляции кабеля и скорректирована тепловая схема замещения, применяемая для расчета длительно допустимых токов.

Ключевые слова: кабель, изоляция, релейная защита, тепловой расчёт, грунт, схема замещения.

В условиях эксплуатации влияние на режим работы изоляции кроме режимных параметров оказывают и факторы монтажа трассы кабельной линии, выбора глубины прокладки [1–4].

Проведенный нами ранее анализ напряженно-деформированного состояния и движения грунта, взаимодействующего с кабелем во время весеннего увлажнения и зимнего промерзания, показал возможность формирования пустот, способных стать причиной перегрева участков кабельных линий [3]. К аналогичным выводам привели и практические исследования на опытных и действующих кабельных линиях в грунте.

Для определения возможных подвижек кабеля в грунте была разработана экспериментальная установка в реальных полевых условиях. На специ-

ально выделенной площадке специализированной цепной землеройной машиной была прорыта 10-метровая траншея глубиной 0,7 м, шириной 200 мм. В кабельную траншею были проложены друг за другом два 4-метровых куска силового кабеля (тип кабеля трехжильный ААШвУ, сечением жил 120 мм², на напряжение 6 кВ). Один из кусков был проложен непосредственно в землю, а второй – с подушками из просеянного песка (рис. 1, а). В начале траншеи для замера температуры на глубине прокладки кабелей была заложена термопара. Для определения перемещения кабелей в грунте на каждый кабель с двух сторон были установлены указатели перемещения кабеля.

Результаты исследований на сегодняшний день включают в себя ежедневные данные о сме-



а)



б)

Рис. 1. Просадка экспериментального куска КЛ при новой прокладке (а), смещение до 9 см за 45 дней (б), причина: не выполнено хорошее уплотнение грунта, опасный участок по данному фактору, например, после ремонта теплотрассы

Электроэнергетика

щения кабеля, температуре, влажности воздуха и почвы, начиная с 27 февраля 2007 года.

Анализ диаграмм перемещения позволяет констатировать (рис. 1, б):

1. Кабель, проложенный в песке, углубился до 8,5 см, в грунте смещение составило 3 мм.

2. Процесс углубления в песке происходил в несколько этапов. За первые 4 дня наблюдалась интенсивная просадка кабеля до 3,3 см. Последующие 17 дней марта – период стабилизации с последующим углублением до 6,9 см за последние 11 дней марта (период оттаивания и увлажнения грунта). Дальнейшая просадка кабеля наблюдалась в осенний период 2007 года.

3. В периоды резкого изменения температуры и влажности (до настоящего времени 02.2013 г.) наблюдаются подвижки кабельной линии.

Полученные на сегодняшний день данные свидетельствуют о влиянии на перемещения силового кабеля как температуры грунта, так и его состава. Наиболее напряженными, с точки зрения механического воздействия грунта, участками кабеля являются: участки, проложенные в разных условиях; новые участки, прокладываемые вместе с муфтами; участки кабеля, под которыми производилась подкопка грунта, например для ремонта теплотрассы (рис. 1, б).

Подобная схема исследований была применена и на действующем силовом кабеле марки ААБ сече-

нием 3×120 мм². С 13.07.2007 г. были установлены три датчика перемещения. Первоначальные подвижки кабеля прошли в первые два дня после установки. Они были связаны с процессом уплотнения грунта. Следующий период просадки, который наблюдался в ноябре 2007 года, был обусловлен переходом от положительных к отрицательным температурам в грунте.

Для оценки подвижек, находящихся в работе КЛ на базе кабельных сетей г. Нефтекамска, были так же выбраны пять КЛ. Замеры их подвижек проходили с использованием прибора RIDGID SeekTech SR-20. Сводные результаты за осенне-весенний период 2012-2013 г. приведены в табл. 1.

