

УДК 621.315.2.027.8

**В.М.Золотарев**, канд.техн.наук (ЗАО "Завод "Южкабель", Харьков), **А.А.Щерба**, член-корр. НАН України, **А.Д.Подольцев**, докт.техн.наук, **И.Н.Кучерявая**, канд.техн.наук (Институт электродинамики НАН України, Киев)

### АНАЛИЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРОЦЕССОВ В КАБЕЛЕ НА НАПРЯЖЕНИЕ 330 кВ С СЕГМЕНТИРОВАННОЙ ЖИЛОЙ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ЕГО ИЗОЛЯЦИИ

*Исследованы высокочастотные процессы в силовом кабеле с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ с сегментированной токопроводящей жилой при его испытании в резонансной установке измерения уровня частичных разрядов. Разработана математическая модель и методика численного расчета электромагнитного поля и на его основе эквивалентных параметров кабеля в диапазоне частот  $50 \div 10^6$  Гц, а также электротехническая модель системы "испытательная установка – силовой кабель – эталонная емкость". Изучены резонансные свойства кабеля и характер распространения высокочастотного сигнала от зоны частичного разряда вдоль кабеля.*

*Досліджено високочастотні процеси у силовому кабелі із поліетиленовою ізоляцією на напругу 330 кВ з сегментованою струмопровідною жилою. Розроблено математичну модель та методику чисельного розрахунку електромагнітного поля та еквівалентних параметрів кабеля в діапазоні частот  $50 \div 10^6$  Гц, а також электротехнічну модель системи "випробувальна установка – силовий кабель – еталонна ємність". Вивчено резонансні властивості та характер розповсюдження високочастотного сигналу від зони часткового розряду вздовж кабеля.*

**Введение.** Силовые кабели являются важной составной частью передающих и распределительных электрических сетей, поскольку они позволяют доставлять энергию в те районы, которые недоступны для воздушных линий электропередачи. Наиболее привлекательной и ценной особенностью подземных кабельных линий электропередачи является присущая им высокая надежность эксплуатации из-за отсутствия внешних атмосферных воздействий (ветер, гололед, грозовые перенапряжения), отсутствие опор и хорошая электромагнитная совместимость с окружающей средой по сравнению с воздушными линиями.

С начала 90-х гг. в электрических сетях Украины кабели с пластмассовой изоляцией активно замещают кабели с бумажной пропитанной и маслонаполненной изоляцией в классах среднего и высокого напряжения. Среди пластмассовых изолирующих материалов в силовых кабелях наиболее предпочтительным является сшитый полиэтилен (СПЭ) ввиду его хороших диэлектрических свойств – низкой величиной диэлектрической проницаемости и фактора потерь, а также большого запаса термической стойкости. В настоящее время энергосистемы Украины ориентированы на применение в распределительных сетях именно таких кабелей с СПЭ на напряжение до 330 кВ. Предпосылками для этого являются, наряду с их высокими эксплуатационными показателями, наличие отечественного производства, в частности, на ЗАО "Завод "Южкабель" (г. Харьков), где освоен выпуск таких кабелей на напряжение до 330 кВ с большим поперечным сечением жилы – 1000–3000 мм<sup>2</sup>. Для уменьшения электрических потерь в жилах такого сечения выполняется их сегментирование согласно патенту Milliken [5]. Такие жилы типа "Milliken" состоят из нескольких (обычно 3–5) многопроволочных сегментов, изолированных друг от друга и скрученных в процессе изготовления с целью транспозиции протекающих в них токов.

Для испытания полимерной изоляции силового кабеля сверхвысокого напряжения (в данной работе рассматривается кабель на напряжение 330 кВ) разрабатываются специальные испытательные установки, как правило, резонансного типа, позволяющие получать в кабеле напряжение 500 кВ и обеспечивающие измерение уровня возникающих при этом частичных разрядов в изоляции кабеля. В ходе проведения испытаний в системе «испытательная установка – силовой кабель – эталонная ем-

кость» возникают сложные высокочастотные и волновые процессы на частотах около 1 МГц. Для правильной интерпретации полученных результатов измерений высокочастотного сигнала, а также для изучения влияния на этот сигнал характеристик кабеля, например, его длины, необходимо предварительно выполнить анализ высокочастотных процессов в кабеле каждого из выпускаемых типов-размеров. Для этого должна быть разработана общая методика расчета эквивалентных электрических параметров кабеля на высокой частоте с учетом сегментированной структуры его жилы и методика анализа высокочастотных процессов в кабеле. Учитывая уникальность выпускаемого на ЗАО "Южкabelь" силового кабеля на 330 кВ с полиэтиленовой изоляцией, а также отсутствие в литературе описания аналогичных методик, работа направлена на решение вышеуказанной проблемы.

*Целью работы* является, во-первых, разработка математической модели и методики численного расчета электромагнитного поля и на его основе эквивалентных параметров силового кабеля с сегментированной токопроводящей жилой большого сечения (1000–3000 мм<sup>2</sup>) в зависимости от частоты, изменяющейся в широких пределах (50÷10<sup>6</sup> Гц). Во-вторых, разработка электротехнической модели системы «испытательная установка – силовой кабель – эталонная емкость» с использованием значения найденных параметров и анализ высокочастотных процессов в кабеле при возникновении частичных разрядов в его основной изоляции.

