

УДК 621.3.048

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПАКЕТЕ MATLAB SIMULINK ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ В СЕТИ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ

**А. А. АЛФЕРОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

В идеальной электроэнергетической системе энергия должна передаваться при нормальных значениях частоты и напряжения, не изменяющихся во времени. Однако в реальных энергосистемах эти условия не выполняются.

Присутствующие в кабельных линиях нелинейных электропотребителей высшие гармонические составляющие приводят к негативным, а иногда и к аварийным последствиям: возможному перегреву и разрушению нулевых рабочих проводников кабельных линий вследствие их перегрузки токами третьей гармоники. Гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, создают дополнительные потери в кабельных линиях, что связано с увеличением действующего значения негармонического тока, увеличением активного сопротивления проводника из-за скин-эффекта и увеличением диэлектрических потерь; способствуют ускоренному старению изоляции проводов и кабелей.

Математическое моделирование обычно выполняется с целью познания свойств оригинала путем исследования его модели, а не самого объекта. Моделирование оправдано в том случае, когда оно проще создания самого оригинала или когда последний по каким-либо причинам лучше вообще не создавать.

При использовании обобщенных моделей становится возможным моделирование и достаточно сложных объектов, например, электроэнергетических систем или промышленных комплексов.

Таким образом, математическое моделирование в несколько раз снижает трудоемкость проведения исследований и повышает точность полученных результатов.

### **Основная часть**

Высоковольтная изоляция, как правило, состоит из нескольких различных диэлектриков (например, бумага, масло, электрокартон и т. д.) и поэтому обладает структурной неоднородностью. При увлажнении или загрязнении отдельных ее слоев степень неоднородности резко возрастает, так как увлажненный слой обладает в сотни раз большей проводимостью и повышенной диэлектрической проницаемостью. Неравномерно увлажненную изоляцию можно рассматривать как состоящую из множества слоев диэлектриков, напряженности электрического поля в которых, а следовательно, и заряды, распределяются обратно пропорционально проводимостям. В результате этого на границах, разделяющих слои, накапливаются заряды абсорбции, возникновение которых обусловлено разностью плотности зарядов в смежных слоях диэлектриков. Накопление зарядов абсорбции происходит не сразу после приложения к изоляции напряжения, а по истечении некоторого времени, зависящего от проводимости и емкости каждого слоя диэлектрика [1].

Схема замещения изоляции кабельной линии приведена на рис. 1.

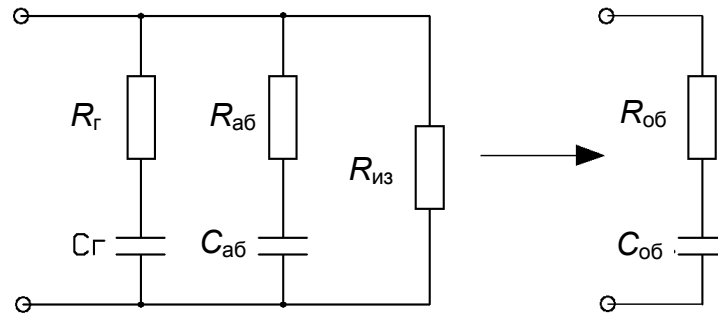


Рис. 1. Схема замещения изоляции кабельной линии:

$R_{Г}$ ,  $C_{Г}$  – сопротивления, обусловленные геометрической формой и размерами изоляции;  
 $R_{аб}$ ,  $C_{аб}$  – абсорбционные сопротивления и емкость изоляции, отражающие процесс накопления заряда абсорбции;  $R_{из}$  – сопротивление изоляции;  $R_{об}$  – эквивалентное активное сопротивление изоляции;  $C_{об}$  – эквивалентная емкость изоляции

Реализация математической модели в Simulink приведена на рис. 2.

