

## ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.311

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

**А.Д. Подольцев**, докт. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина  
e-mail: podol@ied.org.ua

*Описаны математическая модель и программа расчета высокочастотных процессов и перенапряжений в воздушной линии электропередачи напряжением 330 кВ при прямом воздействии грозового разряда в токонесущий провод или защитный трос, реализованная в среде Matlab/Simulink. Рассмотрены компьютерные модели для анализа высокочастотных процессов в несущей опоре и гирлянде изоляторов, а также различные подходы к моделированию разрядного тока грозового импульса. Приведены значения перенапряжений в линии при различных параметрах токового импульса, моделирующего грозовой разряд, а также при различных точках его приложения в линии. Библ. 17, рис. 10, таблица.*

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, высокочастотные процессы, грозовые перенапряжения.

Увеличение общей продолжительности воздушных линий (ВЛ) электропередачи и повышение уровня их номинального напряжения приводят к росту числа разрядов молний в линейные сооружения. Результатом таких разрядов молний могут быть автоматические отключения отдельных ВЛ, а также оборудования подстанций. Многолетняя статистика показывает, что на долю грозовых разрядов приходится в среднем 30 % всех автоматических отключений ВЛ напряжением 220...750 кВ.

Повышение грозоупорности высоковольтных воздушных линий возможно лишь при условии научно обоснованного выбора средств молниезащиты и наличии хорошо обученного обслуживающего персонала, в совершенстве владеющего современными профессиональными знаниями. Для решения этих задач, включая создание тренажеров для обучения персонала, в настоящее время успешно используются методы компьютерного моделирования переходных высокочастотных процессов в ВЛ. Предпосылками для этого являются следующие обстоятельства.

- Интенсивное развитие в последнее десятилетие компьютерной техники и создание специализированных коммерческих пакетов программ (пакеты программ EMTP [14] и Matlab/Simulink/SimPowerSystems [15]) позволяют на новом уровне и с более высокой степенью детализации выполнять расчеты быстропротекающих и переходных процессов в линиях и получать количественные оценки возникающих при этом перенапряжений различного типа – грозовые, коммутационные, феррорезонансные и др.

- Разработаны сложные электротехнические модели основных элементов высоковольтных линий – непосредственно многопроводная воздушная линия, кабельная линия, опоры, гирлянды изоляторов, ограничители перенапряжений и др., которые позволяют моделировать с высокой точностью быстропротекающие электромагнитные процессы в линиях электропередачи.

- На основе таких коммерческих пакетов программ могут быть разработаны специализированные программно-аппаратные комплексы и тренажеры, позволяющие оперативно анализировать различные внештатные ситуации, возникающие в системе электроснабжения, а также совершенствовать профессиональные знания обслуживающего персонала линий в ходе проведения занятий, например, в аудитории, оснащенной соответствующей компьютерной техникой.

Целью настоящей работы является разработка в среде Matlab/Simulink/SimPowerSystems специализированной программы для анализа грозовых перенапряжений в высоковольтных линиях электропередачи и исследование с ее помощью влияния различных факторов (виды ударов молнии, параметры разрядного тока молнии, значение величины сопротивления заземления опоры ВЛ и др.) на величину импульсных перенапряжений, возникающих между проводами и на гирлянде изоляторов высоковольтной линии на 330 кВ.

**1. Расчетная модель для анализа грозовых перенапряжений.** Грозовые перенапряжения на линиях электропередачи возникают как при непосредственном поражении линии грозовыми разрядами (перенапряжения прямого удара молнии), так и при разрядах молнии в землю в окрестности линии (индуцированные перенапряжения). Перенапряжения прямого удара молнии представляют наибольшую опасность, и грозозащита линий должна ориентироваться именно на этот вид перенапряжений. Далее, при анализе грозовых перенапряжений в ВЛ основными расчетными случаями будем рассматривать прямые удары молнии в фазные провода, в опору линии и в грозозащитный трос.

Для исследования грозовых перенапряжений был выбран фрагмент высоковольтной линии на 330 кВ длиной 1,2 км, содержащий четыре межопорных промежутка длиной 300 м каждый. Каждый из промежутков, в свою очередь, состоит из двух элементарных участков линии длиной 150 м, введение которых позволяет моделировать разряд тока молнии в середину фазного провода и защитного троса. Расчетная модель фрагмента линии, выполненная средствами пакета программ Matlab/Simulink/SimPowerSystems, показана на рис. 1, где обозначено: 1 – элементарный участок линии длиной 150 м; 2 – опора; 3 – сопротивление заземления опоры; 4 – импульсный генератор разрядного тока молнии; 5 – сопротивление нагрузки; 6 – средства измерения напряжения.

Основными элементами этой модели являются следующие: 1. Элементарный участок линии длиной 150 м, схема замещения которого представляет пятипроводную линию, состоящую из трех фазных проводов и двух грозозащитных тросов. Между всеми пятью проводниками этого участка линии, а также землей существуют взаимные индуктивные и емкостные связи, для определения значений которых в работе использовалась специализированная программа, входящая в состав пакета Simulink/ SimPowerSystems.

2. Опора ВЛ, эквивалентная высокочастотная схема замещения которой согласно [3] содержит набор индуктивностей, вычисленных для каждого участка опоры по значению погонной индуктивности. Модель опоры включает также гирлянду изоляторов, представленную в виде эквивалентной емкости, значение которой вычислялось из решения дополнительной цепной задачи.

3. Заземление опоры моделируется в виде активного сопротивления, значение которого может варьироваться в широких пределах.

4. Импульсный генератор тока, моделирующий разряд молнии.

5. Сопротивление нагрузки, подключенное на концах участка линии и равное волновому сопротивлению линии.

6. Виртуальные осциллографы как средство измерения напряжений и токов в элементах линии.

Далее рассмотрим более подробно схемы замещения и параметры этих элементов расчетной модели.

**Электрическая модель воздушной линии электропередачи.** Каждый участок моделировался в виде эквивалентного десятиполюсника, включающего три фазных провода и два грозозащитных троса и имеющего отсюда пять входов и пять выходов. Математическое описание модели многопроводной линии с распределенными параметрами изложено в [9]. Для расчета эквивалентных электрических параметров исследуемой линии в работе использовался блок **Powergui** (инструмент **Compute RLC Line Parameters**), входящий в пакет программ SimPower Systems. При задании геометрических размеров линии использовались размеры для промежуточной опоры ПБ330-7н.