Далее описаны постановка и решение соответствующих задач.

**Математическое описание электромагнитных процессов в кабеле с сегментированной жилой и расчет его эквивалентных параметров.** Учет влияния скин-эффекта в сегментированной жиле одного кабеля в упрощенной постановке с помощью приближенных аналитических выражений выполнен в работах [2, 7]. В работах [3, 4] для анализа электромагнитных процессов в жиле одного кабеля рассмотрен цепной подход, суть которого состоит в замене жилы совокупностью длинных проводников, характеризующихся собственной и взаимной индуктивностями. Анализ электромагнитных процессов в кабеле с сегментированной жилой, а также кабельной линии, состоящей из трех таких кабелей, на основе теории электромагнитного поля в литературе не рассматривался.

Применительно к задаче для испытательной установки рассматривается одиночный силовой кабель на напряжение 330 кВ, расположенный в воздухе. Изоляция кабеля выполнена из сшитого полиэтилена, а токопроводящая алюминиевая жила имеет площадь сечения 1600 мм<sup>2</sup> и выполнена из пяти сегментов. Поперечное сечение такого кабеля показано на рис. 1 и имеет следующие размеры: наружный диаметр жилы – 52 мм, толщина полиэтиленовой изоляции – 25 мм, диаметр по изоляции – 106 мм, наружный диаметр кабеля – 122 мм. На рис. 1 показана также конечно-элементная сетка.

Рассматривается случай, когда каждый сегмент выполнен из большого числа алюминиевых проводников, не изолированных друг от друга, так что он может рассматриваться как массивный проводник. В тоже время все пять сегментов жилы изолированы друг от друга с помощью диэлектрического картона. Предполагается, что в жиле кабеля (суммарный ток в пяти сегментах) протекает заданный переменный ток  $I_{жс}e^{j\omega}$ , а в экране – равный по величине и обратный по направлению ток –

$-I_{жс}e^{j\omega}$ . Задача состоит в том, чтобы найти распределение плотности тока по сечению каждого сегмента и в экране в широком диапазоне изменения угловой частоты тока  $\omega = 2\pi f$  и определить на основании этого распределения значений удельного эквивалентного активного и индуктивного сопротивлений кабеля в функции от частоты.

При анализе электромагнитного поля в кабеле принимаются следующие упрощающие допущения.

1. Выбранный отрезок кабеля предполагается достаточно протяженным, так что концевыми эффектами на его входе и выходе можно пренебречь. С учетом этого электромагнитная задача может рассматриваться в двумерной

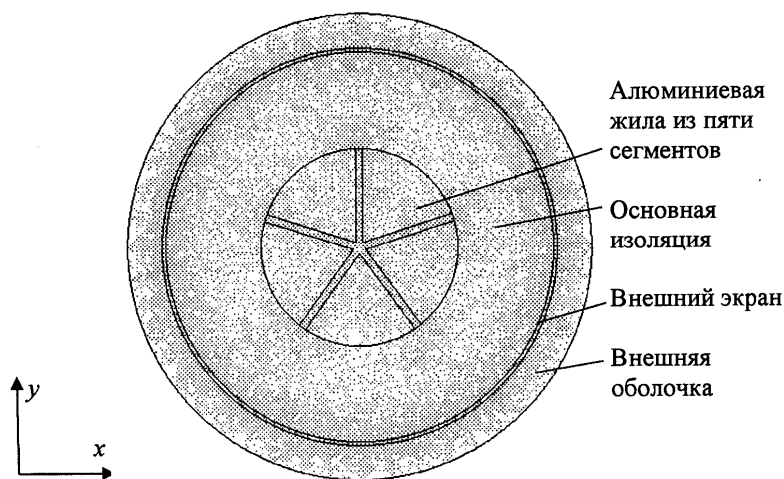


Рис. 1

постановке, в декартовой системе координат в плоскости  $xOy$  относительно неизвестной величины  $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$  – векторного магнитного потенциала, имеющего единственную  $z$ -составляющую.

2. Рассматривается случай, когда каждый из пяти сегментов жилы выполнен из изолированных алюминиевых проводников и имеет внешнюю изоляцию, изолирующую сегменты друг от друга. Сегменты жилы перевиты по длине кабеля, формируя таким образом транспозицию. Это позволяет предположить, что во всех сегментах кабеля протекают одинаковые электрические токи, равные  $0,2I_{жс}e^{j\omega}$  (при условии, что площади поперечных сечений всех сегментов равны). Отметим, что анализ процессов в высокочастотном кабеле, когда каждый из сегментов выполнен из изолированных проводников, может быть проведен на основе подхода, развитого в работе [6].

3. В работе не учитывается влияние земли на электромагнитные процессы в кабеле. Поэтому ток в экране равен с обратным знаком току в жиле кабеля, который, в свою очередь, равен суммарному току в пяти сегментах жилы.

