

In paper the alternative of a measuring complex on the basis of digital oscilloscope Tektronix of 2000 series and the personal computer is observed. Methods of calculation of power constituents of a total power of consumption and factors of power consumption are presented. The solution of a problem of an estimation of electromagnetic compatibility investigated load with the supply net is made as a result of the detailed analysis of a harmonic distortion of an input current. The measuring complex allows estimating quality of power consumption and electromagnetic compatibility of electrical installations with the supply net of any frequency.

Key words: quality of power consumption, electromagnetic compatibility, LabVIEW, a measuring complex.

Ponomarev Yuriy Gennadevich, postgraduate, ponomarev@vyatsu.ru, Russia, Kirov, Vyatka State University

УДК 621.316.9

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЯХ ПРИ УДАРАХ МОЛНИИ

Д.С. Шишигин

Показано, что при проектировании электрических подстанций производится расчет переходных электромагнитных процессов, вызванных ударом молнии. Частотный метод, метод дискретных схем и метод Влаха (численный вариант операторного метода) исследованы и сопоставлены по критерию точности и быстродействия в задачах расчета условного импеданса заземлителя, кондуктивных помех контрольного кабеля и грозовых перенапряжений. Отмечены преимущества метода дискретных схем при расчете заземляющих устройств и метода Влаха при расчете волновых процессов.

Ключевые слова: электрическая подстанция, удар молнии, переходный процесс, частотный метод, метод дискретных схем, метод Влаха.

При проектировании электрической подстанции (ПС) ставится задача защиты от прямого удара молнии и вторичных ее проявлений. Протекание тока молнии по молниеотводам и заземляющему устройству ПС вызывает перенапряжения, опасные для изоляции электрооборудования, а также кондуктивные помехи в контрольных кабелях и импульсные магнитные поля, опасные для микропроцессорных систем [1]. При ударе молнии в опору или грозозащитный трос воздушной линии возможно перекрытие изоляции опоры и волна тока молнии по проводам линии набегаёт на ПС, что представляет опасность для электрооборудования [2].

Для выбора средств защиты от последствий удара молнии на этапе проектирования необходимо рассчитать переходные (волновые) процессы токов и напряжений в сложной электрической цепи с сосредоточенными параметрами, которая наиболее часто рассматривается в качестве модели проводников ПС.

Принципиальным вопросом является выбор метода расчета переходных процессов. В большинстве компьютерных программ, например фирмы SES – мирового лидера расчета заземления и молниезащиты, используется частотный метод. В программе ЕМТР – мировом лидере в области расчета переходных процессов в электрических цепях – расчет проводится во временной области методом дискретных схем (МДС). Значительно реже используется метод Влаха – численный вариант операторного метода [3]. В шаговом варианте этого метода расчеты проводятся в частотной области, но преобразуются во временную область в конце каждого шага.

Главным недостатком частотного метода является невозможность расчета нелинейных цепей, в то время как для защиты от грозových перенапряжений на ПС используются нелинейные ограничители перенапряжений. Именно поэтому SES не решает эти задачи. Высокая трудоемкость, обусловленная медленным затуханием амплитудного спектра тока молнии, – второй недостаток частотного метода. Однако этот недостаток устраним, как будет показано далее.

Шаговые алгоритмы расчета переходных процессов во временной области позволяют учесть нелинейные сопротивления и значительно производительней. Основным недостатком являются трудности в учете частотно-зависимых сопротивлений $z(j\omega)$, к которым относятся все проводники в режиме поверхностного эффекта. Наиболее часто производится замена $z(j\omega)$ эквивалентной схемой с несколькими RL звеньями, обладающей близкой частотной характеристикой. Подбор схемы вручную [2] не обладает общностью. Автоматический синтез схемы по методу Марти, реализованный в программе ЕМТР, сложен для повторения. В любом случае замена внутреннего сопротивления $z(j\omega)$ каждого проводника эквивалентной схемой существенно увеличивает трудоемкость расчетов.