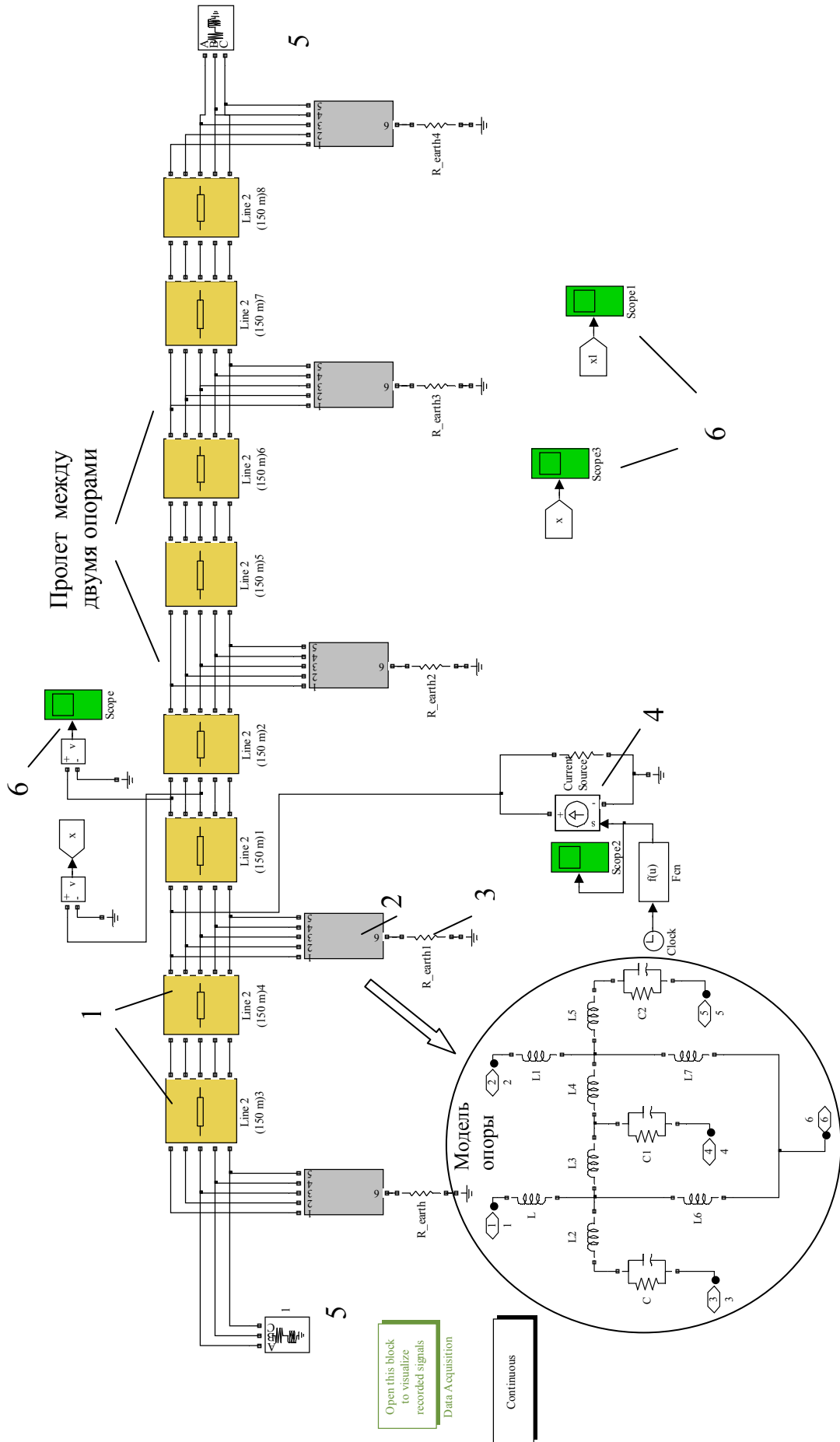


Рис. 1

**Электрическая модель опоры и гирлянды изоляторов.** Электрическая высокочастотная схема замещения опоры выбиралась в виде набора индуктивностей и показана на вставке рис. 1. Для расчета значений индуктивности использовалось известное значение погонной индуктивности для такого типа опор, равное  $L'_{оп} = 0,3$  мкГн/м [3, рис. 8.7].

Гирлянда изоляторов в схеме замещения опоры представлялась в виде эквивалентной емкости и параллельно включенного резистора, моделирующего токи утечки. Для расчета величины емкости использовалась электрическая схема замещения гирлянды из 19 изоляторов [4]. По результатам дополнительных расчетов получено значение  $C_{эке} = 17$  пФ, которое и использовалось в модели опоры для моделирования гирлянды изоляторов.

**Электрическая модель разрядного тока молнии.** Начиная с 70-х годов прошлого века было произведено достаточно много регистраций волн разрядного тока молнии, особенно при ударах молнии в вершины башен, результаты которых приведены, в частности, в [5, 6, 8, 10, 12]. При анализе грозоупорности электрических сетей исследователи обычно располагают максимальным значением волны тока молнии  $I_M$ , длительностью фронта  $\tau_\phi$  или крутизной  $I'_M$  волны тока молнии, а также временем до полуспада волны – ее длительностью  $\tau_6$ . В ряде случаев в дополнение к перечисленным параметрам описание волны тока молнии также включает  $\tau_{\phi 01}$  – участок фронта волны, отвечающий увеличению амплитуды волны от уровня 0,1 до 0,9 $I_M$ , а также  $\tau_{\phi 03}$  – то же, но соответствующее увеличению волны тока от уровня 0,3 до 0,9 $I_M$ .

На основе регистрации формы волны тока молнии в реальных условиях исследователями предложены различные их аппроксимации [11, 13, 17]. До последнего времени наиболее распространенной является биэкспоненциальная аппроксимация Брюса–Голда [14]:

$$i_0(t) = \frac{I_M}{\eta} \left[ \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \exp\left(\frac{t}{\tau_2}\right) \right], \quad (1)$$

где  $I_M$  – максимальное значение волны тока молнии;  $\eta$  – корректирующий коэффициент амплитуды волны:

$$\eta = \exp\left(-\frac{\tau_\phi}{\tau_1}\right); \quad (2)$$

$\tau_1$  и  $\tau_2$  – постоянные времени, определяемые временем нарастания и спада волны тока молнии и рассчитываемые на основании следующих выражений:

$$\tau_1 = \frac{\tau_\phi - \tau_6}{\ln(0,5)}; \quad \tau_2 = \frac{\tau_\phi}{5}. \quad (3)$$

Так, для импульса тока 1,2/50 мкс согласно выражениям (2) и (3) получим:

$$\tau_1 = 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad \tau_2 = 0,24 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Результаты расчета коэффициентов по (2), (3) для биэкспоненциальной аппроксимации формы импульса тока различной длительности приведены в таблице.

В Simulink-модели, показанной на рис. 1, генератор тока, моделирующий импульсный ток разряда молнии, представлен в виде управляемого источника тока. При этом форма тока задана биэкспоненциальной функцией (1). Внутреннее сопротивление канала молнии принято равным 300 Ом [1]. Разряд молнии считается отрицательным, что реализуется на практике в большинстве случаев [2].

Параметры импульса тока	$\tau_1$ , мкс	$\tau_2$ , мкс	$\eta$
1,2/50 мкс	70,4	0,24	0,983
8/40 мкс	46,2	1,6	0,841
10/350 мкс	490,5	2	0,98

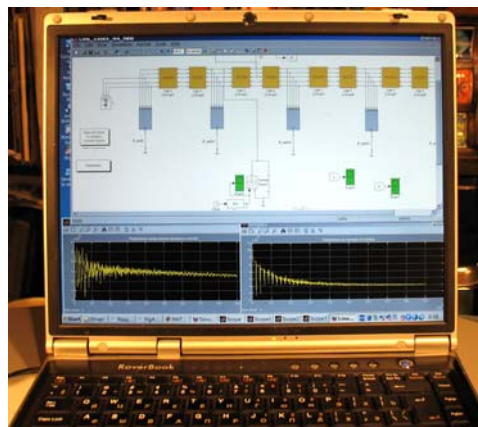


Рис. 2

Описанные математические модели и их программная реализация составили основу разработанного программного комплекса, выполненного на базе ноутбука и предназначенного для анализа грозовых перенапряжений в высоковольтных линиях электропередачи (см. рис. 2). Комплекс включает такие элементы, как Simulink-модель воздушной линии, блок для расчета эквивалентных параметров воздушной линии на 330 кВ, Simulink-модель опоры ВЛ, блок задания формы разрядного тока молнии, блоки измерения импульсных напряжений в элементах линии. Он является открытой системой, которая после внесения необходимых изменений может использоваться для моделирования переходных процессов и различных видов перенапряжений в воздушных линиях электропередачи напряжением 500, 750 кВ и др.

**2. Результаты расчета грозовых перенапряжений. Разряд молнии в вершину опоры ВЛ.** В случае такого вида разряда ток молнии в месте удара разветвляется – большая часть тока стекает в землю через заземлитель пораженной опоры, а меньшая часть проходит по тросам, направляясь к заземлителям соседних опор. При этом характер переходного процесса зависит от ряда факторов – максимальное значение и крутизна тока молнии, величина сопротивления заземления опоры, высота опоры и ее эквивалентные электрические параметры (индуктивность и активное сопротивление), длина пролета и др. Рассмотрим далее, основываясь на результатах компьютерного моделирования, количественные характеристики, отражающие влияние этих факторов.