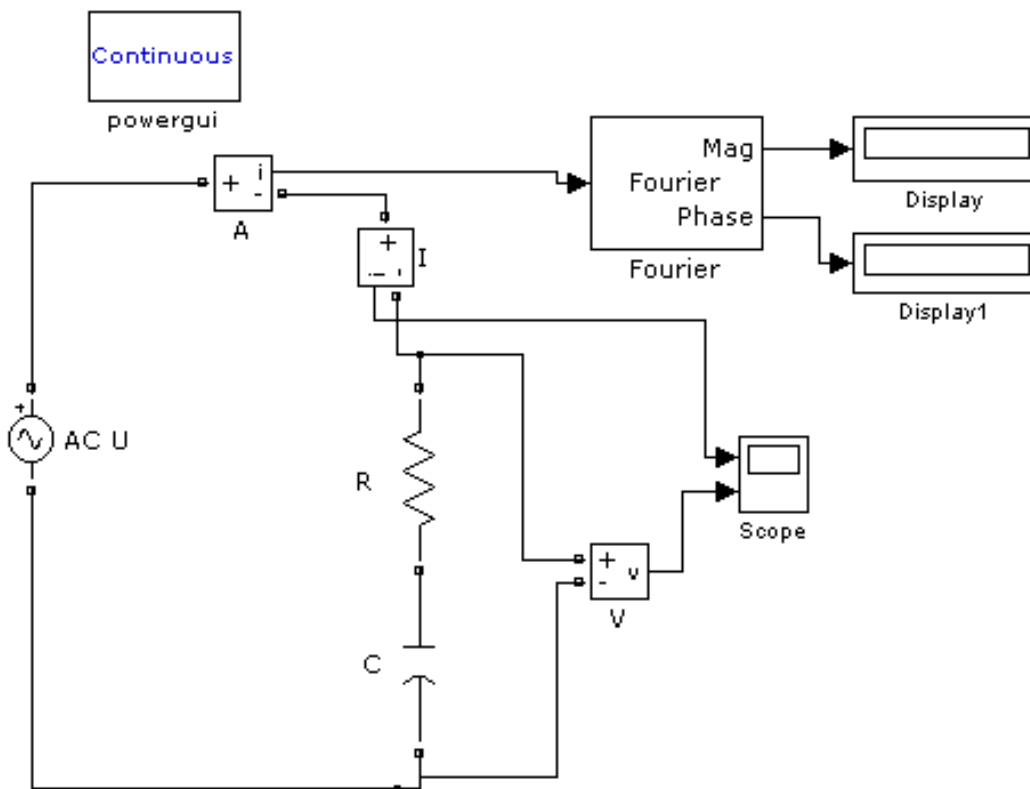


Рис. 2. Математическая модель схемы в среде Simulink

Работа схемы начинается с ввода параметров источника синусоидального сигнала AC Voltage Source. В данное окно параметров вводились амплитудное значение напряжения, начальная фаза и частота питающего напряжения. Для получения сопоставимых результатов в окна параметров вводились данные, полученные в ходе проведения эксперимента для кабеля N2XS<sub>Y</sub> 1 × 120 мм<sup>2</sup> с изоляцией из сшитого полиэтилена и затем обработанные в среде MathCAD (рис. 3).

	0		0		0
0	94,89	$\vec{U} =$	0	363,712	$Y_{golU} =$
1	158,8		1	385,102	
2	227,3		2	392,174	
3	330,1		3	302,812	
4	678,5		4	354,497	
5	$1 \cdot 10^3$		5	357,242	
6	$1,491 \cdot 10^3$		6	363,03	
7	$2,208 \cdot 10^3$		7	368,074	
8	$3,356 \cdot 10^3$		8	373,147	
9	$4,729 \cdot 10^3$		9	379,515	
10	$6,827 \cdot 10^3$		10	365,585	
11	$1 \cdot 10^4$		11	385,971	
12	$1,56 \cdot 10^4$		12	387,101	
13	$2,193 \cdot 10^4$		13	387,72	
14	$3,328 \cdot 10^4$		14	361,37	
15	$4,74 \cdot 10^4$		15	372,622	
16	$6,805 \cdot 10^4$		16	340,361	
				0	12,16
				1	11,24
				2	7,36
				3	-174,4
				4	3,27
				5	3,42
				6	-175
				7	4,76
				8	-174,6
				9	5,49
				10	-174,9
				11	-172,5
				12	7,2
				13	4,57
				14	3,41
				15	-174,8
				16	8,13

Рис. 3. Данные, вводимые в математическую модель: частота ( $F$ ), амплитудное значение напряжения ( $U$ ) и его начальная фаза ( $Y_{golU}$ )

Далее вводятся параметры блока Fourier. За фундаментальную частоту принималась частота входного напряжения источника синусоидального сигнала. Вывод данных осуществляется в блоки Display и Display1, в которых выводится амплитудное значение тока утечки и его начальная фаза соответственно [2].