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что существуют подвижки кабельных линий в течение годового цикла и необходимость строгого соблюдения правил укладки кабельных линий в грунтовых массивах. Кроме того, можно рекомендовать:

1) проводить анализ температуры, влажности, структуры грунта в течение годового цикла непосредственно в месте прокладки кабельной линии; использовать полученные данные для определения возможных напряженно-деформированных состояний грунтовых массивов, взаимодействующих с кабелем с течением времени по мере нескольких циклов его эксплуатации;

2) для предотвращения опасных механических

Таблица 1

Подвижки действующих КЛ, оценка прибором RIDGID SeekTech SR-20

№ п/п	Дата	Температура	Влажность, %	Просадка грунта, см				
				пр. Комсомольский, 29 (РП2-ТП601) ААБл 3×185, 770 м.	пр. Комсомольский, 52 (фид. 11 п/ст Зенит - ТП5002) ААШв 3×150, 1100 м.	ул. Победы, 4 (РП1-РП12) ААБл 3×150, 415 м.	ул. Победы, 5 (РП1-РП12) ААБл 3×150, 415 м.	Школа № 11 (РП1-РП12) ААБл 3×150, 415 м.
1	04.10.2012	+7	63,5	158	139	74	113	116
2	30.10.2012	+2	58,7	158	139	68	112	116
3	08.11.2012	+4	64,2	158	139	70	107	115
4	13.12.2012	-20	32,4	158	139	69	107	117
5	26.12.2012	-15	36,1	158	140	70	107	116
6	10.01.2013	-10	40,4	158	142	70	110	120
7	24.01.2013	-17	56,7	153	149	71	107	117
8	04.02.2013	-9	82,3%	153	149	72	108	118
<i>Движение кабеля</i>				5	10	6	6	5

воздействий мерзлых грунтовых массивов на изоляцию кабеля во время морозного пучения грунта и электродинамических подвижек кабеля в режимах коротких замыканий необходимо прокладывать кабельную линию ниже зоны промерзания;

3) на сложных трассах городских кабельных линий необходимо с учетом количества поворотов и изменений в типе грунта по трассе увеличивать количество компенсирующих участков. Рекомендуем укладывать компенсаторы перед поворотом и после поворота трассы кабельной линии; перед и после пересечения кабелем автомобильной дороги для снижения вибрационных механических воздействий; на пограничных участках с различными характеристиками грунта;

4) на трассах кабельных линий, для которых характерны подвижки грунта в зимних условиях, можно рекомендовать прокладывать компенсаторы в специальных пустых лотках, однако необходимо учитывать тепловой режим работы кабеля;

5) улучшение условий утрамбовки грунта при работе по ремонту городских коммуникаций ниже трассы КЛ с выдержкой по времени засыпки трассы до нескольких дней, либо разнесение трасс КЛ и теплотрасс с увеличением расстояния между ними.

Вопрос определения температуры нагрева изоляции кабеля в условиях эксплуатации является актуальной и сложной задачей. Для практической оценки нагрева изоляции кабелей электротехнический персонал может использовать замеры температуры с применением термопар, установленных в характерных точках грунта вблизи трассы кабеля, что не дает полной тепловой картины. Разрабатываются способы с использованием оптоволоконных каналов, встроенных в структуру кабеля. Также может использоваться классический тепловой расчет по тепловой схеме замещения, в которой участвуют тепловые сопротивления изоляции, защитных покровов и окружающей среды.

Оценку теплового режима работы изоляции силовых кабелей в процессе эксплуатации с учетом характерных режимных (установившиеся режимы и режимы коротких замыканий) и эксплуатационных условий, например, локальных пустот, образующихся при подвижках кабеля и грунта, приводящих к локальному перегреву отдельных участков кабеля, можно проводить с использованием математического моделирования в программном продукте ANSYS, основанном на методе конечных элементов. ANSYS поддерживает основные виды теплопередачи: теплопроводность, конвекцию, излучение.