На рис. 3 показано импульсное напряжение на гирлянде изоляторов при разряде молнии в вершину опоры. В расчете использовались следующие параметры молнии: амплитуда – 100 кА, длительность импульса – 1,2/50 мкс. Сопротивление заземления опор ВЛ принималось равным 10 Ом. Из данных на рис. 3 вытекает следующее.

- 1) В течение малого промежутка времени порядка 0,2 мкс напряжение на гир-

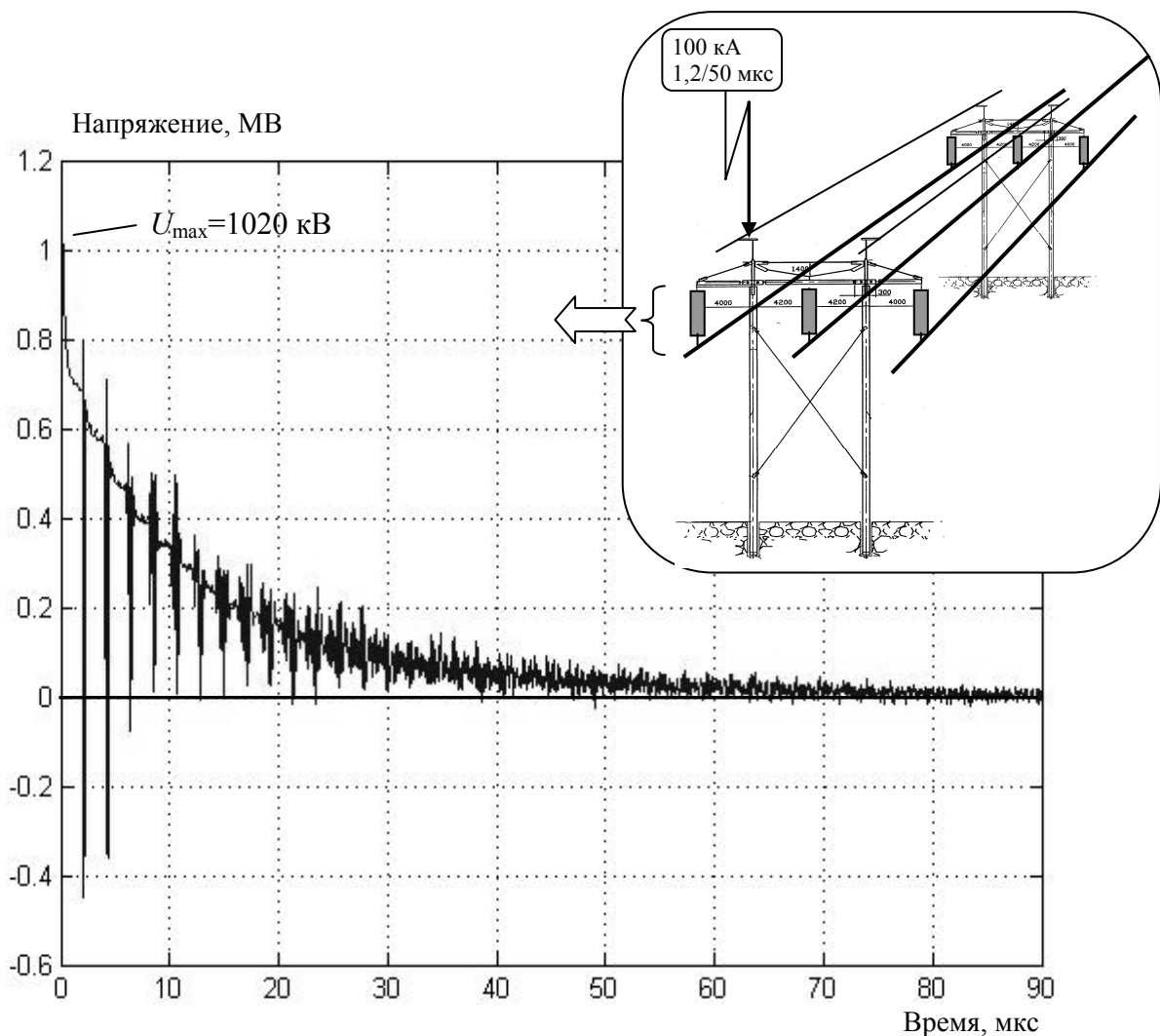


Рис. 3

лянде изоляторов достигает максимума, равного 1020 кВ. Отметим, что импульсное 50 %-ное разрядное напряжение для гирлянды на 330 кВ составляет  $U_{50\%} = 1560$  кВ (по данным [1]). Отсюда простым пересчетом можно определить, что при амплитуде тока молнии ~150 кА произойдет перекрытие гирлянды изоляторов (с вероятностью 50 %).

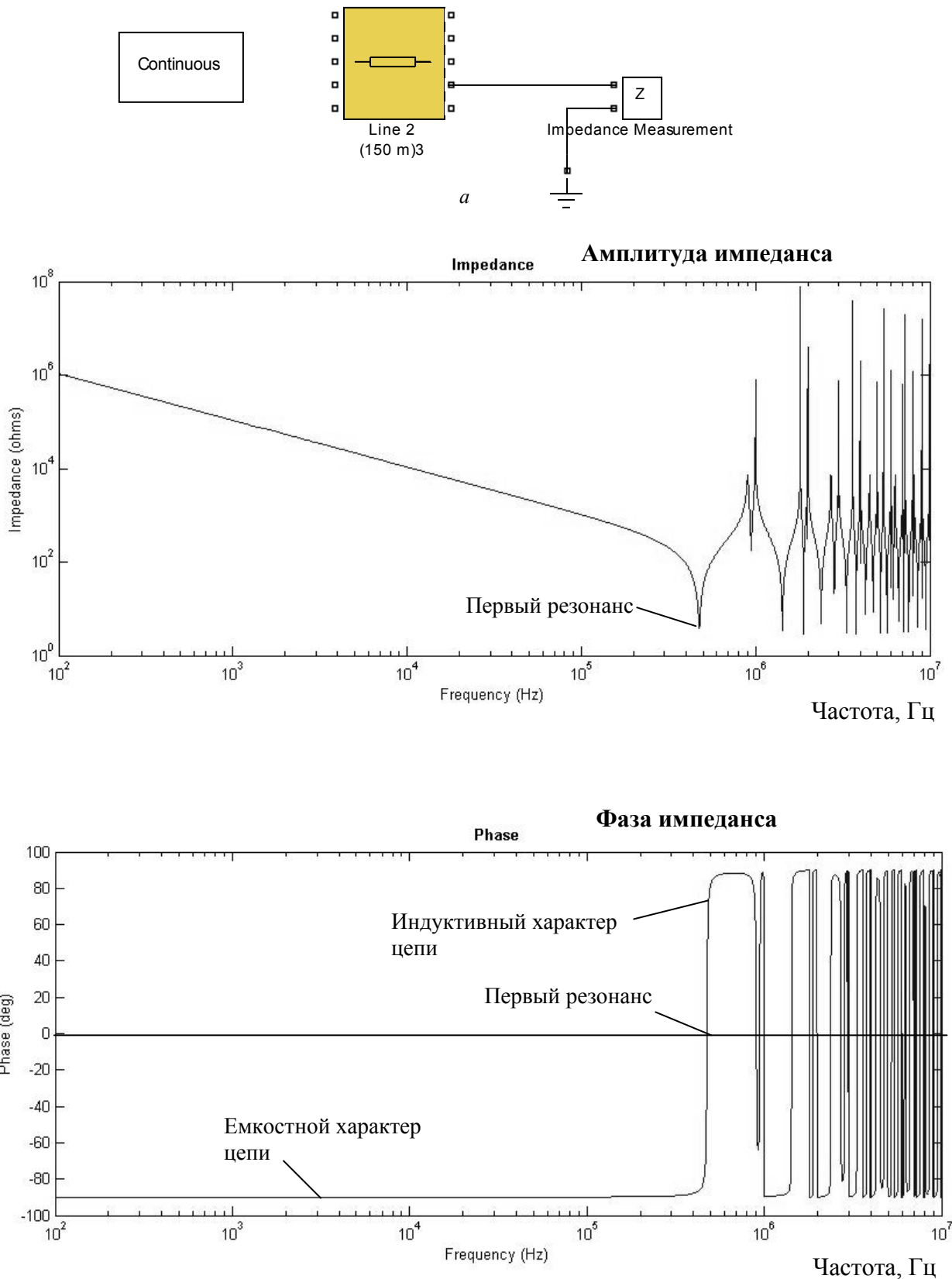


Рис. 4

2) Кривая напряжения на гирлянде имеет резко осциллирующий характер. Это связано с тем, что участок линии вместе с опорой и линейной изоляцией характеризуются в электрическом плане совокупностью индуктивностей и емкостей, между которыми возникает колебательный процесс с периодическим обменом энергией.