Емкость кабельной линии остается величиной постоянной, а емкостное сопротивление напрямую зависит от угловой частоты  $\omega$ . В блоке «С» задается емкость кабеля, а программа самостоятельно вычисляет емкостное сопротивление в зависимости от параметров синусоидального источника питания. Заданная емкость включает в себя абсорбционную и геометрическую составляющие.

Активное сопротивление кабельной линии не зависит напрямую от частоты питающего напряжения. На его значение может влиять ряд факторов: поляризационные процессы в изоляции кабельной линии, увлажненность и загрязненность изоляции (сопротивление абсорбции). В случае высоких напряжений на изменение сопротивления может влиять ионизация газовых включений внутри диэлектрика, особенно интенсивно проходящая при высоких частотах.

Поэтому значение активного сопротивления является нелинейной величиной. Для определения его зависимости от частоты была проведена линейная аппроксимация экспериментальных данных в пакете MathCAD, который позволяет получить линейную регрессию общего вида, где аппроксимирующая функция задается линейной комбинацией функций, причем сами функции  $f_i(x)$  могут быть нелинейными. Линейная регрессия общего вида реализуется с помощью linfit, которая проводит аппроксимацию по методу наименьших квадратов [3].

В ходе проведения аппроксимации была получена функция вида  $2,222 \times 10^{-7} f^2 - 0,04 f + \frac{1,261 \times 10^8}{f}$ , описывающая поведение активного сопротивления кабельной линии при изменении частоты питающего напряжения.

Экспериментальная и аппроксимирующая зависимости активного сопротивления от частоты приведены на рис. 4.

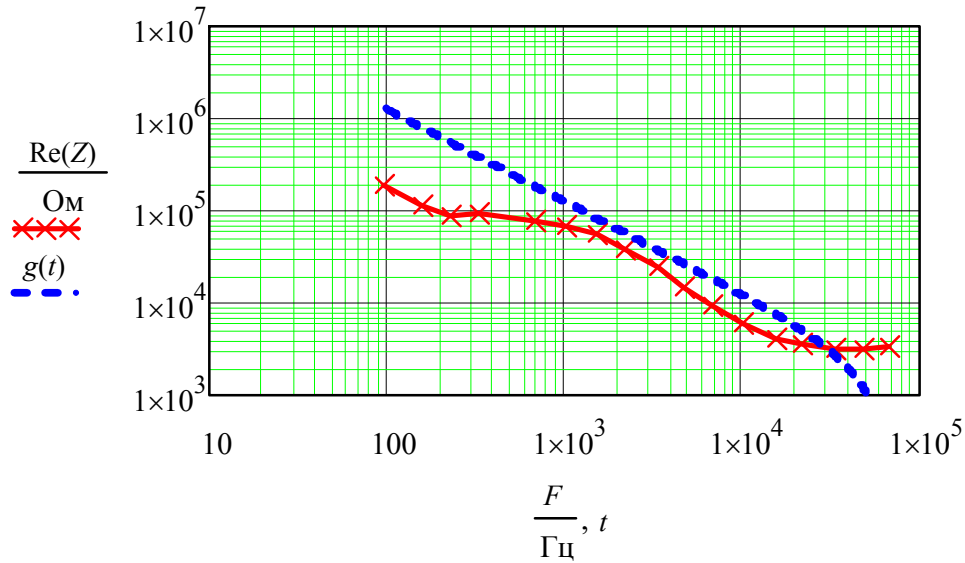


Рис. 4. Экспериментальная и аппроксимирующая зависимости активного сопротивления от частоты

Данная зависимость реализована в окне параметров блока «R», представленная на рис. 5.