Распределение векторного магнитного потенциала в сечении кабеля с сегментированной жилой удовлетворяет следующей системе интегро-дифференциальных уравнений:

$$\text{– в изоляции:} \quad \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0, \quad (1)$$

– в проводящих средах – в сегментах жилы

$$j\omega\sigma \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times ((\mu_0\mu_r)^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma \Delta \dot{U}_k / L_l, \quad k = 1, \dots, 5; \quad (2)$$

а также интегральным выражениям для токов в каждом сегменте жилы

$$\int_{S_k} (-j\omega\sigma \dot{A}_z + \sigma \Delta \dot{U}_k / L_l) dS = 0, 2I_{жс}, \quad k = 1, \dots, 5, \quad (3)$$

– в проводящем внешнем экране кабеля

$$j\omega\sigma \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times ((\mu_0\mu_r)^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma \Delta \dot{U}_э / L_l, \quad (4)$$

а также интегральному выражению для тока во внешнем экране кабеля

$$\int_{S_э} (-j\omega\sigma \dot{A}_z + \sigma \Delta \dot{U}_э / L_l) dS = -I_{жс}. \quad (5)$$

В системе уравнений (1–5) обозначено:  $\sigma$ ,  $\mu_r$  – электропроводность и относительная магнитная проницаемость среды, соответственно;  $\Delta \dot{U}_k$  – падение напряжения вдоль оси  $z$  для  $k$ -го сегмента на участке протяженностью  $L_l$ ;  $S_k$  – площадь поперечного сечения  $k$ -го сегмента;  $S_э$  – сечение внешнего экрана кабеля;  $\Delta \dot{U}_э$  – падение напряжения вдоль оси  $z$  на экране кабеля.

Величины падений напряжения на сегментах  $\Delta \dot{U}_k$ ,  $k = 1, \dots, 5$ , а также на экране  $\Delta \dot{U}_э$  являются неизвестными и определяются с помощью выражений (3), (5). В качестве граничного условия на внешней границе расчетной области задавалось условие магнитной изоляции  $\dot{A}_z = 0$ .

После нахождения распределения магнитного потенциала  $\dot{A}_z(x, y)$  и значений падений напряжений на каждом сегменте кабеля и экране определялись эквивалентные параметры кабеля на единицу его длины, являющиеся функциями частоты, на основании следующего равенства  $\Delta \dot{U}_1 - \Delta \dot{U}_э = L_l(R'_{AC}(\omega) + j\omega L'(\omega))I_{жс}$ , из которого получаем

$$R'(\omega) = \operatorname{Re}\left(\frac{\Delta \dot{U}_1 - \Delta \dot{U}_э}{I_{жс}L_l}\right), \quad L'(\omega) = \operatorname{Im}\left(\frac{\Delta \dot{U}_1 - \Delta \dot{U}_э}{\omega I_{жс}L_l}\right). \quad (6)$$

Решение системы (1–5) относительно неизвестных  $\dot{A}_z$ ,  $\Delta \dot{U}_k$ ,  $k = 1, \dots, 5$  и  $\Delta \dot{U}_э$  выполнялось методом конечных элементов с помощью пакета COMSOL [8].

*Результаты расчета поля и параметров кабеля.* Результаты расчета плотности тока  $J_z / J_{dc}$  (где  $J_{dc}$  – плотность постоянного тока) в сегментах жилы силового кабеля для двух значений частоты показаны на рис. 2. Здесь видно, что при рабочей частоте кабеля 50 Гц из-за большого сечения алюминиевой жилы уже проявляется поверхностный эффект – плотность тока на поверхности жилы составляет 1,47 от значения плотности постоянного тока. При частоте 1 кГц проявление скин-эффекта усиливается – плотность тока на поверхности в 6,9 раза превышает плотность на постоянном

токе. Хотя в случае одного кабеля эффект близости не проявляется при распределении плотности тока, однако данная методика является общей и может использоваться для анализа электромагнитных процессов в кабельной линии, состоящей, как правило, из трех однофазных кабелей.

Зависимости от частоты эквивалентных параметров кабеля – активного сопротивления и индуктивности единицы его длины, рассчитанные согласно (6) и (7), показаны на рис. 3. Значения этих параметров при частоте 1 МГц будут использоваться далее в высокочастотной модели кабеля, позволяющей исследовать высокочастотные процессы в системе «испытательная установка – силовой кабель – эталонная емкость».

Таким образом, на основе разработанной математической модели анализа электромагнитного поля и ее численной реализации методом конечных элементов была создана методика расчета активного сопротивления и индуктивности силового кабеля с сегментированными жилами большого поперечного сечения, позволяющая рассчитывать значения параметров кабеля при различном количестве сегментов. Методика может быть обобщена на случай расчета параметров кабельной линии. При этом она позволяет учитывать способ прокладки линии, а также наличие поблизости металлических предметов или другой кабельной линии, влияющих, в силу наличия индуктивной связи, на эквивалентные параметры исследуемой кабельной линии. Учет вышеуказанных факторов позволяет выполнять на практике оптимизационные расчеты.