Известно, что если частота внешнего воздействия (импульса тока) совпадает с одной из собственных резонансных частот системы, то в системе с высокой добротностью могут возникать значительные колебания напряжений и токов. Для изучения резонансных свойств участка исследуемой линии длиной 150 м рассматривалась вспомогательная задача – определение импеданса одного из фазных проводов линии по отношению к земле при различной частоте внешнего воздействия. Simulink-модель для исследования резонансных свойств элементарного участка линии показана на рис. 4 а, а расчетная зависимость импеданса участка этой линии от частоты – на рис. 4 б. Из приведенных результатов следует, что точка первого резонанса линии реализуется при частоте 0,5 МГц, а в области частот порядка  $10^6$  Гц (что и соответствует длительности переднего фронта разрядного тока молнии 1,2 мкс) в элементах линии находятся точки второго, третьего и т.д. резонансов. Из-за близости параметров тока молнии к точкам собственного резонанса линии и происходит высокочастотная осцилляция напряжения на гирлянде – см. рис. 3. Далее будет показано, что при более длинных фронтах импульса тока молнии осцилляции будут значительно меньше (см. рис. 8).

На рис. 5 и 6 показано импульсное напряжение, возникающее соответственно на фазном проводе (в середине пролета) и на грозозащитном тросе (также в середине пролета) по отношению к земле. Параметры тока молнии 100 кА, 1,2/50 мкс. Сопротивление заземления 10 Ом. Видно, что кривые напряжения имеют резко осциллирующий характер. При этом амплитуда напряжения на тросе достигает около 1600 кВ.

**Влияние величины сопротивления заземления.** Для исследования влияния сопротивления заземления опоры  $R_z$  на максимальное значение импульсного напряжения на гирлянде изоляторов в работе выполнялись расчеты при различном значении этого сопротивления. Результаты расчетов для трех значений  $R_z=10$  Ом, 30 Ом и 100 Ом показаны на рис. 7. Здесь параметры тока молнии принимались равными 100 кА, 1,2/50 мкс. Из этого рисунка следует, что с ростом величины сопротивления заземления растет импульсное напряжение на гирлянде изоляторов, причем при увеличении величины сопротивления в 10 раз (с 10 до 100 Ом) амплитуда напряжения возрастает приблизительно в четыре раза (с 1000 до 4000 кВ). Учитывая, что для изоляторов такого класса напряжения значение  $U_{50\%} = 1560$  кВ [1], можно заключить, что при выбранных параметрах тока молнии 100 кА, 1,2/50 мкс, перекрытие изоляции произойдет при  $R_z \approx 25$  Ом. Также из результатов рис. 7 следует, что с ростом сопротивления заземления уменьшаются осцилляции напряжения на гирлянде, что является общим свойством резонансных электрических цепей при увеличении диссипативных процессов.

**Влияние формы разрядного тока молнии.** Результаты расчетов импульсного напряжения на гирлянде изоляторов при различных значениях амплитуды и длительности разрядного тока молнии показаны на рис. 8. Здесь рассматривался случай биэкспоненциальной кривой изменения разрядного тока со следующими значениями временных параметров: а) 1,2/50 мкс; б) 8/40 мкс; в) 10/350 мкс. Амплитуда тока для всех случаев принималась равной 100 кА. Сопротивление заземления 10 Ом. Из результатов рис. 8 следует, что чем более крутой фронт разрядного тока, тем выше импульсное напряжение на гирлянде изоляторов. Также из сравнения рис. 10 а и в следует, что более длинный импульс тока приводит к меньшим осцилляциям в кривой напряжения.

**Прямой удар молнии в фазный провод в середине пролета.** Известно [4], что при прямом попадании молнии в фазный провод минуя грозозащитный трос, перекрытие изоляции линии определяется в основном максимальным значением тока молнии и зависит от величины волнового сопротивления линии. Для подтверждения этого обстоятельства выполнялся расчет импульсного напряжения на гирлянде изоляторов при амплитуде тока молнии 10 кА и различных значениях длительности тока молнии. Результаты расчетов показаны на