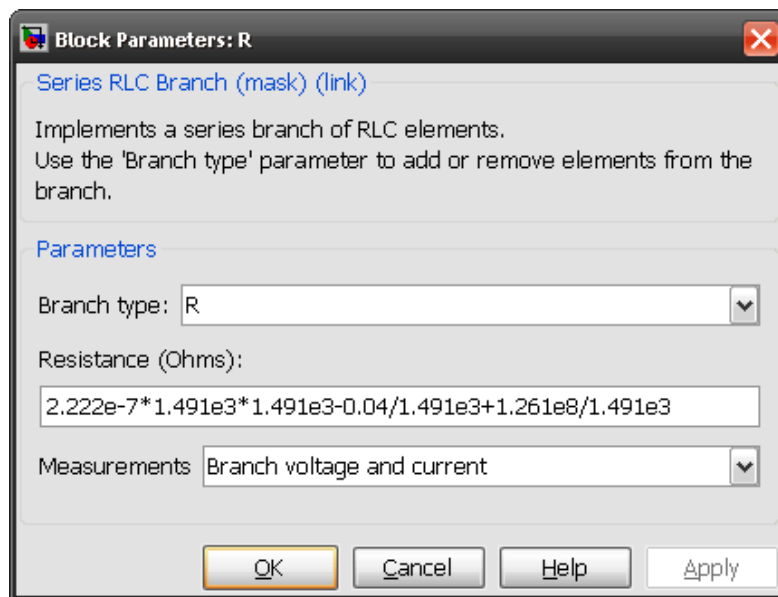


Рис. 5. Окно блока параметров «R»

После того, как все параметры введены в схему, программа запускается на выполнение, полученные результаты выводятся в двух вариантах: в численных значениях, которые переносятся в MathCAD для дальнейшего сопоставления с экспериментальными и графической форме, представленной в виде осциллограмм для наглядного представления величин.

Графическое сопоставление токов утечки приведено на рис. 6.

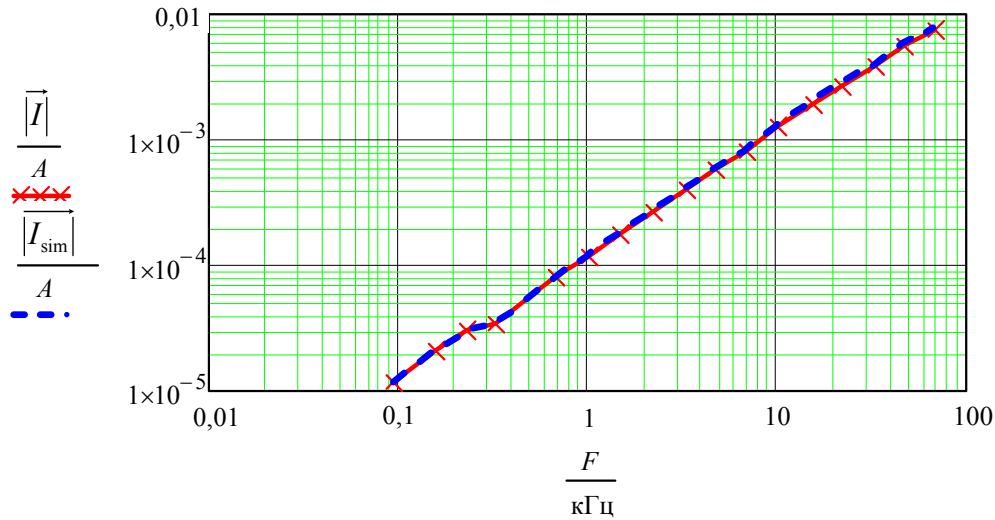


Рис. 6. Графическое сопоставление токов утечки:  
 $I$  – ток утечки, полученный по экспериментальным данным;  $I_{sim}$  – ток, построенный по данным, полученным на основании математической модели

Из анализа рис. 6 следует, что токи утечки через диэлектрический материал кабельной линии практически идентичны, погрешность не превышает 7 %.

