

ПРИМЕНЕНИЕ СВОБОДНО РАСПРОСТРАНЯЕМОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ-ЭНЕРГЕТИКОВ



Докладчик:

**Андрей
Анатольевич**

Белогловский

НИУ «МЭИ», Москва

Автор:

Белогловский Андрей Анатольевич,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ», Москва.

Кафедра Техники и электрофизики высоких
напряжений.

Особенности инженерной подготовки в области электроэнергетики и электротехники (направление 13.03.02), по сравнению с изучением экономических, управленческих и гуманитарных дисциплин:

- значительный объём изучаемых специализированных физико-математических дисциплин (Теоретические основы электротехники, Техника высоких напряжений, Переходные процессы в электроэнергетических системах, Методы расчёта электрических и магнитных полей, Физика электрических разрядов);
- необходимость выполнения сложных физико-математических расчётов в процессе их изучения с использованием приближённых аналитических и численных методов (расчёт установившихся и переходных процессов в электрических цепях с сосредоточенными и распределёнными параметрами, электрических и магнитных полей воздушных линий электропередачи высокого напряжения, вычисление начальных напряжений воздушных разрядных промежутков);
- численные расчёты, нужные для выполнения выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров (расчёт и анализ установившихся и переходных процессов в электроэнергетических системах, электротехнических и электрофизических установках), включая 2D и 3D математическое моделирование (расчёт, анализ и регулирование 2D и 3D электрических полей установок высокого напряжения, математическое моделирование электрических разрядов в них).

Следствия указанных особенностей:

- большой объём вычислений с использованием электронно-вычислительных машин (ЭВМ), включая персональные компьютеры;
- необходимость компьютерной визуализации полученных данных, чтобы обеспечить удобство их анализа (2D и 3D графика, анимация результатов);
- необходимость дополнительных вычислений на ЭВМ (аппроксимация результатов вычислений и экспериментов, поиск экстремумов полученных функций средствами условной и безусловной математической оптимизации).

Для решения перечисленных и множества подобных им задач целесообразно:

- применять стандартные математические библиотеки для вычислений на ЭВМ;
- использовать специализированные программы научных и инженерных расчётов.

Широко распространённые программы для ЭВМ, специализированные на научных и инженерных расчётах:

- MathWorks MATLAB®;
- PTC Mathcad.

Достоинства:

- богатый выбор встроенных математических и графических функций;
- высокая производительность;
- сообщества пользователей, выкладывающих свои разработки в Интернет.

Недостаток:

- достаточно высокая стоимость.

Альтернатива: свободно распространяемое программное обеспечение Scilab (www.scilab.org).

Достоинства:

- библиотеки встроенных функций покрывают подавляющую часть потребностей в математических вычислениях и графическом представлении результатов;
- кроссплатформенность (существуют версии для Microsoft Windows, Apple Mac OS X, Linux);
- язык программирования близок к языку MATLAB.

Недостаток: производительность ниже, чем у MATLAB.

Задача: решить вопрос о применимости Scilab в учебном процессе.

Пример 1: моделирование распространения волны напряжения в разомкнутой однородной электрической линии с распределёнными параметрами.

Математическая модель:

- волновое уравнение

$$\partial^2 U / \partial t^2 = v_0^2 \partial^2 U / \partial x^2, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq t \leq T,$$

где

$v_0 = (C_0 L_0)^{-0,5}$ – скорость распространения волны;

C_0, L_0 – её удельные ёмкость и индуктивность;

- начальные условия: $U|_{t=0} = 0, \quad \partial U / \partial t|_{t=0} = 0, \quad 0 \leq x \leq l;$
- граничные условия: $U|_{x=0} = E(t), \quad \partial U / \partial x|_{x=l} = 0, \quad 0 \leq t \leq T.$

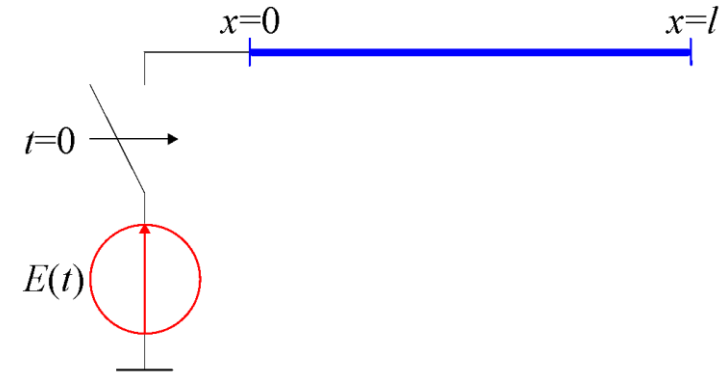


Схема замещения цепи

Характеристика решения задачи.

Способ решения: численное.

Метод решения: метод конечных разностей (КР).

КР сетка: с постоянными шагами $h=l/(N_x-1)$ по координате x и τ по времени t , где N_x – число шагов по x .