К недостаткам МДС многие исследователи относят формулу трапеций, которая при определенных условиях приводит к осцилляции решения [4]. Таким образом, методы расчета в частотной и временной областях обладают своими достоинствами и недостатками, нельзя выделить лучший метод для данного класса задач.

Ситуация может измениться в пользу расчетов во временной области, учитывая результаты работы [5]. Сопротивление $z(j\omega)$ заменяется дискретной моделью, состоящей из постоянного сопротивления и переменной ЭДС, параметры которых определяются автоматически, и не приводящей к

усложнению расчетов. Расчет переходных процессов во временной области выполняется по методу Влахы – численному варианту операторного метода.

Автором разработана и апробирована компьютерная программа, где реализован комплекс из трех методов расчета переходных процессов в цепях с сосредоточенными параметрами при импульсных воздействиях [6].

Целью настоящей работы является сравнительный анализ частотного метода, метода дискретных схем и метода Влахы по критерию функциональности, точности и быстродействия при расчете переходных процессов, возникающих в проводниках электрической подстанции при первом и последующих ударах молнии.

Частотный метод основан на дискретных преобразованиях Фурье. Импульс тока $f(t)$ задается в 2^n узлах (отсчетах) на интервале $[0, T]$. Прямое преобразование Фурье (функция FFT) переводит сигнал в частотную область – получается спектр функции, состоящий из $n/2+1$ гармоник. Для каждой гармоники проводится расчет в частотной области. К решению во временной области приводит обратное преобразование Фурье (функция IFFT).

Проблема в том, что для описания импульса тока молнии, который характеризуется быстрым нарастанием на фронте волны и относительно медленным затуханием, требуется большое число гармоник (сотни и тысячи). Для улучшения спектра импульсная функция искусственно продолжается на интервале $2T$ [7]

$$f_2(t) = \begin{cases} f(t), & 0 \leq t \leq T, \\ f(T) - f(t - T), & T < t \leq 2T, \end{cases} \quad (1)$$

а уже затем раскладывается в спектр, что позволяет существенно уменьшить число отсчетов при заданной точности. Недостаток в наличии постоянной составляющей, которая применительно к току молнии не имеет физического смысла.

В данной работе предлагается продолжить функцию $f(t)$ на интервале $4T$ (рис. 1, а)

$$f_4(t) = \begin{cases} f_2(t), & 0 \leq t \leq 2T, \\ f_2(T) - f_2(t - 2T), & 2T < t \leq 4T, \end{cases} \quad (2)$$

что дает спектр без постоянной составляющей (рис. 1, б). Спектр существенно улучшается – основная гармоника доминирует, нет четных гармоник, высшие гармоники затухают очень быстро. Число отсчетов требуется на порядок меньше, чем в стандартном варианте, без искусственной периодизации импульса.