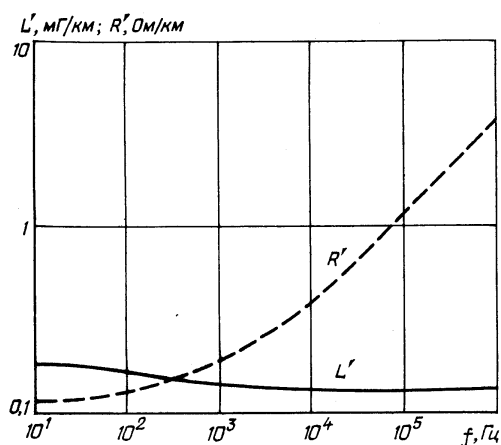


Рис. 3

**Анализ высокочастотных процессов в кабеле при его испытании на уровень частичных разрядов.** Эквивалентная электрическая схема высоковольтной резонансной испытательной установки с силовым кабелем и эталонной емкостью на его выходном конце показана на рис. 4. Схема составлена средствами пакета MatlabSimulink/SimPowerSystems [9], позволяющего моделировать и исследовать высокочастотные процессы в сложных электротехнических устройствах, и содержит однофазный источник питания 3300 В, 50 Гц, подключенный к первичной обмотке однофазного возбуждающего трансформатора. Во вторичной цепи трансформатора включен реактор, фильтр низких частот и силовой кабель с параллельно подключенной на выходе эталонной емкостью. Также в схеме имеются средства для измерения напряжений, токов и величины импеданса цепи.

В разработанной модели использовался исследуемый силовой кабель общей протяженностью 100 м, представленный в виде пяти отрезков по 20 м, каждый из которых моделировался длинной линией с распределенными параметрами. Введение пяти отрезков кабеля позволяет моделиро-