По полученным токам утечки были рассчитаны и построены зависимости активного, полного и реактивного сопротивлений изоляции кабельной линии от частоты питающего напряжения, которые приведены на рис. 7–9.

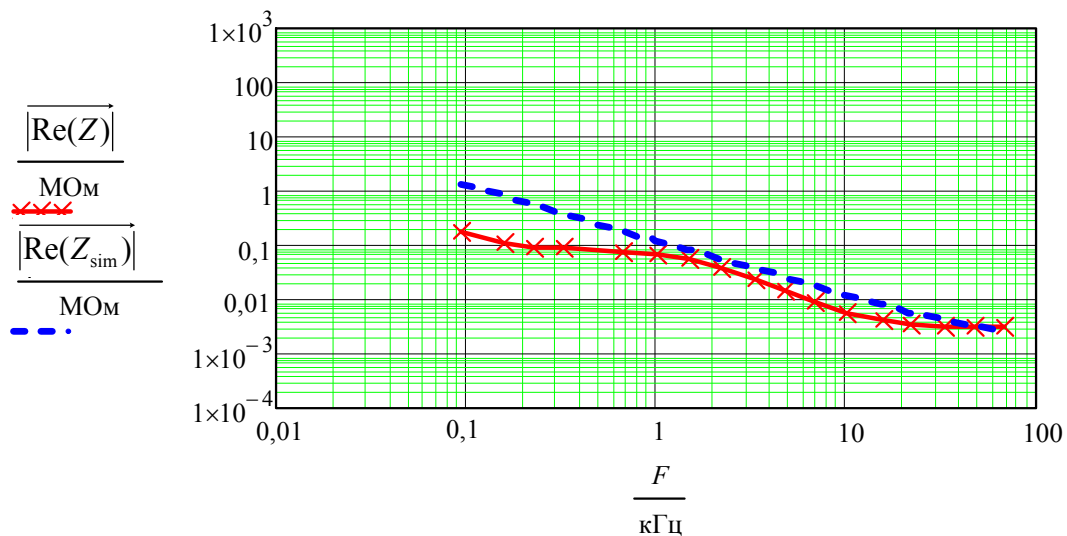


Рис. 7. Зависимость активного сопротивления изоляции от частоты питающего напряжения:  
 $Re(Z)$  – активное сопротивление изоляции кабельной линии, построенное по экспериментальным данным;  $Re(Z_{sim})$  – активное сопротивление изоляции кабельной линии, построенное по данным, полученным на основании математической модели

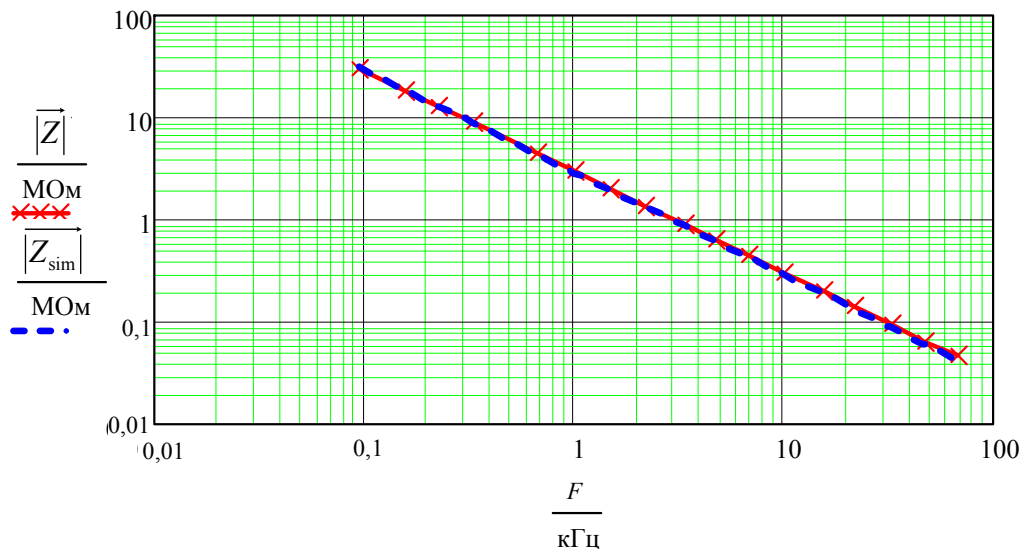


Рис. 8. Зависимость полного сопротивления изоляции от частоты входного напряжения