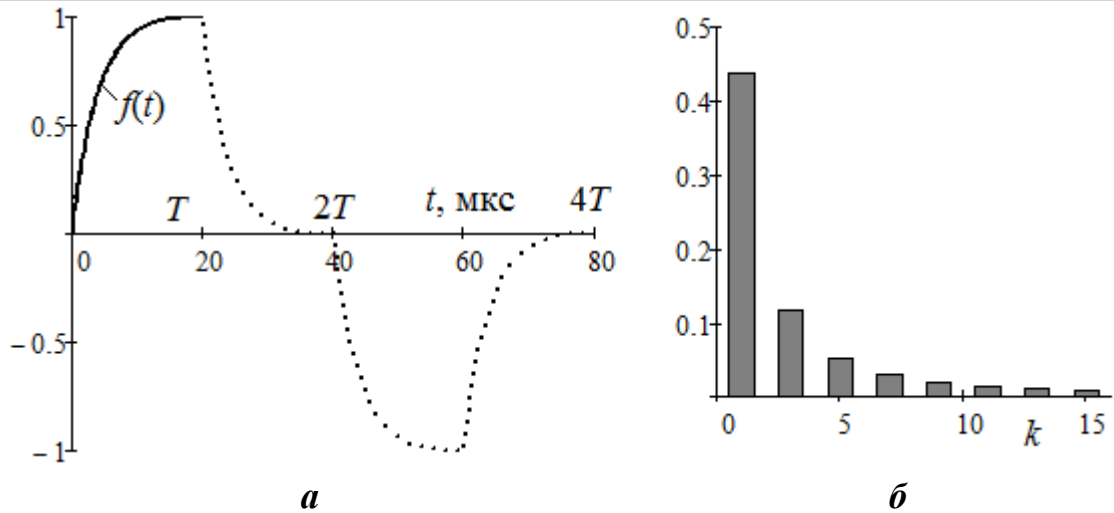


Рис. 1. Продолжение функции $f(t)$ на интервале $4T$ (а) и ее амплитудный спектр (б), k – номер гармоники, основная частота $f_1=1/4T$

Метод дискретных схем. Шаговые алгоритмы интегрирования дифференциальных уравнений по неявной формуле Эйлера и формуле трапеций сводятся к расчету резистивных схем [8]. Разобьем временной интервал на n равных шагов длиной h и выполним интегрирование дифференциальных уравнений между напряжениями и токами индуктивности и емкости на k -м временном шаге.

При использовании неявной формулы Эйлера

$$u = L \frac{di}{dt} \Rightarrow u_{k+1} = L \frac{i_{k+1} - i_k}{h} = \frac{L}{h} i_{k+1} - \frac{L}{h} i_k = Ri_{k+1} + E_k,$$

$$i = C \frac{du}{dt} \Rightarrow i_{k+1} = C \frac{u_{k+1} - u_k}{h} = \frac{C}{h} u_{k+1} - \frac{C}{h} u_k = Gu_{k+1} + J_k.$$

При использовании формулы трапеций

$$\begin{aligned} u = L \frac{di}{dt} &\Rightarrow \frac{u_{k+1} + u_k}{2} = L \frac{i_{k+1} - i_k}{h} \Rightarrow \\ \Rightarrow u_{k+1} &= \frac{2L}{h} i_{k+1} - \left(u_k + \frac{2L}{h} i_k \right) = Ri_{k+1} + E_k, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i = C \frac{du}{dt} &\Rightarrow \frac{i_{k+1} + i_k}{2} = C \frac{u_{k+1} - u_k}{h} \Rightarrow \\ \Rightarrow i_{k+1} &= \frac{2C}{h} u_{k+1} - \left(i_k + \frac{2C}{h} u_k \right) = Gu_{k+1} + J_k. \end{aligned}$$

Этим уравнениям соответствуют дискретные схемы замещения (рис. 2)

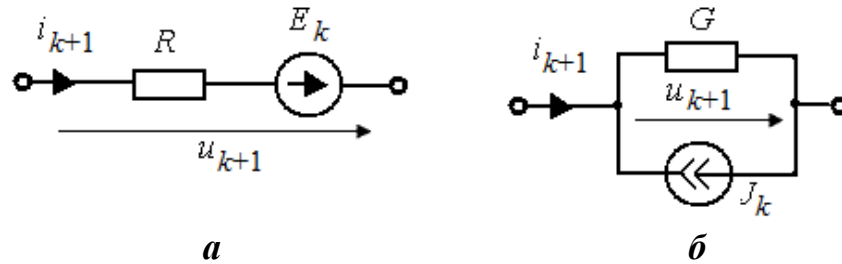


Рис. 2. Дискретные схемы замещения индуктивности (а) и емкости (б) на k -м временном шаге

Метод Влаха [3] – численный вариант операторного метода. В основе метода – семейство формул численного обратного преобразования Лапласа. В шаговых алгоритмах используется формула 3-го порядка

$$f(t) = \text{Re}((5\sqrt{2}j - 2) \cdot F(s)) / t, \quad s = (2 + \sqrt{2}j) / t, \quad t > 0,$$

где $F(s)$ – операторная функция; s – комплексная частота.

Шаговый алгоритм по методу Влаха аналогичен шаговому алгоритму МДС, рассмотренному ранее, с учетом замены $R=sL$, $E_k=Li_k$, $G=sC$, $J_k=Cu_k$ (рис. 2). Поскольку s – комплексное число, то расчету на каждом k -м шаге подлежит комплексная схема вместо резистивной схемы в МДС. Таким образом, шаговый алгоритм по методу Влаха на порядок более точный, чем МДС, однако и более трудоемкий из-за операций с комплексными числами.