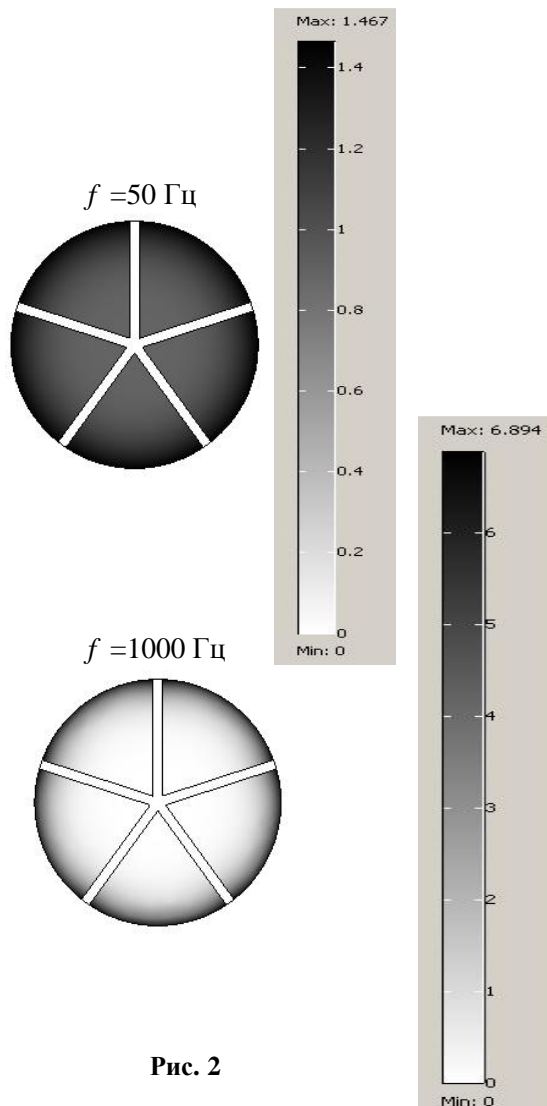


Рис. 2

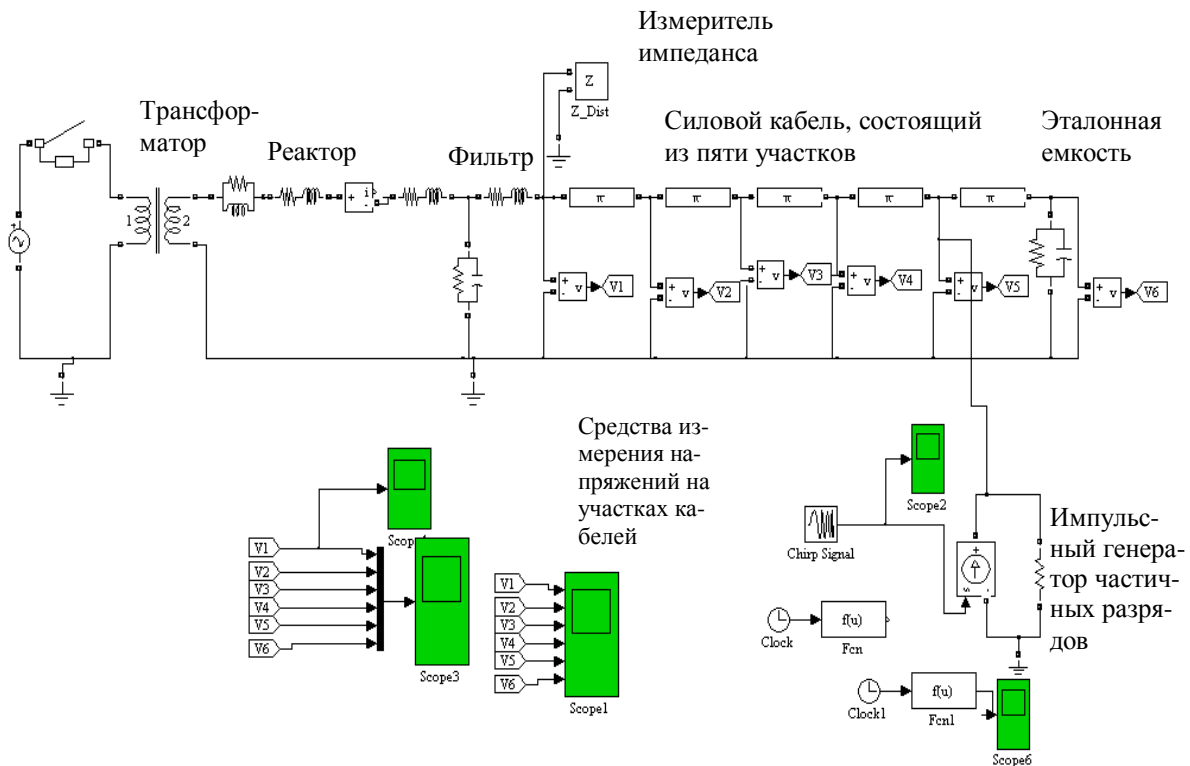


Рис. 4

вать высокочастотные процессы (до 10 МГц) и расположение предполагаемого источника частичных разрядов в различных точках кабеля, отстоящих на разном расстоянии от его входа. Для моделирования импульсного процесса возникновения частичного разряда в схеме рис. 5 использовался импульсный управляемый источник тока, показанный на схеме внизу справа. Источник генерировал двупольный импульс, задаваемый выражением

$$i(t) = \begin{cases} I_{\max} \sin(2\pi f_{\text{имп}} t), & 0 < t < f_{\text{имп}}^{-1} \\ 0, & t \geq f_{\text{имп}}^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

Здесь  $I_{\max}$  – амплитудное значение импульса тока (далее полагается  $I_{\max} = 1$  А),  $f_{\text{имп}}$  – частота импульсного тока, моделирующего частичный разряд (далее изменяется в пределах  $10^5 \div 10^7$  Гц).

Были выбраны следующие значения параметров основных элементов на схеме рис. 5.

– Источник питания: 3300 В, 50 Гц, однофазный.

– Трансформатор: первичные параметры  $U_1 = 3135$  В,  $I_1 = 160$  А, вторичные параметры  $U_2 = 25$  кВ,  $I_2 = 20$  А.

– Реактор: напряжение 500 кВ, реактивная мощность 20000 кВА, ток 40 А, максимальное значение индуктивности 40 Гн.

– Фильтр:  $L_f = 0,1$  Гн;  $R_f = 0,1$  Ом;  $C_f = 0,1$  мкФ;  $\text{tg } \delta_f = 0,1$  %.

– Силовой кабель с эталонной емкостью: напряжение 500 кВ, емкость  $C = 0,25$  мкФ, добротность цепи  $Q = 40$ .

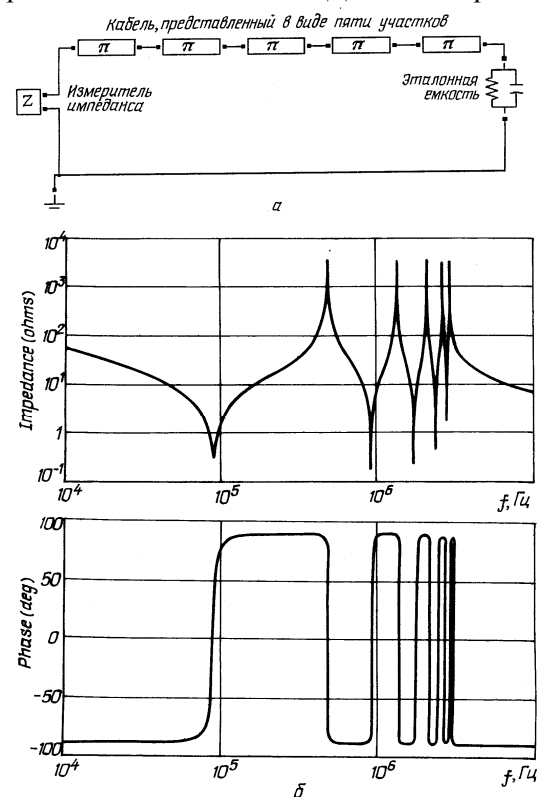


Рис. 5

В работе рассматривались два варианта: длина исследуемого кабеля равна 100 м или 10 м. Далее описаны результаты моделирования этих вариантов.