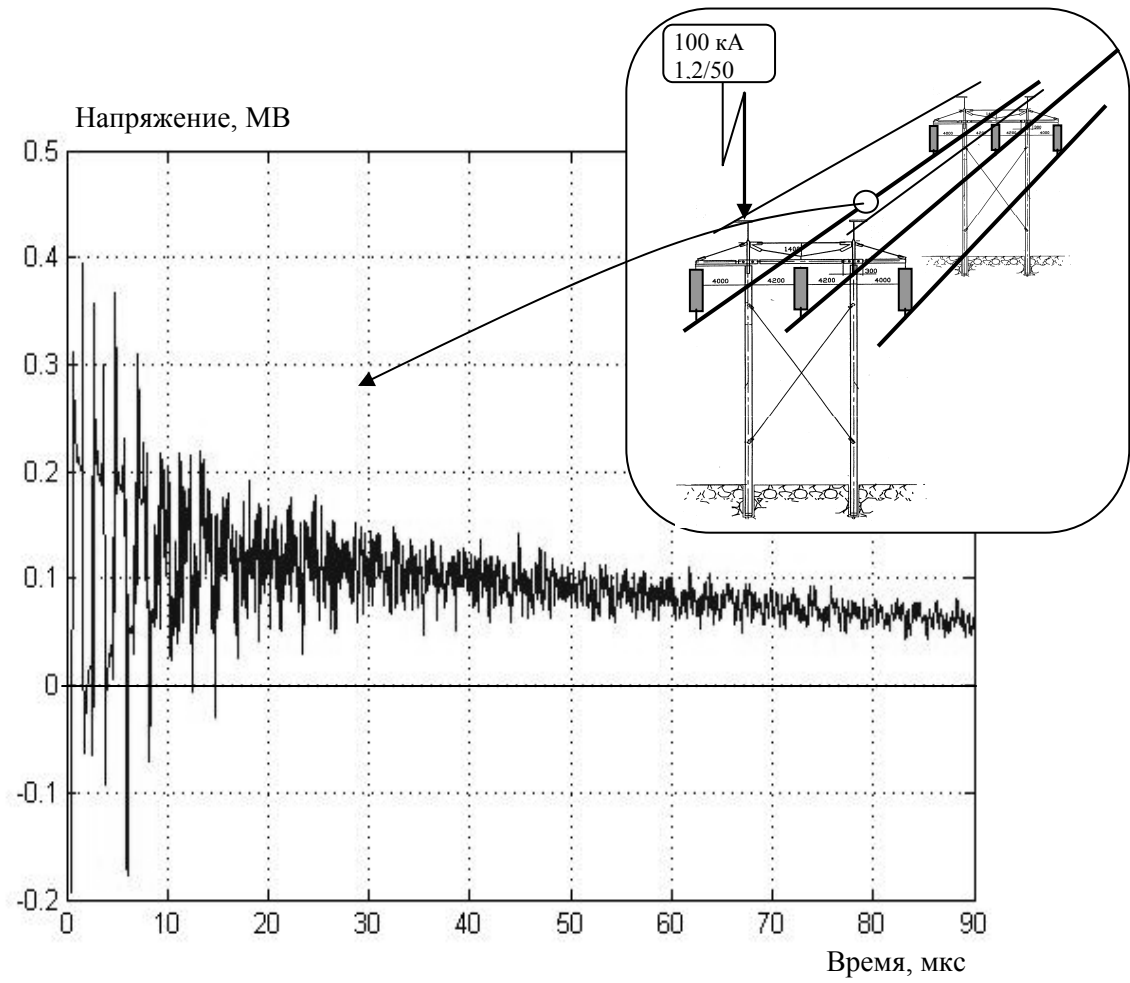


Рис. 5

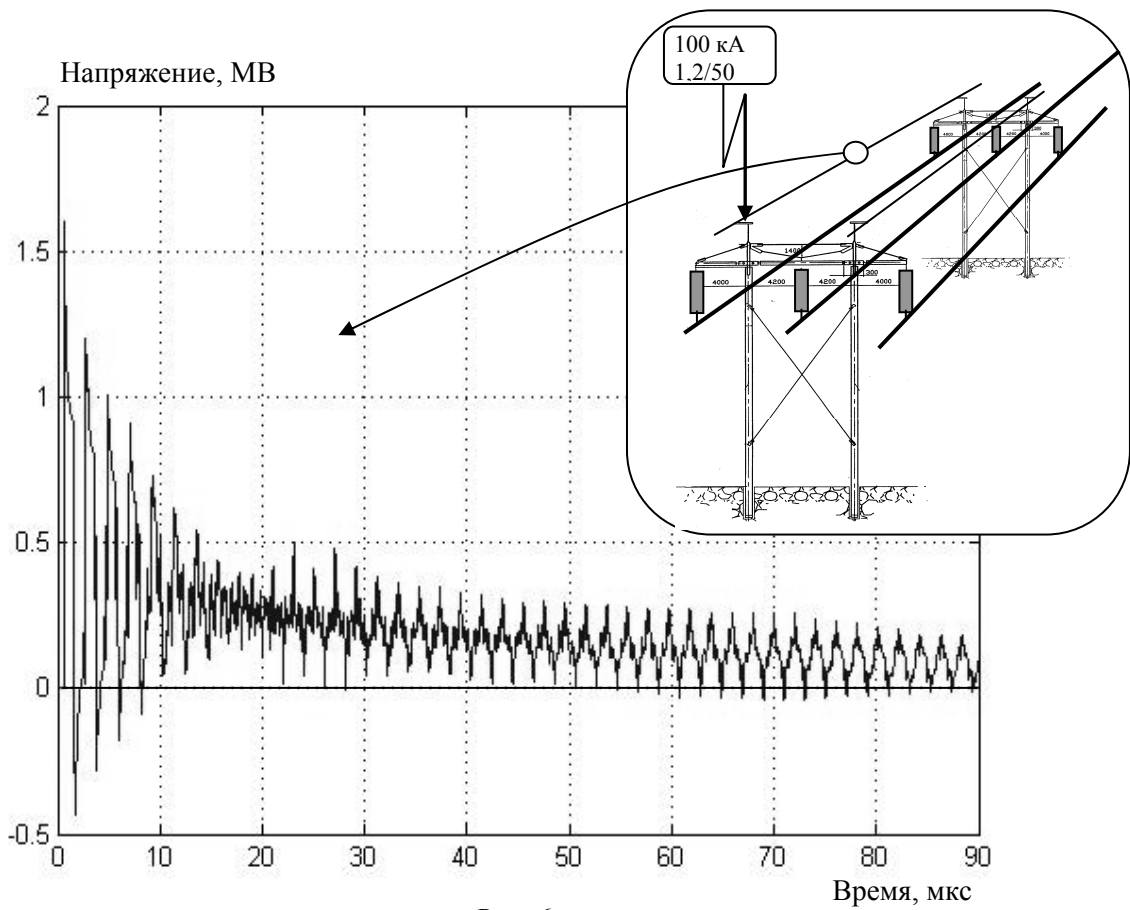


Рис. 6



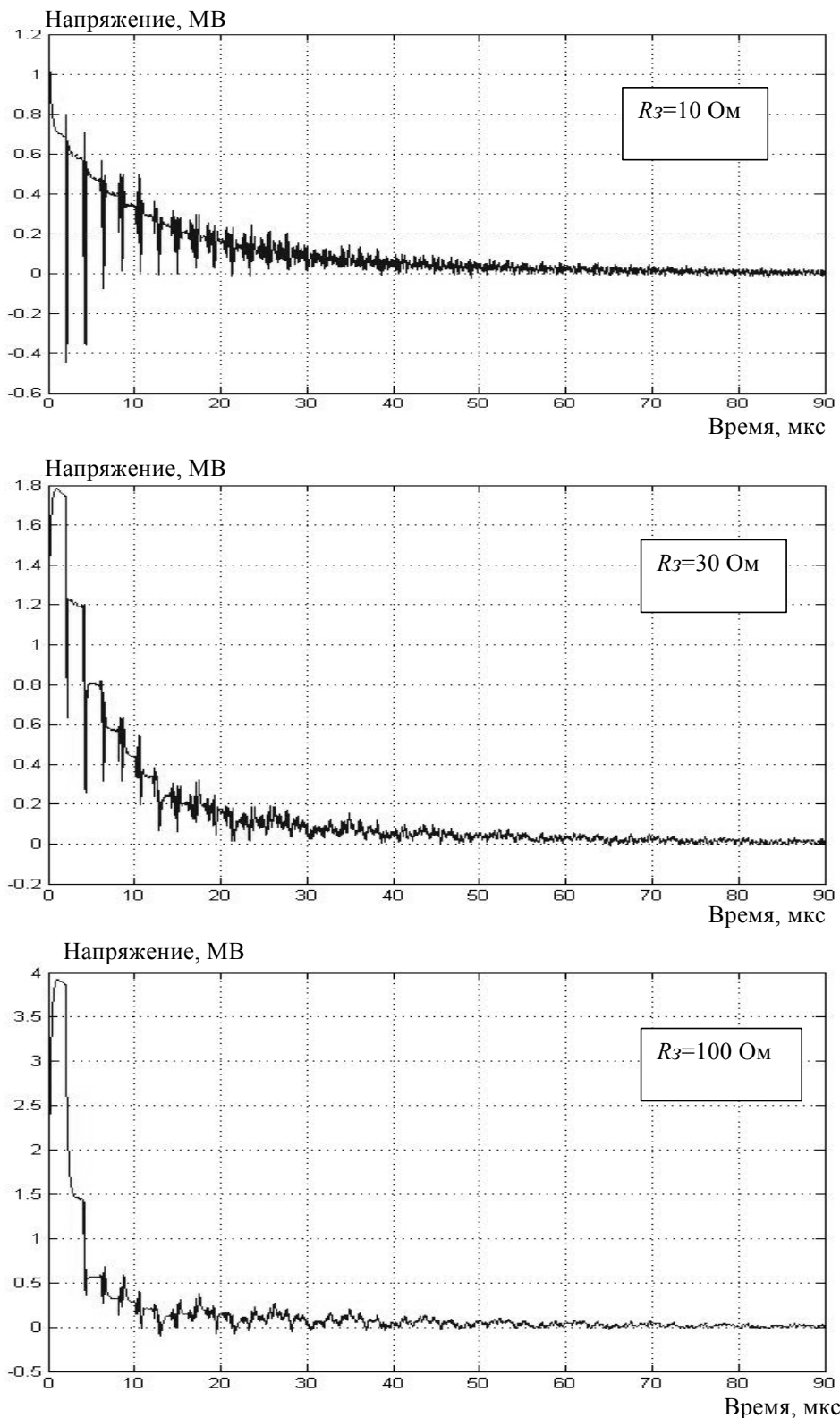


Рис. 7

рис. 9. Данные этого рисунка показывают, что амплитуда импульсного напряжения практически не зависит от формы импульса тока молнии и составляет около 3000 кВ. Отсюда следует, что при токе молнии амплитудой 5 кА, напряжение на гирлянде достигнет значения  $U_{50\%} = 1560 \text{ кВ}$ , что с вероятностью 50 % приведет к перекрытию изоляторов.