Дискретная модель частотного сопротивления [5]. Пусть задано сопротивление $Z(j\omega)$ или его операторный аналог $Z(s)$. Проинтегрируем $Z(s)$ в пространстве изображений и, перейдя к оригиналу, получим переходное сопротивление $z(t)=\mathbf{L}^{-1}[Z(s)/s]$, связывающее между собой напряжение и ток в интеграле Дюамеля,

$$u(t) = z(t)i(0) + \int_0^t z(t-x) \cdot i'(x) dx.$$

Начальные условия нулевые $i(0)=0$. Воспользуемся дискретной формой записи интеграла Дюамеля на временной сетке с узлами $t_n=(n-1)h$, $n=1..N+1$, где N – число интервалов длиной h . Производная тока в пределах каждого интервала считается постоянной ($i_n'=\text{const}$). Тогда

$$\begin{aligned} u_{n+1} &= \sum_{m=1}^n \frac{i_{m+1} - i_m}{h} \int_{t_m}^{t_{m+1}} z(t_{n+1} - x) dx = \sum_{m=1}^n (i_{m+1} - i_m) R_{n-m+1} = \\ &= R_1 \cdot i_{n+1} - \sum_{m=2}^n (R_{n-m+1} - R_{n-m+2}) i_m = R_1 \cdot i_{n+1} - E_n, \\ R_k &= \frac{1}{h} \int_{(k-1)h}^{k \cdot h} z(y) dy, \quad k = 1..N. \end{aligned}$$

Полученному выражению соответствует дискретная схема замещения, аналогичная дискретной схеме индуктивности (рис. 2, а), с постоянным сопротивлением, но переменной ЭДС. Дискретные модели внутреннего и внешнего сопротивлений стального стержня включены последовательно, их параметры суммируются, поэтому данная методика не приводит к усложнению расчетов. В работе [9] этот метод получил развитие на основе численных методик и в настоящее время применим для произвольной функции $z(j\omega)$.

Рассчитаем переходные процессы тремя методами в характерных задачах, возникающих при проектировании молниезащиты ПС (рис. 3) при первом и втором ударах молнии.