Для анализа перегрева изоляции в пустотах, образовавшихся при подвижках кабеля и грунта, в программном пакете ANSYS Multiphysics, нами была разработана математическая модель звена «кабельная линия – грунт» с учетом геометрических и конструктивных особенностей силовых кабелей марки ААШвУ – 3×120 – 10 кВ и марки 1×АПвП – 500 – 10 кВ, рассмотрены рабочие режимы и режимы коротких замыканий. Задача решена в двухмерной постановке, рис. 2. Сводные результаты расчета приведены в табл. 2.

Анализ полученных картин распределения температур в звене «кабельная линия – грунт» показал, что в пустотах, образовавшихся во влажном и мерзлом грунтах при подвижках грунта и участков кабельной линии, условия отвода тепла от кабельной линии значительно ухудшаются (рис. 2). Так, в слоях фазной и поясной изоляции у жилы, прилегающей к пустоте при рассмотренных в модели условиях, температура возрастает на 9–14 %, что необходимо учитывать при проектировании трасс кабельных линий и проведении теплового расчета. Согласно правилу Монтзингера [5] экспериментально установлено, что для органической изоляции скорость химических реакций процессов разложения обычно возрастает примерно вдвое с увеличением температуры на каждые 10 °С.

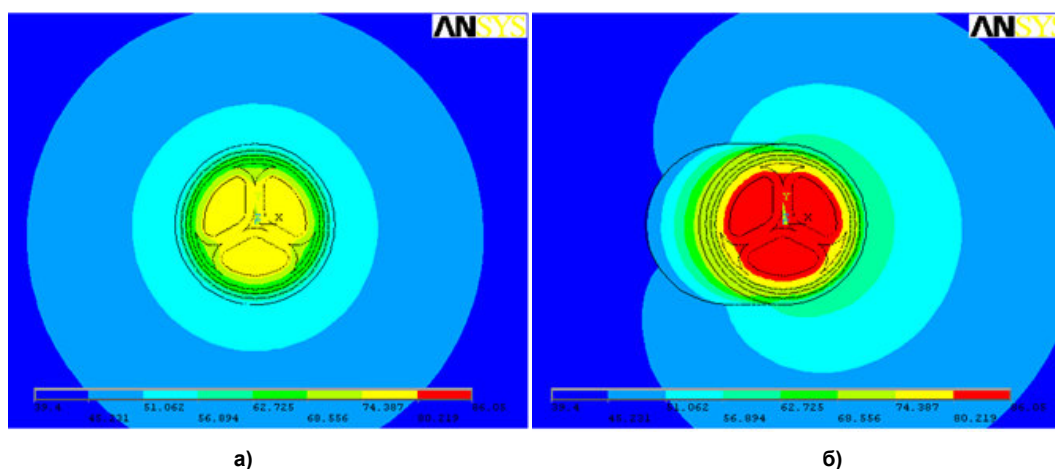


Рис. 2. Исследование теплового режима в звене «кабельная линия – грунт» в программном пакете ANSYS Multiphysics: а – распределение температур без наличия пустот; б – распределение температур с образованием пустоты, заполненной воздухом

Изменение температур в слоях кабеля и прилегающего к нему грунта

Слой	Температура, °С		
	Случай без наличия пустот (рис. 2, а)	Случай с образованием пустоты, заполненной воздухом (рис. 2, б)	
		Левая жила	Правая жила
Межфазное заполнение	77	86	
Слой фазной изоляции	77	86	86
Алюминиевая жила	77	86	86
Слой фазной изоляции	от 67 до 77	от 77 до 86	от 77 до 86
Поясная изоляция	от 64 до 67	от 73 до 77	от 73 до 77
Алюминиевая оболочка	64	73	73
Подушка из битума	от 58 до 64	от 72 до 73	от 65 до 73
ПВХ шланг	от 55 до 58	от 71 до 72	от 60 до 65
Пустота	–	от 42 до 71	–
Грунтовый слой – 4,5 см от поверхности кабеля	от 44 до 55	от 38 до 71	от 47 до 60