**Разряд молнии в грозозащитный трос в середине пролета.** Результаты расчетов для этого случая представлены на рис. 10 при различных параметрах токового импульса. Видно, что импульс тока молнии с более крутым фронтом вызывает большую амплитуду напряжения на гирлянде изоляторов – амплитудное значение на верхнем графике рис. 10 максимально. Также короткий импульс тока молнии вызывает резко осциллирующее напряжение на гирлянде изоляторов, затухающее за время порядка 100 мкс.

В заключение отметим, что разработанный программный комплекс является "открытой системой", которая может быть после соответствующих изменений использована для расчета различного вида перенапряжений в ВЛ, а именно: а) расчет грозовых перенапряжений в высоковольтных линиях напряжением 500, 750 кВ и выше; б) расчет грозовых перенапряжений на подстанциях и рациональный выбор средств защиты – ОПН, разрядников, их параметров и место расположения; в) расчет грозовых перенапряжений в подземных кабельных линиях.

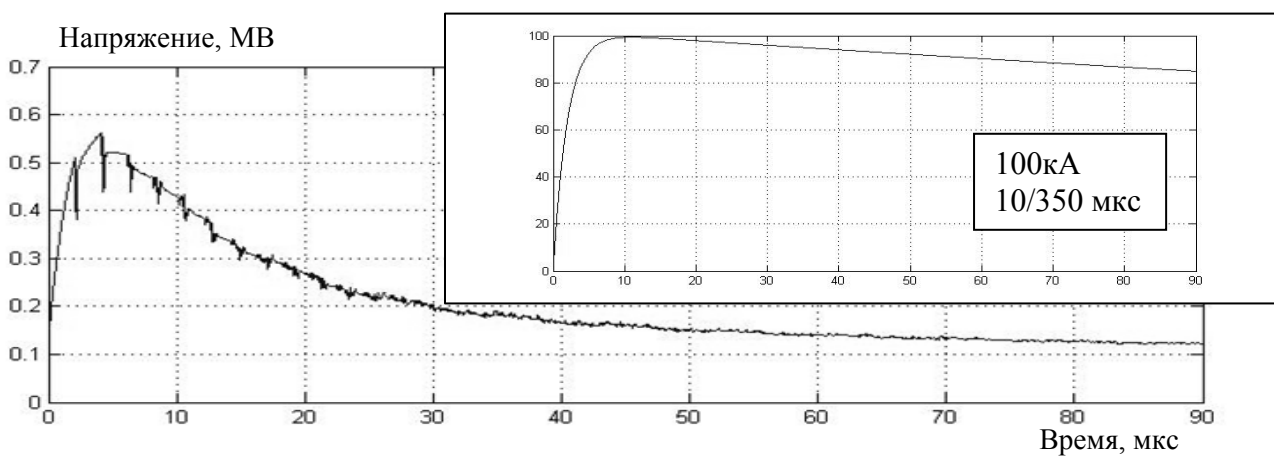
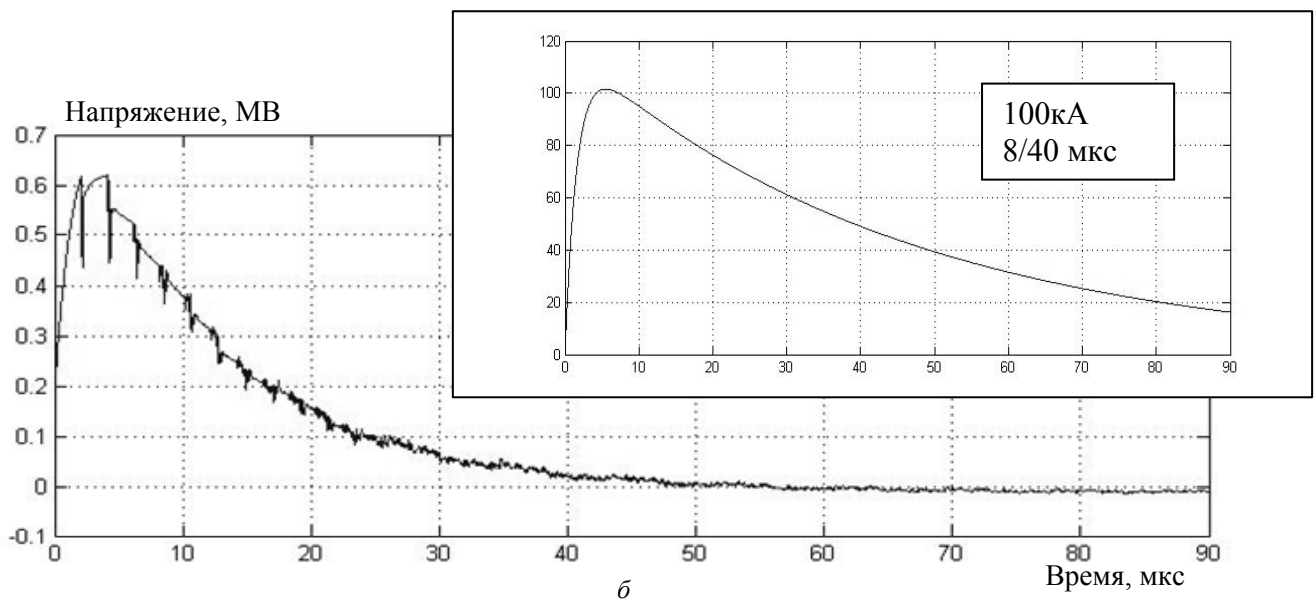
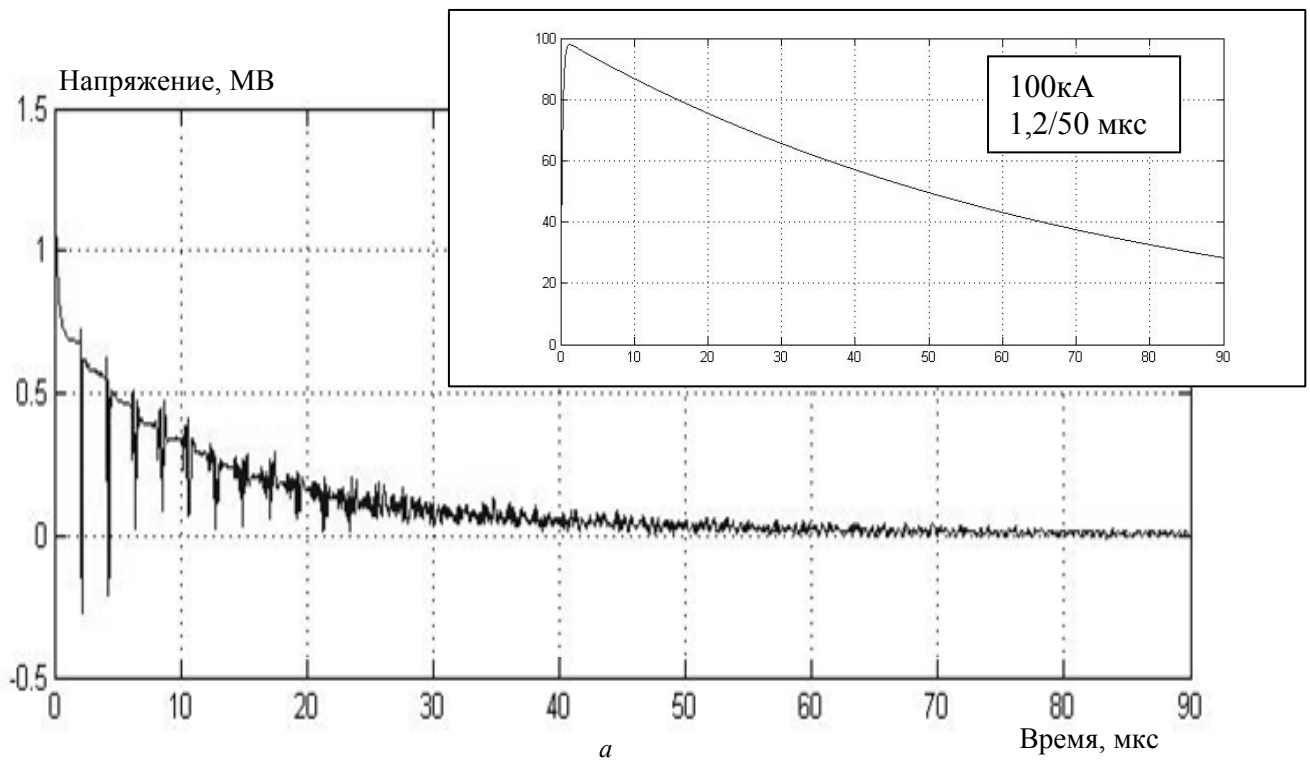