Длина кабеля равна 100 м. Для исследования резонансных свойств силового кабеля + эталонная емкость выполнялось вычисление импеданса эквивалентной электрической цепи, показанной на рис. 5,а, при различных значениях частоты. На рис. 5,б показана полученная частотная зависимость этого импеданса. Видно, что в системе существует пять резонансов тока (соответствуют случаю, когда модуль импеданса цепи достигает максимальных значений) и пять резонансов напряжения (когда модуль импеданса цепи достигает минимальных значений).

Для исследования характера распространения сигнала от зоны возникновения частичного разряда на вход кабеля, где осуществляется его измерение, выполнялся вычислительный эксперимент по схеме, показанной на рис. 6, вставка сверху. Здесь на выбранном участке возникновения

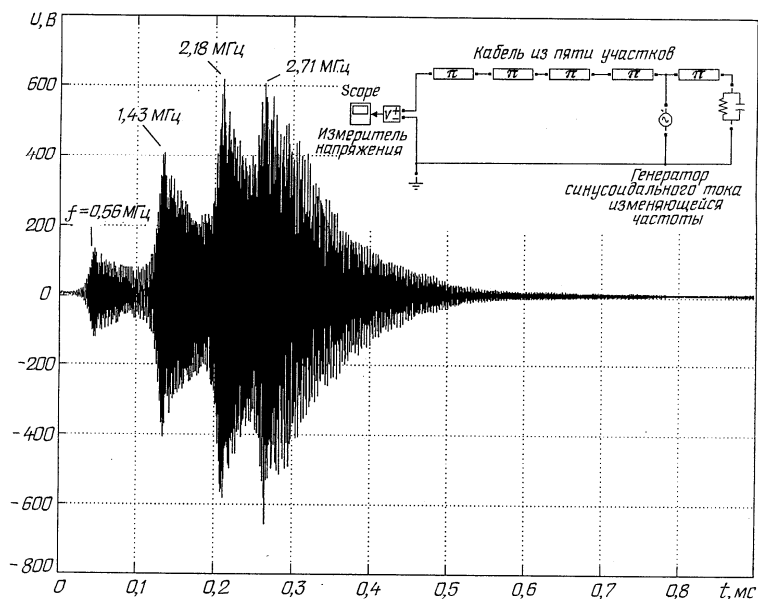


Рис. 6

частичного разряда подключался генератор синусоидального тока медленно изменяющейся частоты от  $10^5$  Гц до  $10^7$  Гц за время 1 мс. При этом измерялось напряжение на входе кабеля. Изменение этого напряжения от времени (а отсюда и от частоты) показано на рис. 6, откуда видно, что из-за проявления резонансных свойств кабеля амплитудное значение напряжения имеет точки экстремума, возникающие при совпадении частоты внешнего генератора с одной из резонансных частот кабеля, соответствующих резонансам тока. Видно также, что их значения совпадают со значениями резонансных частот на рис. 5,б для случаев резонанса тока (пятая резонансная частота, равная 3 МГц, на рис. 6 выражена не явно). Таким образом, можно заключить, что исследуемый силовой кабель длиной 100 м характеризуется резонансными частотами, лежащими в области 1 МГц.

Далее рассмотрим реакцию кабеля на импульсный сигнал в форме (8), моделирующий процесс возникновения частичного разряда. Схема для исследования высокочастотных процессов в кабеле в этом случае та же, что на рис. 4, в которой импульсный сигнал подавался между 4-м и 5-м участками кабеля, т.е. предполагалось, что частичный разряд в изоляции возникает в месте, отстоящем на 20 м от его конца. Измерение напряжения как реакции кабеля на это воздействие выполнялось на входе кабеля. Форма импульса тока задавалась согласно (6), а частота  $f_{имп}$  изменялась в широких пределах.

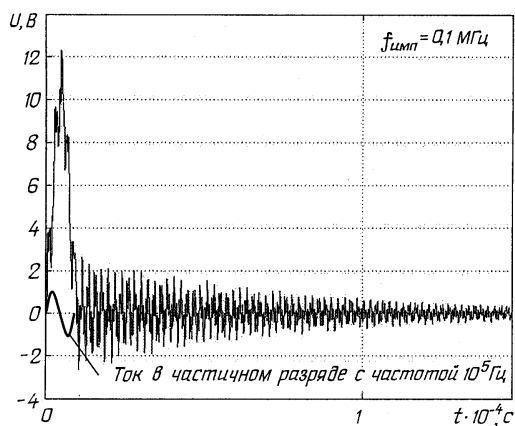


Рис. 7

На рис. 7 показан случай, когда частота импульса тока выбиралась из условия меньше первой резонансной частоты кабеля  $f_1 = 0,56$  МГц и принималась равной  $f_{имп} = 0,1$  МГц. Видно, что кривая напряжения содержит низкочастотный сигнал (вынужденная составляющая, частота которой соответствует  $f_{имп}$ ) и малые по амплитуде высокочастотные переходные составляющие, частоты которых определяются резонансными свойствами кабеля. Затухание этих составляющих происходит за время около 0,1 мс, что значительно меньше периода основного тока в кабеле, соответствующего 50 Гц. В случае, когда частота импульсного тока совпадает с частотой первого резонанса кабеля (рис. 8), вынужденная составляющая практически не видна на фоне значительных по амплитуде высокочастотных колебаний, обусловленных наличием собственных резонансов в кабеле.