Для оценки перегрева изоляции КЛ в зависимости от размеров и вида пустот, которые могут образовываться при подвижках КЛ и от электродинамических воздействий при КЗ, были проведены исследования в разработанной модели трехжильного КЛ в ANSYS с учетом уставок устройств релейной защиты и автоматики [4]. Рассмотрено два вида пустоты: 1) круговая; 2) пустота размером 2/3 окружности. Рабочий режим проанализирован с током нагрузки 390 А, длительность от 0 до 4500 с, далее идет режим двухфазного КЗ с током 9000 А, длительностью 0,7 с, после чего до 9000 с рассматривается процесс остывания изоляции. На рис. 3 приведены картины температуры изоляции КЛ для времени 4500,7 с (сразу после режима КЗ) с круговой пустотой и пустотой 2/3 окружности.

Проведенные исследования по результатам моделирования в ANSYS по приросту температуры в изоляции КЛ от размеров пустоты, которая может образовываться как при подвижках грунта,

так и при КЗ от действия электродинамических сил, представлены в виде графиков на рис. 4.

Установленные зависимости рис. 4 можно описать степенным трендом:

$$\text{Пр}_T(\%) = k \cdot (R_{\text{пуст}})^n, \quad (1)$$

где $\text{Пр}_T(\%)$ – прирост температуры изоляции в зависимости от размеров пустоты $R_{\text{пуст}}$; $R_{\text{пуст}}$ – размер пустоты по границе от КЛ до дальней стороны пустоты в мм; k, n – постоянные коэффициенты, определяемые типом пустоты, режимом работы КЛ. Например, для условий рабочего режима (2/3 пустоты): $k = 13, n = 0,31$.

Классическая тепловая схема замещения, применяемая для расчета длительно допустимых токов для эксплуатируемых КЛ, приведена на рис. 5. На рис. 6 приведена рекомендованная по результатам вышеприведенных исследований схема замещения, учитывающая образование пустот.

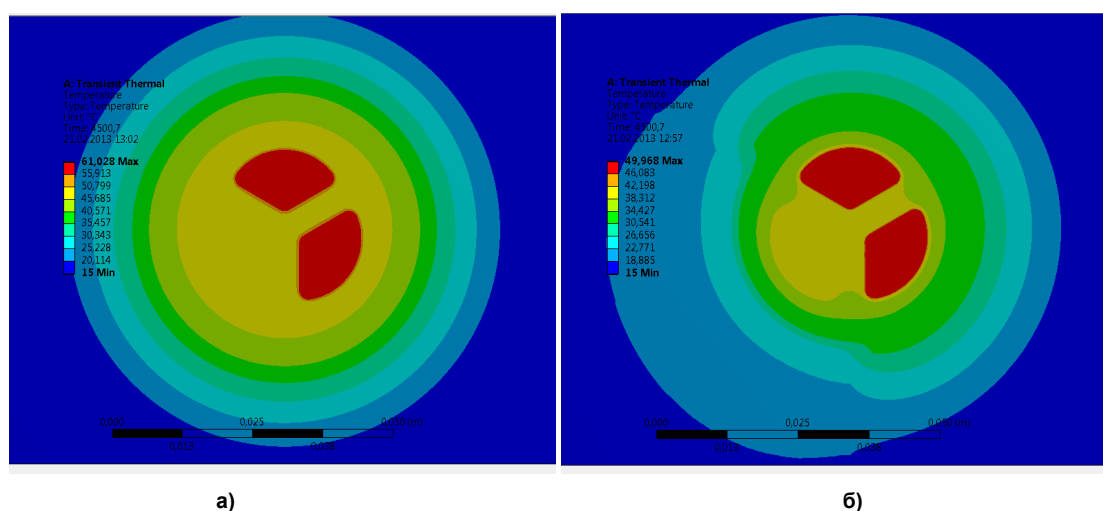


Рис. 3. Динамика температурного режима в изоляции трехжильной КЛ, рабочий режим 0-4500 с (390 А)+режим КЗ 4500-4500,8 (9000А): а – круговая пустота 20 мм; б – пустота 2/3 окружности 20 мм