Рис. 8

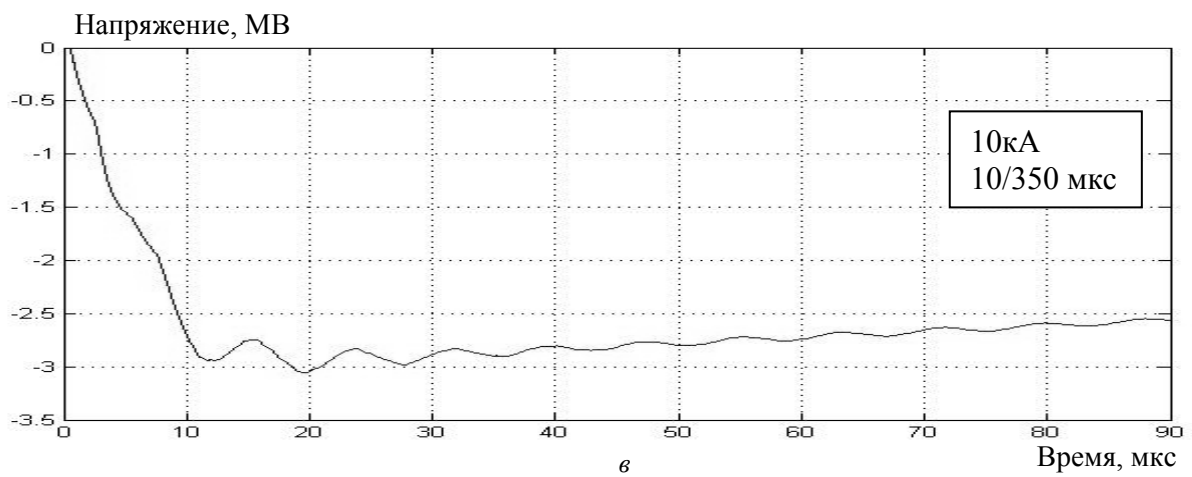
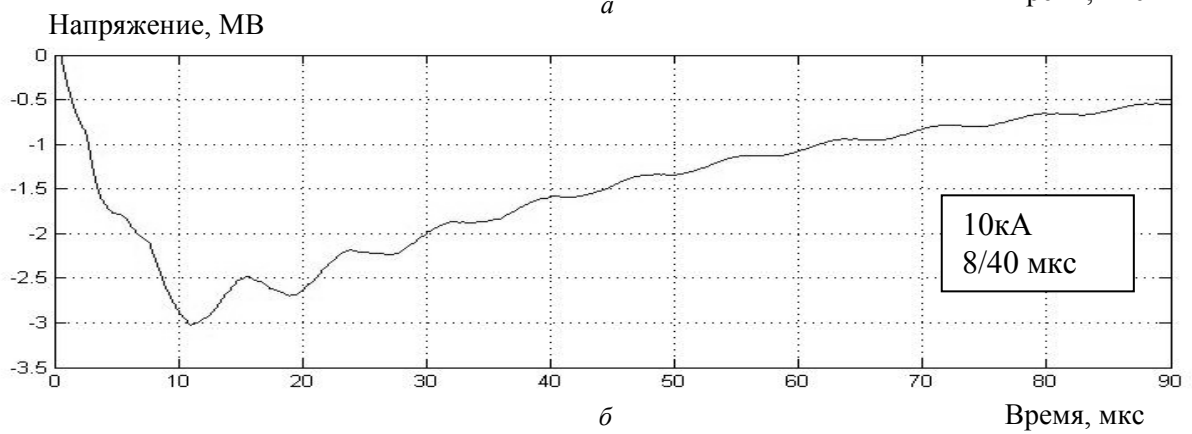
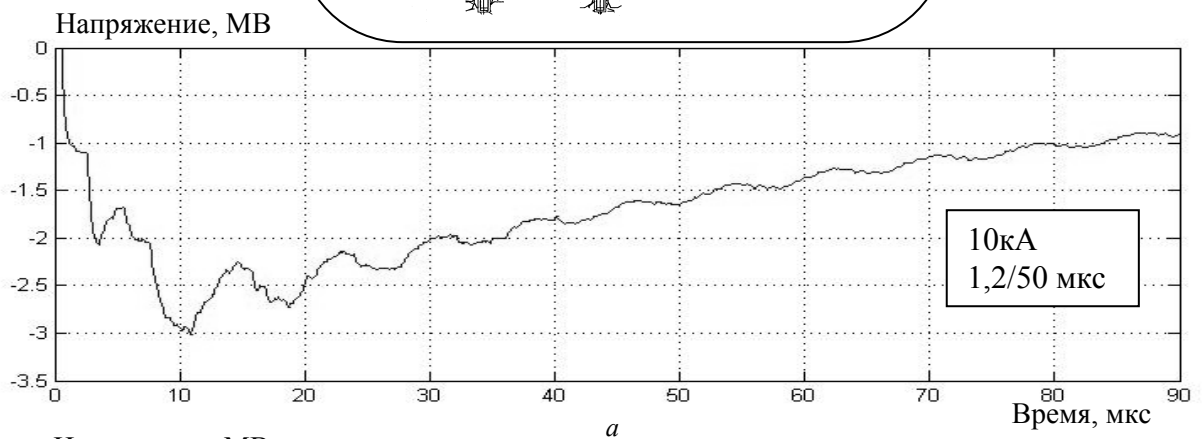
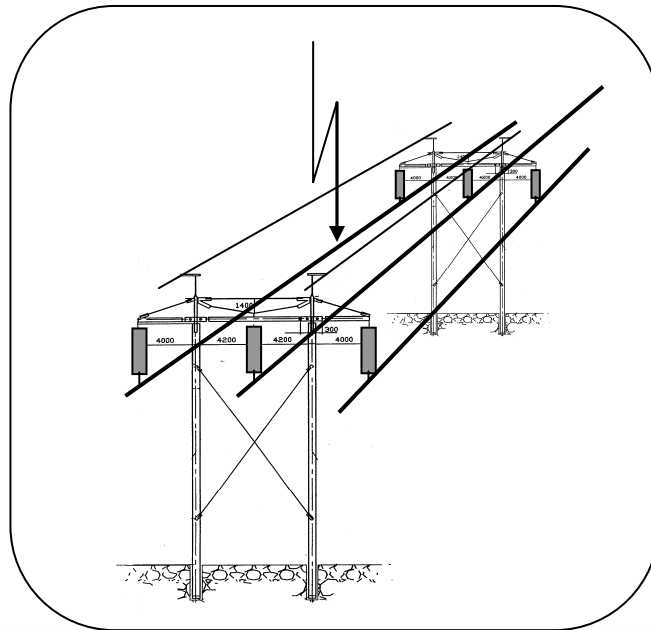