КР аппроксимация волнового уравнения: аппроксимация «крест» второго порядка точности по переменным x и t .

Определение величины τ и числа N_t шагов по времени: $\tau=kh/v_0$, $N_t=\text{int}(T/\tau)+1$, где $k=v_0\tau/h$ – число Куранта.

Условие устойчивости КР аппроксимации уравнения: $0 < k \leq 1$. Принято $k=1$.

Источник:

Калиткин Н.Н. Численные методы: Учебное пособие для вузов. М.: Издательство «Наука», 1978. 512 с.

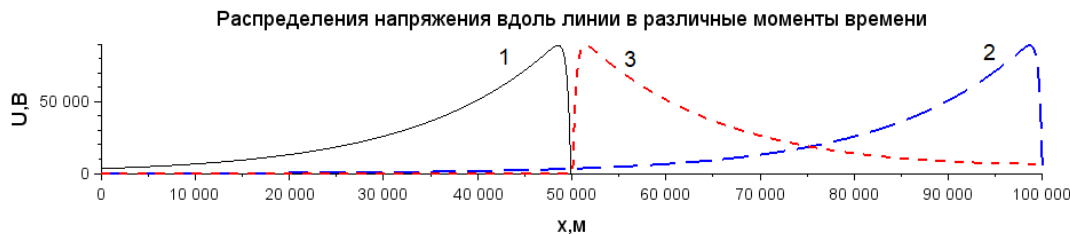
Математическое моделирование выполнено для однопроводной воздушной линии электропередачи (ВЛ) длиной $l=10^5$ м с проводом радиусом $R=0,015$ м, подвешенным на высоте $H=8$ м.

Параметры модели:

- $C_0=2\pi\epsilon_0/\ln(2H/R)=7,975\cdot 10^{-12}$ Ф/м;
- $L_0=\mu_0/(2\pi)\cdot[\ln(2H/R)+1/4]=1,4\cdot 10^{-6}$ Гн/м;
- $v_0=(C_0L_0)^{-0,5}=2,946\cdot 10^8$ м/с;
- $T=1,5l/v_0=5,091\cdot 10^{-4}$ с;
- $E(t)=E_{\max}\cdot(e^{-t/t_{\text{и}}}-e^{-t/t_{\text{ф}}})$, где $E_{\max}=10^5$ В, $t_{\text{ф}}=1,2\cdot 10^{-6}$ с, $t_{\text{и}}=5\cdot 10^{-5}$ с;
- $U_{\max}=\max[E(t)]=8,903\cdot 10^5$ В.
- Расчёты выполнены на ПК с процессором Intel Celeron N3350 с тактовой частотой 1,1 ГГц оперативной памятью объёмом 4 ГБ, который работал под управлением 64-разрядной операционной системы Windows 10. Соответственно, применена 64-разрядная редакция Scilab.

Результаты математического моделирования и оценка затрат машинного времени на него

Распределения напряжения $U(x,t)$ вдоль однородной электрической линии в различные моменты времени t и зависимость максимального напряжения в линии от времени: 1 – $t=T/3$; 2 – $t=2T/3$; 3 – $t=T$.



Зависимость затрат времени реализующей ЭВМ от числа N_x узлов КР сетки по координате x

N_x	251	501	1001	2001
N_t	375	750	1500	3000
$t_{сч}, с$	3,436	13,88	53,69	263,25

Вывод: время счёта изменяется от $\approx 3,5$ секунд на КР сетке 251×375 узлов, до $\approx 4,4$ минуты на сетке 2001×3000 узлов (указаны соответствующие друг другу значения $N_x \times N_t$).

Москва, Россия
14-17 апреля 2020 г.

Пример 2: Расчёт электрического поля (ЭП) токоведущей шины круглого сечения над землёй.

Расчёт ЭП выполнен методом вторичных источников поля (эквивалентных зарядов): реальное ЭП замещается эквивалентным ему, которое создано фиктивным распределением заряда $\sigma(S')$ по поверхности S' , помещённой внутри проводника.

Распределение $\sigma(S')$ определяется из решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода

$$\oint_S \frac{\sigma(S_A) dS'}{4\pi\epsilon_0 r_{AB}} = U$$

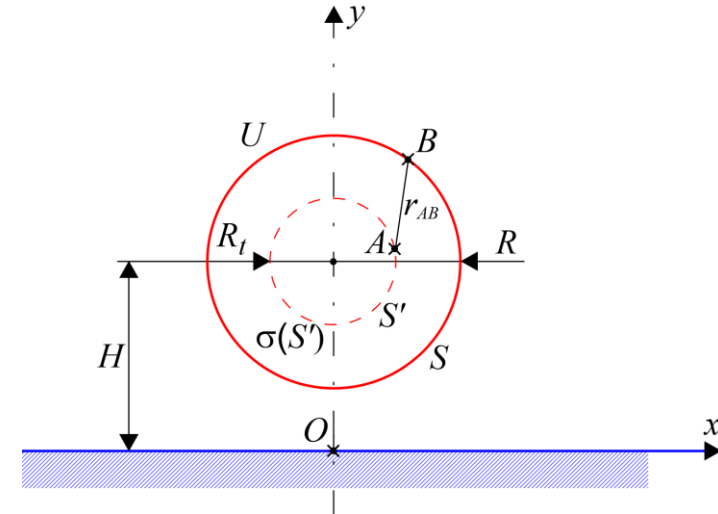
где A и B – произвольные точки поверхностей S' и S соответственно.