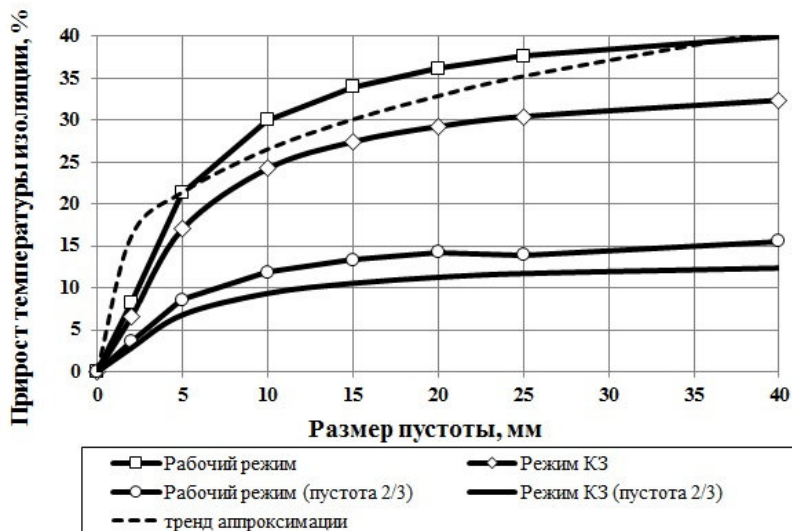


Рис. 4. Прирост температуры в изоляции (%) трехжильного КЛ от размеров пустоты (мм) и режима работы (рабочий режим, режим К3)

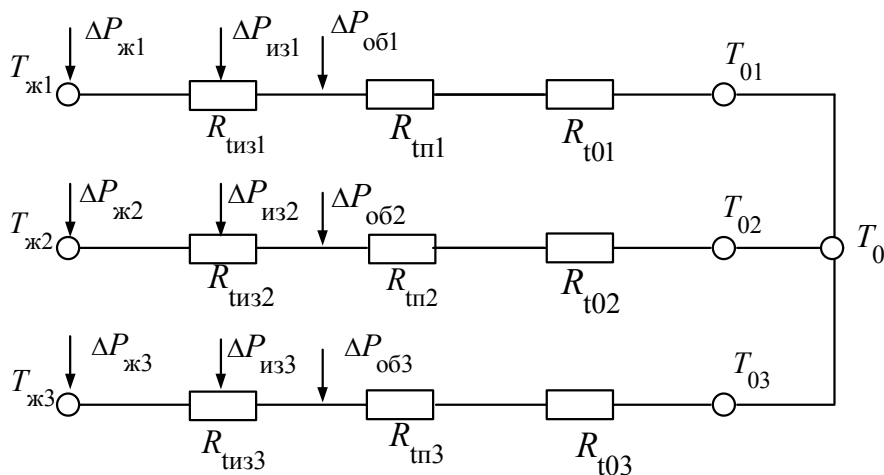


Рис. 5. Тепловая схема замещения для расчета длительно допустимых токов КЛ, рекомендованная ранее