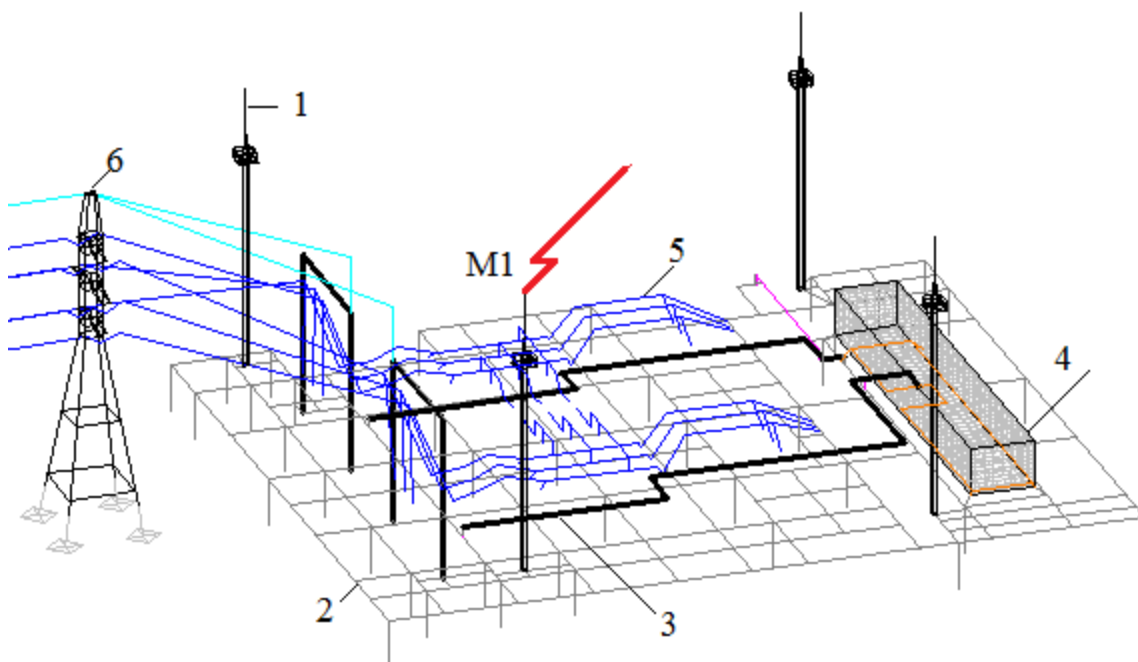


Рис. 3. Расчетная модель электрической подстанции:
1 – молниеотводы; 2 – заземляющее устройство; 3 – контрольный кабель; 4 – общестанционный пункт управления; 5 – шины; 6 – опора воздушной линии

Первый импульс тока молнии имеет амплитуду $I=100$ кА, длительность фронта $T_1=10$ мкс, длительность до полуспада $T_2=350$ мкс. Второй и последующий импульсы тока молнии имеют амплитуду $I=25$ кА, длительность фронта $T_1=0.25$ мкс, длительность до полуспада $T_2=100$ мкс. Импульс косоугольной формы

$$i(t) = \begin{cases} I \cdot t/T_1, & t \leq T_1, \\ I - I \frac{t-T_1}{2T_2-T_1}, & T_1 < t < 2T_2 \end{cases}$$

329

предъявляет наибольшие требования к вычислительным алгоритмам по сравнению с гладкими функциями.

Условный импеданс заземлителя. Малое сопротивление на частотах молнии – основное требование к заземлителю молниезащиты. При импульсных воздействиях это сопротивление называют условным импедансом и определяют как отношение максимума напряжения к максимуму тока согласно ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 (п.3.50). Результаты расчета условного импеданса при вводе тока молнии в основание молниеотвода М1 (рис. 3) представлены в таблице. При первом импульсе тока молнии расчеты разными методами дают близкие результаты, но при втором импульсе точности неявной формулы Эйлера уже недостаточно. Расчеты по формуле трапеций практически совпадают с расчетами по более точному методу Влаха, но выполняются в 2 раза быстрее.

Таким образом, формула трапеций имеет преимущества при расчете заземлителей. Метод Влаха избыточен по точности. Частотный метод в несколько раз более трудоемкий, чем МДС.

Условный импеданс заземлителя

Первый импульс тока молнии					
Параметр	МДС, формула Эйлера	МДС, формула трапеций	Метод Влаха	Частотный метод, период $2T$ (1)	Частотный метод, период $4T$ (2)
R , Ом	7.23	7.24	7.23	7.02	7.04
t , сек	4	4	8	6	11
Второй импульс тока молнии					
R , Ом	15.6	15.5	15.4	15.1	15.9
t , сек	4	4	8	6	11
Число шагов 160; число отсчетов 32, число проводников 1100					

Кондуктивные помехи. Найдем кондуктивную помеху, иначе напряжение между жилой и экраном, на выходе контрольного кабеля при ударе молнии в молниеотвод М1 (рис. 3). Для кабеля с двусторонним заземлением экрана кондуктивная помеха [1]

$$u(t) = z_t l \cdot i(t),$$

где $i(t)$ – ток экрана; z_t – передаточное сопротивление жила-экран; l – длина кабеля.

При первом импульсе тока молнии расчеты по МДС и методу Влаха практически совпадают (рис. 4, а). При расчете частотным методом напряжение в начальный момент времени при нулевом токе не равно нулю, что

является нарушением принципа причинности. Отсюда возникает погрешность решения (рис. 4, а). При втором импульсе тока молнии все методы дают близкие результаты за исключением формулы Эйлера.

Таким образом, неявная формула Эйлера неточна, частотный метод имеет проблемы с принципом причинности. МДС с формулой трапеций – вновь наилучший метод расчета, поскольку дает близкие результаты с методом Влаха при вдвое большем быстродействии.