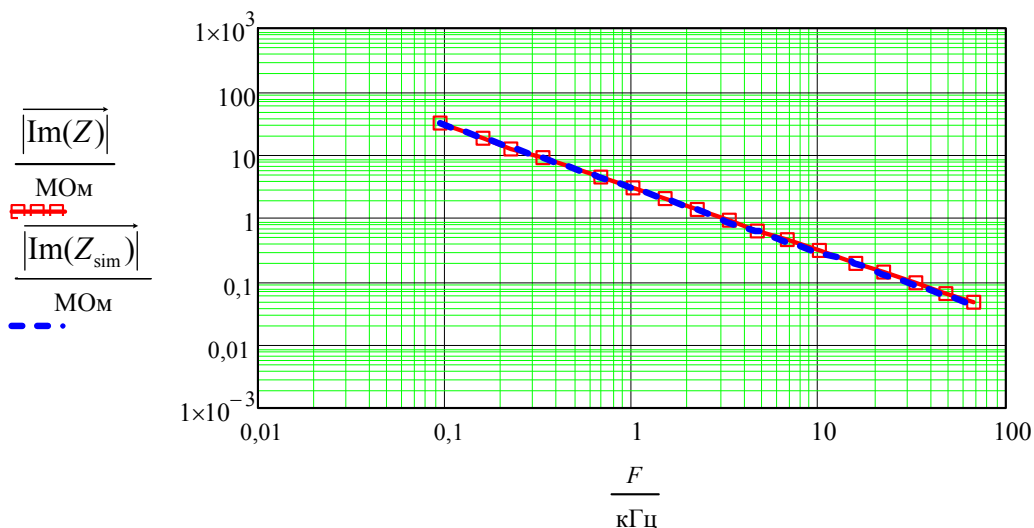


Рис. 9. Зависимость активного сопротивления изоляции от частоты питающего напряжения:

$Im(Z)$  – реактивное сопротивление изоляции кабельной линии, построенное по экспериментальным данным;  $Im(Z_{sim})$  – реактивное сопротивление изоляции кабельной линии, построенное по данным, полученным на основании математической модели

Из анализа рис. 7–9 следует, что полное и реактивное сопротивление, полученные в ходе проведения эксперимента и смоделированные при помощи программного комплекса Simulink имеют минимальное отклонение друг от друга, а вот активная составляющая получилась более усредненной, нежели экспериментальная. Это может быть связано с тем, что в модели использованы идеальный источник питания и все измерительные приборы, которые не оказывают дополнительного влияния на результат измерения. Поляризационные процессы и ионизация газовых включений в изоляции также могут оказать влияние на конечный результат.

График потерь активной мощности (на 1 м кабеля) по экспериментальным и смоделированным данным приведен на рис. 10.