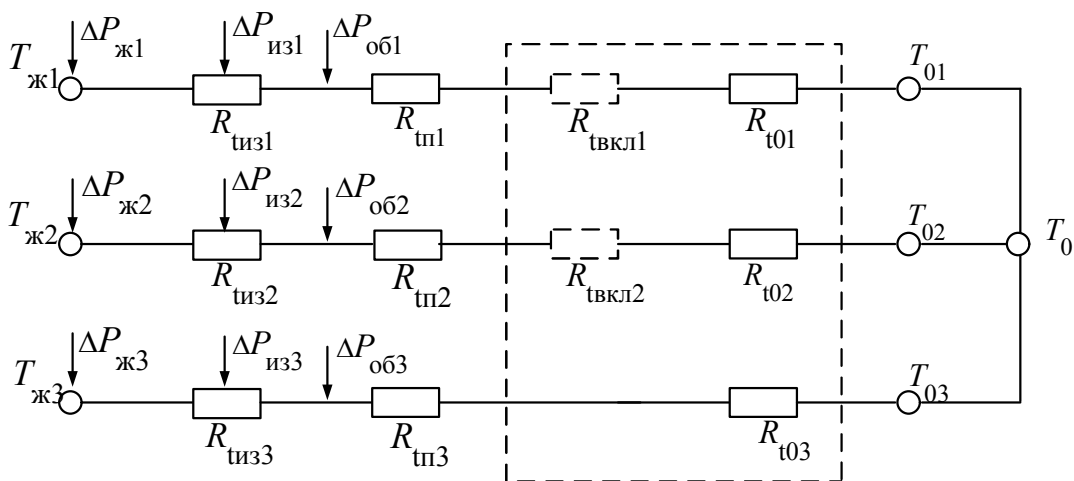


Рис. 6. Тепловая схема замещения для расчета длительно допустимых токов КЛ, рекомендуемая по результатам проведенных исследований с учетом вероятных пустот

Уравнение теплового баланса для 1, 2 жилы схемы рис. 6 можно записать в следующем виде:

$$T_{ж1} - T_0 = \Delta P_{ж1} \cdot (R_{из1} + R_{ш1} + R_{вкл1} + R_{т01}) + \Delta P_{из1} \cdot (R_{из1} + R_{ш1} + R_{вкл1} + R_{т01}) + \Delta P_{об1} \cdot (R_{ш1} + R_{вкл1} + R_{т01}). \quad (2)$$

Для 3 жилы:

$$T_{ж3} - T_0 = \Delta P_{ж3} \cdot (R_{из3} + R_{ш3} + R_{т03}) + \Delta P_{из3} \cdot (R_{из3} + R_{ш3} + R_{т03}) + \Delta P_{об3} \cdot (R_{ш3} + R_{т03}), \quad (3)$$

где $T_{ж}$ – температура жилы; T_0 – температура окружающей среды; $R_{из}$ – термическое сопротивление изоляции кабеля; $R_{ш}$ – термическое сопротивление защитных покровов; $R_{вкл}$ – термическое сопротивление включений (обусловленное образованием рассмотренных выше пустот); $R_{т0}$ – термическое сопротивление окружающей среды; $\Delta P_{ж}$ – мощность, выделяемая в жиле; $\Delta P_{из}$ – диэлектрические потери в изоляции; $\Delta P_{об}$ – мощность от нагрева защитной оболочки КЛ.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что в условиях эксплуатации наблюдаются подвижки кабеля, обусловленные либо подвижками грунта, либо подвижками кабеля при КЗ от электродинамических взаимодействий, приводящие к образованию пустот во влажном и мерзлом грунтах. В зависимости от размеров пустоты и режима работы КЛ (рабочий, режим короткого замыкания) возникает перегрев

изоляции до 40 % при круговой пустоте размером с диаметр КЛ. При наиболее вероятной пустоте в 2/3 окружности с размером, равным диаметру кабеля – до 15 %, что не учитывается на сегодняшний день при монтаже трасс КЛ, расчете длительно допустимого тока нагрузки и оценке ресурса изоляции.

Литература

1. Правила устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. Вып. 7. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2007.

2. Коржов, А.В. Исследование влияния магнитной составляющей электромагнитного поля на интенсивность частичных разрядов в кабелях с бумажной пропитанной и полиэтиленовой изоляцией / А.В. Коржов // Кабели и Провода. – 2013. – № 1 (338). – С. 12–17.