Амплитуда колебаний измеряемого напряжения при этом значительно возрастает (28 В на рис. 8 по сравнению с 12 В на рис. 7 для случая низкой частоты импульса). На вставке рис. 8 показано в увеличенном масштабе изменяющееся по времени напряжение на входе в кабель. Из анализа этой кривой следует, что она образована из комбинации гармонических сигналов, состоящих из собственных колебаний в кабеле на резонансных частотах.

На рис. 9 показана реакция кабеля на воздействие импульса тока частичного разряда, характеризующегося более высокими значениями частоты  $f_{имп}$ , откуда видно, что именно при частоте импульса тока, совпадающей с частотой третьего резонанса  $f_{имп} = f_3 = 2,18$  МГц (рис. 6), амплитуда напряжения достигает максимального значения, равного 45 В. Затухание переходного процесса так же, как и при низких частотах, происходит за время около 0,1 мс.

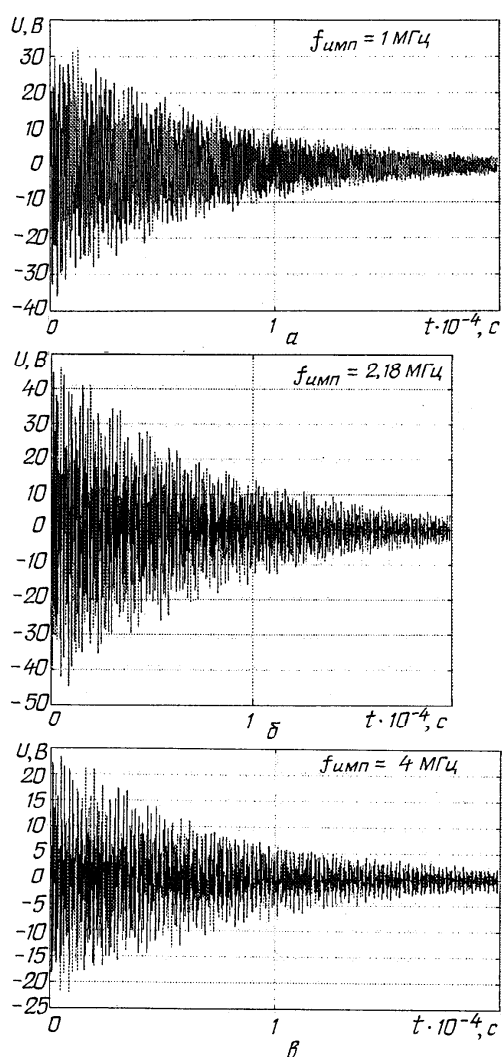


Рис. 9

результаты расчетных исследований для случая короткого кабеля показаны на рис. 10 для двух значений частоты импульсного тока. Известно, что значения резонансных частот короткого кабеля будут приблизительно в 10 раз выше соответствующих значений частот длинного кабеля, равного 100 м. Поэтому собственные колебания короткого кабеля будут возбуждаться на более высоких частотах. Это видно на обоих графиках рис. 10, а также видна вынужденная составляющая в кривой напряже-

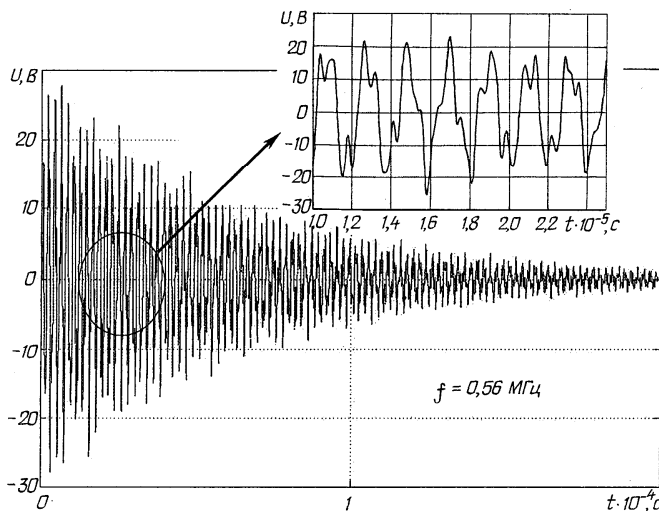


Рис. 8

Из приведенных результатов расчета высокочастотных процессов в кабеле длиной 100 м, возникающих как реакция на частичный разряд в изоляции этого кабеля, можно заключить следующее.

1. При протекании импульса тока, вызванного возникновением частичного разряда в изоляции кабеля, в системе как реакция на это внешнее воздействие возникают высокочастотные колебания на частотах, совпадающих с частотами собственных резонансов кабеля. Если частота тока меньше первой резонансной частоты кабеля, то напряжение на входе определяется интегралом от тока импульса и имеет, наряду со значительной вынужденной составляющей, малые по амплитуде высокочастотные переходные составляющие.

2. В случае, если временные характеристики импульса тока в изоляции кабеля совпадают с одной из резонансных частот системы (или близки по значению), величина сигнала на входе кабеля будет значительно больше, чем при низкой частоте.