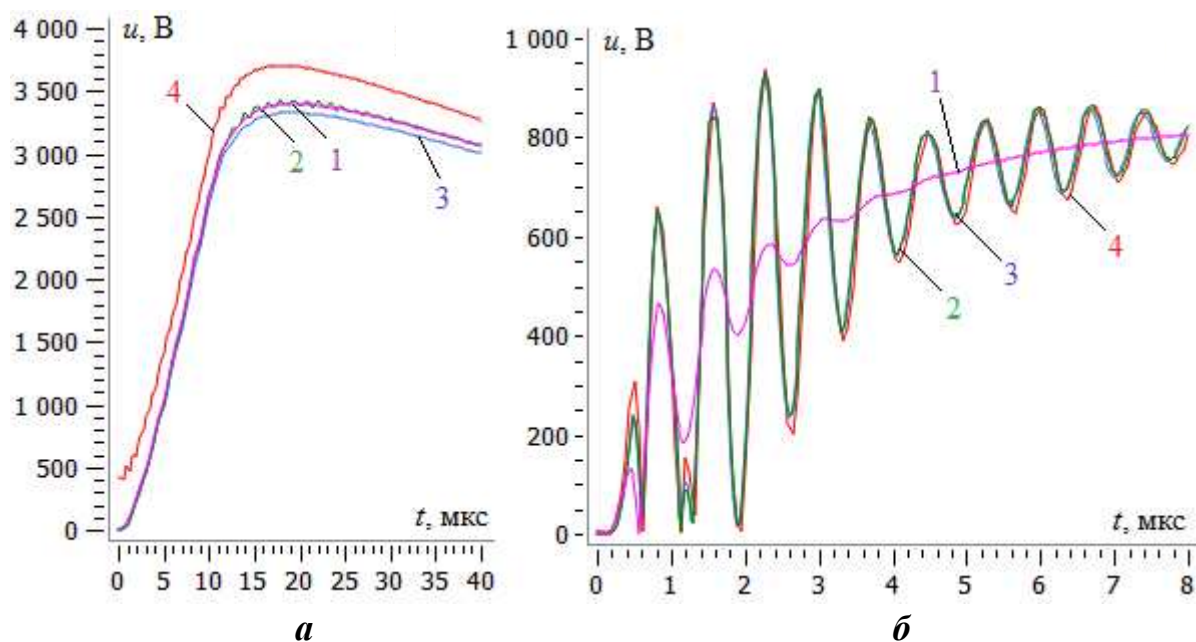


Рис. 4. Кондуктивные помехи в контрольном кабеле с передаточным сопротивлением $z_d=1,6$ Ом при первом (а) и втором (б) импульсах тока молнии, рассчитанных по: 1 – МДС с неявной формулой Эйлера; 2 – МДС с формулой трапеций; 3 – методу Влаха; 4 – частотному методу с периодом $4T$ (128 отсчетов)

Волновые процессы. Удар молнии в опору воздушной линии приводит к перекрытию изоляции, и возникает волна перенапряжения с крутым фронтом. В качестве модельной задачи рассмотрим волновые процессы в линии без потерь в режиме холостого хода и с емкостной нагрузкой, которой моделируется силовой трансформатор ПС в импульсном режиме. В режиме холостого хода неявная формула Эйлера слишком неточна, формула трапеций приводит к осцилляции решения и только метод Влаха дает решение с заданной точностью (рис. 5, а). В режиме емкостной нагрузки формула трапеций дает результаты, близкие к методу Влаха (рис. 5, б).

Таким образом, метод Влаха имеет преимущество в точности расчетов по сравнению с МДС при расчете волновых процессов.