3. Коржов, А.В. Методы и модели оценки состояния изоляции и электробезопасности кабельных линий 6(10) кВ городских электрических сетей: моногр. / А.В. Коржов, А.И. Сидоров. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. – 252 с.

4. Коржов, А.В. Методика выбора уставок релейной защиты и зонное автоматическое повторное включение в кабельной сети 6(10) кВ для ресурсосбережения изоляции и улучшения условий труда / А.В. Коржов // Промышленная энергетика. – 2013. – № 2.

5. Канискин, В.А. Оценка технического состояния кабелей и кабельных сетей / В.А. Канискин, А.А. Пугачёв, А.И. Таджибаев; под. ред. А.И. Таджибаева. – СПб.: ПЭИПК, 2007. – 172 с.

Коржов Антон Вениаминович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8(351) 267-92-46.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Power Engineering"
2013, vol. 13, no. 1, pp. 39–45**

Estimation of thermal conditions of insulation in the ANSYS 2D model of link «cable line 6(10) kV – soil» with consideration for movements of soil and relay protection set values

A.V. Korzhov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In this article movements of soil and cables during the annual cycle of exploitation are determined, as exemplified by city active cable lines 6(10) kV and test models. The experiments were conducted by measuring the depth of bedding of selected points of cable lines lying in different conditions using the device RIDGID-SeekTechSR-20. The analysis of the acquired data showed that the cable lines movements can lead to formation of dangerous mechanical tension and hollows. For the estimation of thermal conditions of insulation with consideration for probable sizes of the hollows, that are formed during the movements of cable lines in the soil, 2D models of link «cable line – soil» were developed with ANSYS. Thermal conditions of insulation were analyzed during operation modes and short-circuit regimes with the consideration for relay protection and automation set values. Probable zones of insulation overheating are determined, the equivalent thermal circuit for admissible currents calculation is corrected based on the results of modeling.

Keywords: cable, insulation, relay protection, thermal analysis, soil, equivalent circuit.

References

1. Rules on design of power electric installations: All functional chapters of PUE-6 and PUE-7. 7th publication [Pravila ustroystva elektroustanovok: Vsedeystvuyushchie razdely PUE-6 I PUE-7. 7-oy vypusk.] – Novosibirsk: Sib.univ.izd-vo, 2007.

2. Korzhov A.V. Study of the effect of magnetic part of the electromagnetic field on the intensity of partial discharges in cables with impregnated-paper insulation and polyethylene insulation. [Issledovanie vliyaniya magnetnoy sostavlyayushchey elektromagnitnogo polya na intensivnost chastichnykh razryadov v kabelyakh s bumazhnoy propitannoy I polietilenovoi izolyatsiyey]. *Kabeli I provoda [Cables and wires]*, Moscow, 2013 no.1(338) pp.12-17.

3. Korzhov A.V., Sidorov A.I. *Methods and models of estimation of insulation and electrosafety conditions of 6(10) kV cables of city cable lines [Metody I modeli otsenki sostoyaniya izolyatsii I elektrobezopasnosti kabelnykh liniy 6(10) kV gorodskikh elektricheskikh setei]*, Chelyabinsk, 2009, 252 p.

4. Korzhov A.V. Methods of choosing relay protection set values and zoned automatic reclosing in cable network of 6(10) kV for resource conservation of insulation and amelioration of labor conditions. [Metodika vybora ustavok releynoi zashchity I zonnnoe avtomaticheskoe povtornoie vklyuchenie v kabelnoy seti 6(10) kV dlya resursoberezheniya izolyatsii I ulutssheniya usloviy truda], *Industrial Energetics [Promyshlennaya Energetika]*, 2013, no.2.

5. Kaniskin V.A., Pubachev A.A., Tadzhibayev A.I. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya kabeley I kabelnykh setey [Estimation of Technical Conditions of Cables and Cable Networks]*. Saint Petersburg, 2007, pp. 172.

Поступила в редакцию 19.03.2013 г.