3. Существуют такие параметры токового импульса, в частности, значение  $f_{имп}$ , при которых реакция кабеля на это внешнее воздействие будет максимальной. Для отрезка кабеля длиной 100 м это соответствует случаю  $f_{имп} = f_3 = 2,18$  МГц, т.е. частоты тока совпадают с частотой третьего резонанса кабеля.

*Длина исследуемого кабеля равна 10 м.* Резу-

ния и высокочастотные переходные составляющие, соответствующие резонансным свойствам кабеля. В силу более высоких значений резонансных частот измеренное напряжение высокочастотных колебаний имеет меньшее амплитудное значение, чем для случая длинного кабеля, что видно из сравнения данных рис. 10 и 8.

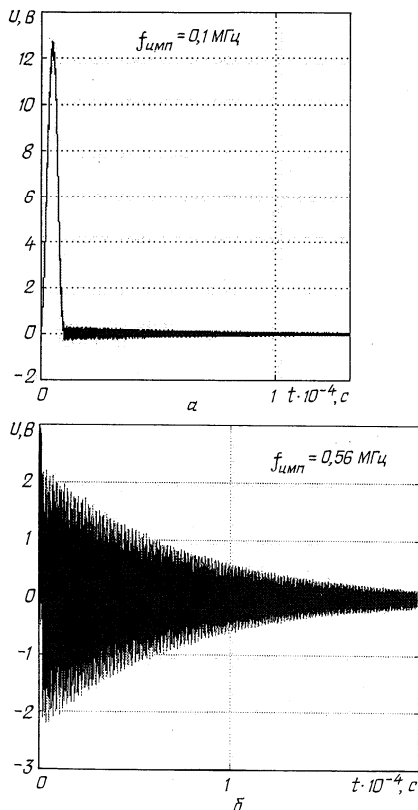


Рис. 10

выполнен расчет методом конечных элементов высокочастотного электромагнитного поля и эквивалентных параметров такого кабеля в широком диапазоне изменения частоты –  $50 \div 10^6$  Гц.

Изучены резонансные свойства силового кабеля и показано, что при совпадении частоты импульсного тока частичного разряда с одной из резонансных частот кабеля величина измеряемого сигнала на входе кабеля достигает наибольшего значения. Также в работе показано, что информация о токе частичного разряда может быть выделена на фоне возникающих высокочастотных собственных колебаний, если частота этого тока меньше частоты первого резонанса кабеля. Полученные результаты исследований могут быть использованы при выборе оптимальной длины исследуемого кабеля.

Таким образом, располагая данными о временных характеристиках частичных разрядов, возникающих в изоляции силового кабеля, можно рекомендовать выбор такой длины исследуемого кабеля, при которой одна из резонансных частот (первого, второго или третьего резонансов) совпадала бы с частотой тока частичного разряда. При этом измеряемый сигнал на входе кабеля будет иметь наибольшую амплитуду, а значит при заданной чувствительности средств измерения будут измерены более малые токи частичных разрядов.

Временные характеристики тока частичного разряда могут быть достоверно измерены в случае, если частота этого тока ниже первой частоты собственного резонанса кабеля. В этом случае полезный сигнал, содержащий информацию о токе частичного разряда, явно выделяется на фоне возникающих высокочастотных колебаний, вызванных наличием собственных резонансов в системе.

**Заключение.** В работе применительно к задаче исследования высокочастотных процессов в силовом кабеле при его испытании на уровень частичных разрядов разработана высокочастотная электротехническая модель испытательной установки, включающая кабель, рассматриваемый в виде электрической цепи с распределенными параметрами. Для количественного анализа электромагнитных процессов в такой установке в работе использовался пакет программ Matlab/Simulink/SimPowerSystems.

Для определения высокочастотных значений эквивалентных параметров силового кабеля с сегментированной жилой типа "Милликен" была разработана математическая модель и

1. Каден Г. Электромагнитные экраны. – М., Л.: Энергоиздат, 1957. – 327 с.
2. Уиду Б. Кабельные линии высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.
3. Argaut P., Daurelle J.Y. Calculation method of power cable AC resistance with individually insulated strands. //Proc. of CABLE 1999. – Vol. 2. – Pp. 582–591.
4. Fromm U. Optimized conductors for XLPE cables with a large cross-section. //European Trans. on Electrical Power. – 2005. – No. 15. – Pp. 109 – 121.
5. Milliken H. Electrical Cable. Patent Publication 1933, US #475094.
6. Podoltsev A. D., Kucheryavaya I.N., Lebedev B.B. Analysis of effective resistance and eddy-current losses in multiturn winding of high-frequency magnetic components. //IEEE Trans. on Magn. Vol. 39. – No 1. – 2003. – Pp. 539–548.
7. Suzuki H., Kanaoka M. Theoretical investigation on skin effect factor of conductor in power cables. //IEEE Trans. PE. – Vol. 126. – 2006. – Pp. 807–820.
8. [www.comsol.com](http://www.comsol.com)
9. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)

Надійшла 17.11.2009