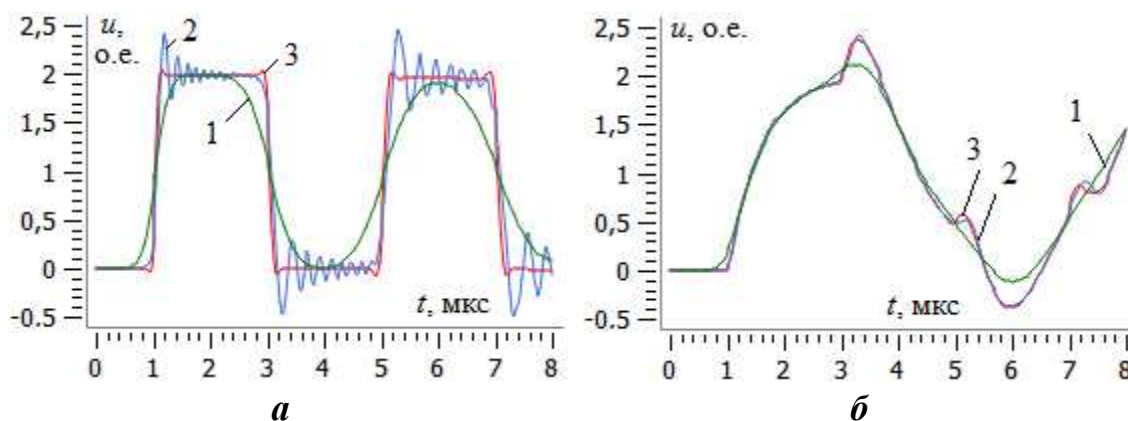


Рис. 5. Относительное напряжение в конце линии без потерь длиной 300 м при воздействии импульса напряжения с фронтом 0,1 мкс: а – в режиме холостого хода; б – при емкостной нагрузке $C=1000$ нФ, рассчитанное по: 1 – неявной формуле Эйлера; 2 – формуле трапеций; 3 – методу Влаха

Заключение. Методы расчета переходных процессов во временной области с учетом моделирования частотно-зависимых сопротивлений $z(j\omega)$ дискретными схемами имеют преимущество перед частотным методом по функциональности и быстродействию. Метод Влаха имеет преимущество перед методом дискретных схем по точности расчетов, но проигрывает в быстродействии. При разработке компьютерных программ следует реализовывать комплекс методов расчета переходных процессов, чтобы гарантировать эффективность и достоверность решения.

Список литературы

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, И.П. Кужекин, Б.К. Максимов, А.Г. Темников; под ред. А.Ф. Дьякова. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 455 с.
2. Актуальные проблемы защиты высоковольтного оборудования подстанций от грозových волн, набегающих с воздушных линий / Б.В. Ефимов, Ф.Х. Халилов, А.Н. Новикова, Н.И. Гумерова, Ю.М. Невретдинов // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 8. С. 7 – 25.
3. Влаха И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. М.: Радио и связь, 1988. 560 с.
4. Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М.: Мир, 1999. 685 с.
5. Шишигин С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество. 2010. № 1. С. 16 – 23.

6. Шишигин Д.С. AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики // Автоматизация в промышленности. 2014. № 9. С. 28 – 32.

7. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей: Линейные цепи: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1981. 333 с.

8. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. 5-е изд. СПб.: Питер, 2009. Т. 2. 432 с.

9. Шишигин Д.С., Шишигин С.Л. Моделирование волновых процессов в линиях при ударах молнии // 5-я Российская конференция по молниезащите: сборник материалов конф. СПб., 2016. С. 358 – 362.

Шишигин Дмитрий Сергеевич, преподаватель, shishigind@yandex.ru, Россия, Вологда, Вологодский государственный университет

*METHODS OF TRANSIENTS CALCULATION AT ELECTRIC POWER SUBSTATIONS
WHEN LIGHTNING STRIKES*

D.S. Shishigin

It was shown, that when designing electric power substations calculation of transient electromagnetic processes caused by a lightning strike is carried out. Fourier method, discrete circuits method and Vlach method (numerical version of the operator method) are analyzed and compared according to the criteria of accuracy and performance in problems of conventional grounding impedance, control cable conductive noise and lightning surges calculations. Advantages of the discrete circuits method when calculating grounding devices and the Vlach method when calculating lightning surges are shown.

Key words: electric power substation, lightning strike, transients, Fourier method, discrete circuits method, Vlach method.

Shishigin Dmitry Sergeevich, lecturer, shishigind@yandex.ru, Russia, Vologda, Vologda State University