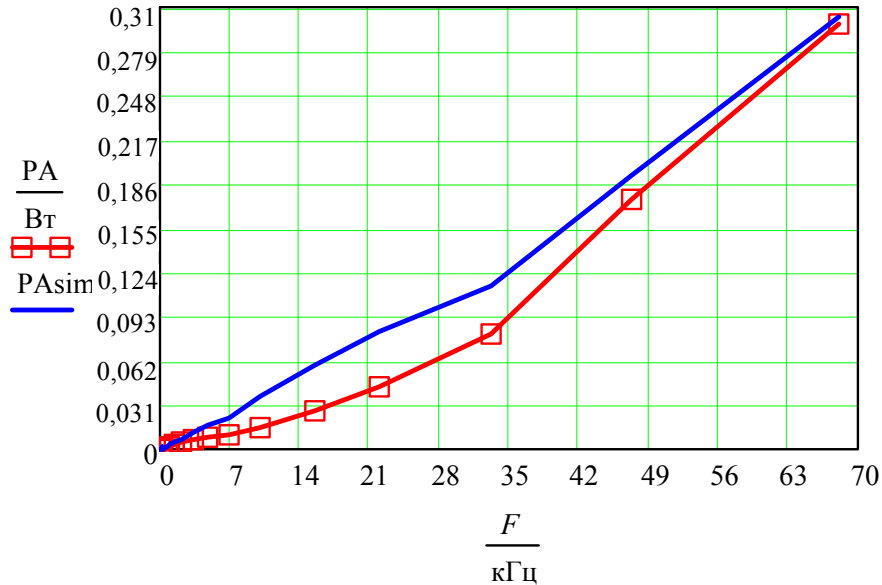


Рис. 10. График зависимости потерь активной мощности от частоты

Из анализа рис. 10 следует, что потери активной мощности, полученные по смоделированным данным больше, чем экспериментальные. Это обусловлено тем, что отличаются значения активного сопротивления изоляции вследствие его усреднения в ходе проведения аппроксимации. При помощи аппроксимирующей функции были получены значения активного сопротивления в зависимости от частоты питающего напряжения. Данная функция дает минимальную среднеквадратическую погрешность.

Зависимости потерь полной мощности от частоты входного напряжения (на 1 м кабеля) приведены на рис. 11.

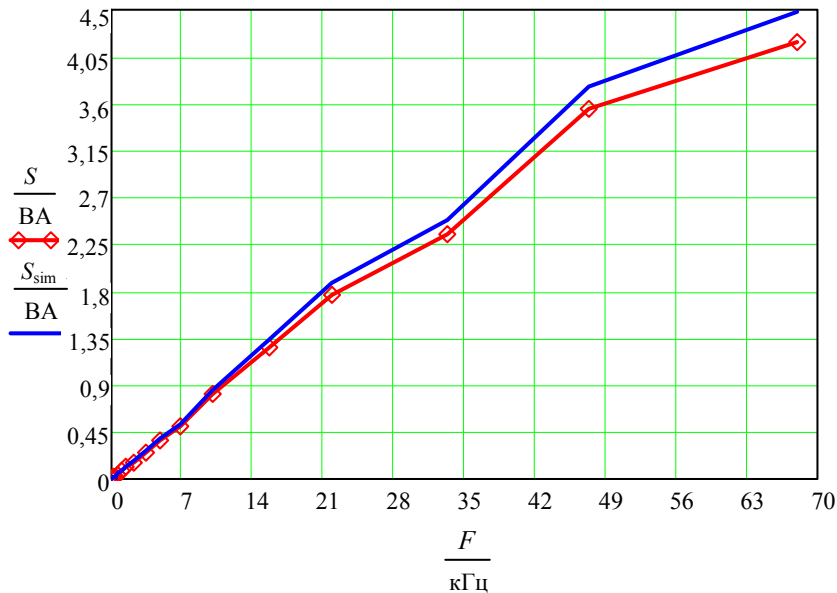


Рис. 11. Зависимости полных потерь мощности от частоты

Из анализа рис. 10 и 11 следует, что основная часть потерь через изоляцию кабельной линии происходит через емкостное сопротивление, так как потери активной мощности намного меньше полных.

### **Заключение**

Таким образом, смоделированные результаты получились практически сопоставимы с экспериментальными: погрешность не превышает 7 %. Следовательно, данную математическую модель можно использовать для расчета токов утечки, полного и емкостного сопротивлений изоляции кабеля марки N2XSY  $1 \times 120 \text{ мм}^2$  с изоляцией из сшитого полиэтилена. Для расчета других кабельных линий необходимо провести дополнительные эксперименты для получения данных о зависимости активного сопротивления изоляции от частоты с последующим получением функции, описывающей этот процесс.

### **Литература**

1. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий. – Л. : Энергия, 1977. – 352 с.
2. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.
3. Макаров, Е. Г. Самоучитель MathCad 14 / Е. Г. Макаров. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 295 с.

*Получено 16.10.2012 г.*