Рис. 9

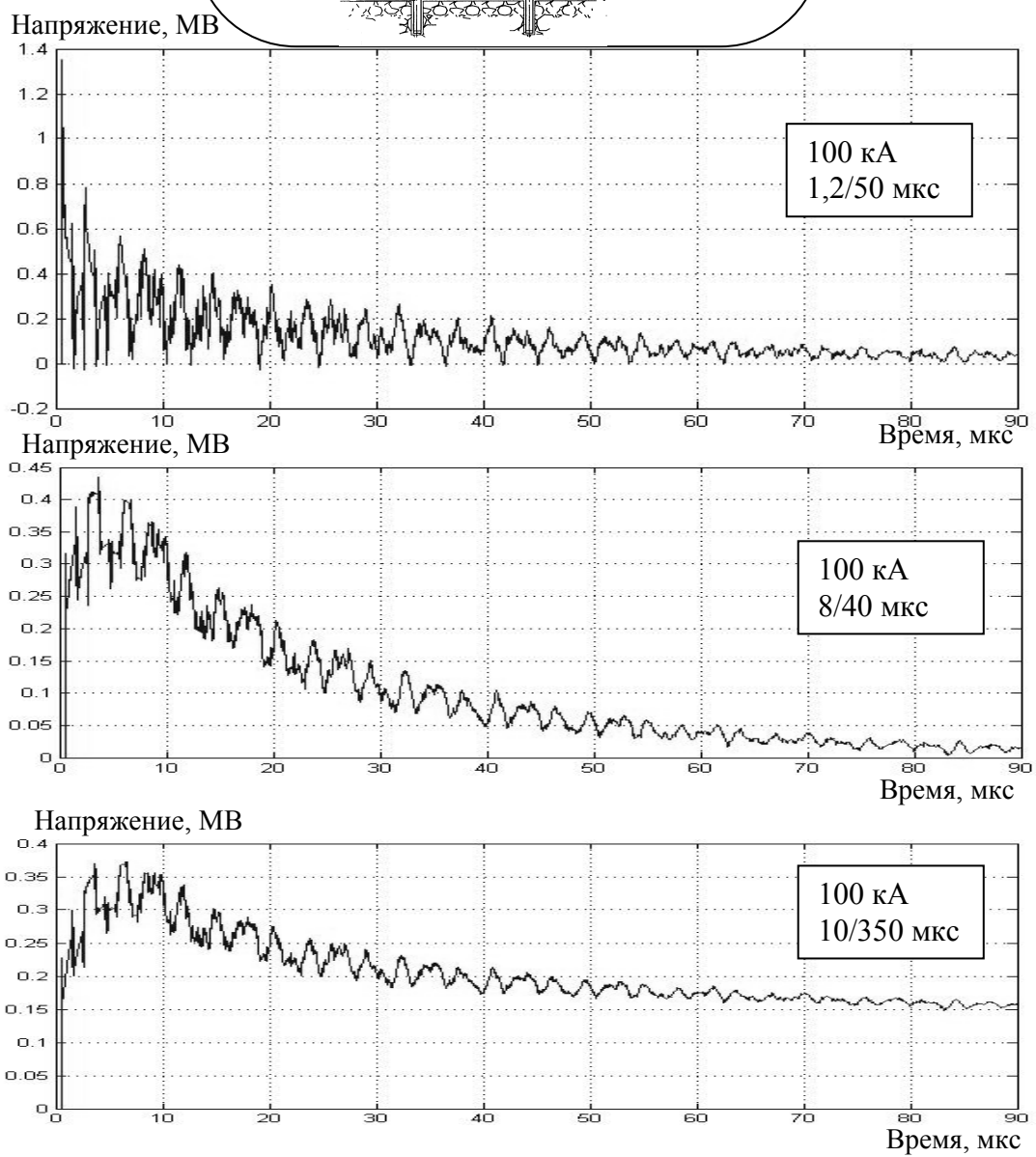
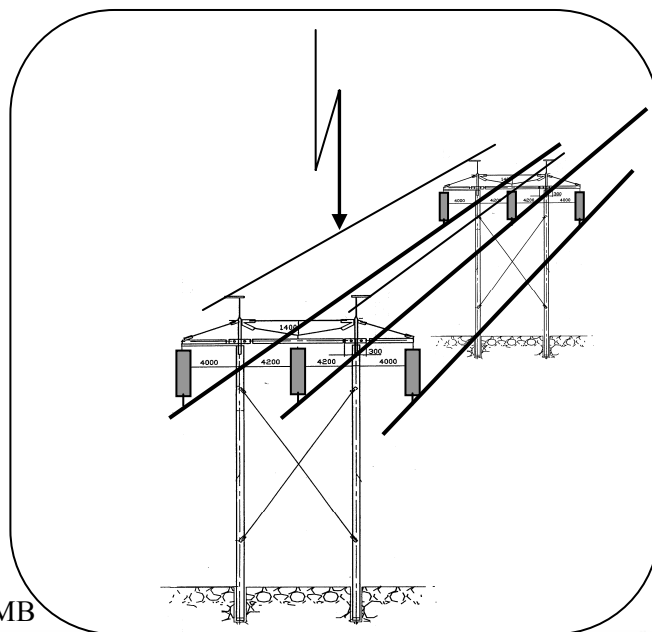


Рис. 10

1. Александров Г.Н. Молния и молниезащита. – М.: Наука, 2008. – 274 с.
2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащита. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
3. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Ред. Г.Н. Александрова. – М.: Энергоатомиздат. 1993. – 560 с.
4. Техника высоких напряжений / Ред. Д.В. Разевиг. – М.: Энергия, 1976. – 487 с.
5. Anderson R.B. and Eriksson A.J. Lightning Parameters for Engineering Applications // *Electra*, 1980, № 69.
6. Beieri O. Front Shape Parameters of Negative Subsequent Strokes Measured at the Peissenberg Tower // *Proceeding of the 21st Int. Conf. on Lightning Protection*. – Berlin, 21–25 September, 1992.
7. Bruce C.E., Golde R.H. The lightning discharge // *Journal of IEE*, 1941. – V. 88. P. 487–520.
8. Berger K., Anderson R.B., Kroeninger H. Parameters of Lightning Flashes // *Electra*, 1975, № 41.
9. Dommel, H. "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiple Networks // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88. – No. 4, April, 1969.
10. Eriksson A.J. Lightning and Tall Structures // *Trans. South Africa. IEE*, 1978. – 69, PL 8.
11. Gardner R.L., Baker L., Baum C.E., Andersh D.J. Comparison of Lightning with Public Domain HEMP Waveforms on the Surface of an Aircraft // *6th EMC Symposium*. – Zurich, 1985.
12. Garbagnati F., Lo Piparo G.B. Parameter von Blitz-stromen. – *ETZ*. – 1982. – Vol. 103, № 2.
13. Golde R.H. *Lightning*. – London: Academic Press Inc, 1977. Vol. 1, № 2.
14. <http://www.emtp.org>
15. <http://www.mathwork.com/>
16. International Standard IEC1021-1 1990. Protection structures against lightning. – 48 p.
17. Jones R.D. On the Use of Tailored Return-Stroke Current Representation to Simplify the Analysis of Lightning Effect on Systems // *IEEE Trans. On EMC*, 1977.

УДК 621.311

**О.Д. Подольцев**, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

**Комп'ютерне моделювання грозових перенапруг у високовольтній повітряній лінії електропередавання**

*Описано математичну модель та програму розрахунку високочастотних процесів та перенапруг у повітряній лінії електропередавання напругою 330 кВ при попаданні грозового розряду в струмопровідний провід або захисний трос, яка реалізована у комп'ютерному середовищі Matlab/Simulink. Розглянуто комп'ютерні моделі для аналізу високочастотних процесів у опорі та гірлянді ізоляторів, а також різні підходи до моделювання розрядного струму грозового імпульсу. Наведено значення перенапруг, що виникають у лінії при різних параметрах імпульсу струму, який моделює грозовий розряд, а також при різних місцях прикладання цього імпульсу в лінії.* Бібл. 17, рис. 10.

**Ключові слова:** повітряна лінія електропередавання, високочастотні процеси, грозові перенапруги.

**O.D. Podoltsev**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

**Computer simulation of lightning overvoltage in high voltage overhead transmission line**

*The mathematical model and Matlab / Simulink program for calculation of overvoltage in overhead line 330 kV under the action of lightning discharge in the current-carrying wire or a security cable are presented. Computer models for the analysis of high-frequency processes in transmission tower and the support insulator strings, as well as different approaches to the modeling of lightning discharge current pulse are discussed. Finally, the lightning surge was analyzed at different parameters of the current pulse which simulates a lightning discharge, and at various points in the line of its application. References 17, figures. 10.*

**Key words:** overhead power transmission line, high-frequency processes, lightning surge.

Надійшла 03.03.2017

Received 03.03.2017