Распределение $\sigma(S')$ – это система $N_{\text{ЭЗ}}$ бесконечных равномерно заряженных осей. Они параллельны друг другу и общей оси вращения поверхностей S и S' , равномерно размещены по S' .

После вычисления $\sigma(S')$ скалярный потенциал ϕ ЭП и вектор его напряжённости \mathbf{E} определяются методом наложения.

Источник:

Белогловский А.А., Пашинин И.В. Методы расчета электрических полей в примерах и задачах: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 84 с.



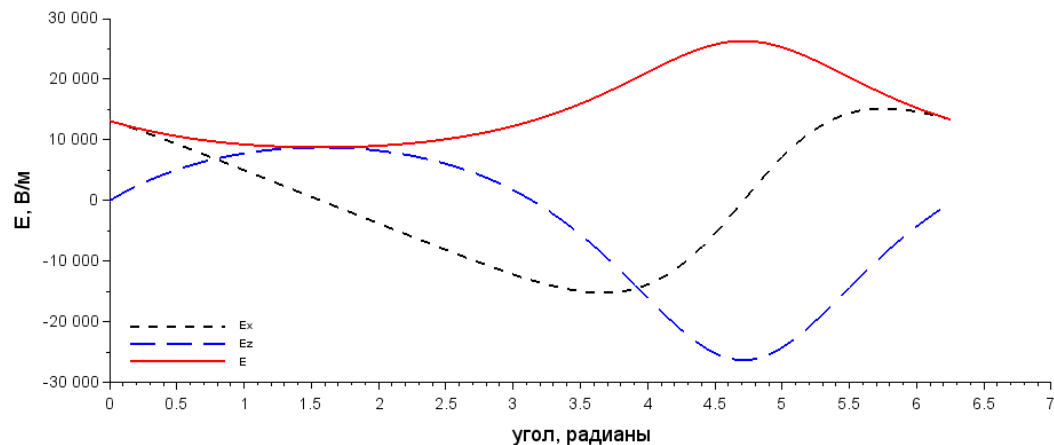
К расчёту ЭП токоведущей шины методом вторичных источников поля:

Шина – цилиндрический проводник радиусом R , ограниченный поверхностью S , чья ось вращения параллельна заземлённой проводящей плоскости, $H > R$. Напряжение между ней и цилиндром равно U . Длина цилиндра $L \gg H$.

Москва, Россия
14-17 апреля 2020 г.

Результаты расчёта ЭП и оценка затрат машинного времени на выполнение вычислений

Параметры модели: $H=0,1$ м, $R=0,05$ м, $U=1000$ В, $R_t=0,9R$.



Распределения модуля E вектора напряжённости электрического поля и его проекций E_x на координатную ось Ox и E_y на ось Oy по поверхности токоведущей шины круглого сечения при $N_{ЭЗ}=101$; угол, определяющий положение расчётной точки, отсчитывается от положительного направления горизонтальной оси Ox .

Зависимость затрат времени реализующей ЭВМ от числа $N_{ЭЗ}$ эквивалентных зарядов

$N_{ЭЗ}$	25	51	101	201
$t_{сч}, с$	0,3019	1,435	1,580	5,741
$E_{max}, В/м$	28280,8	26418,8	26301,3	26303,0
$\delta E_{max}, о.е.$	—	0,0705	0,00449	$6,46 \cdot 10^{-5}$

Здесь $\delta E_{max}(N_{ЭЗ}) = |E_{max}(N_{ЭЗ}) - E_{max}(0,5N_{ЭЗ})| / E_{max}(N_{ЭЗ})$.

Выводы:

- уже при $N_{ЭЗ}=101$ $\delta E_{max} < 0,005$, что достаточно в инженерных расчётах;
- время счёта при $N_{ЭЗ}=101$ составляет $t_{сч} \approx 1,58$ с, увеличиваясь до $t_{сч} \approx 5,74$ с при $N_{ЭЗ}=201$.

Выводы:

Свободно распространяемое программное обеспечение Scilab для инженерных и научных расчётов позволяет получить численное решение физико-математических задач за умеренное время, вполне приемлемое для выполнения расчётных заданий, курсовых проектов и работ и т.п., по меньшей мере в двух областях:

- расчёт переходных процессов в электрических линиях с распределёнными параметрами;
- расчёт электрических полей установок высокого напряжения.

Список обозначений:

- $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;
- $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;
- x, y – пространственные координаты по осям Ox и Oy соответственно, м;
- t – время, с;
- U – электрическое напряжение, В;
- C_0 – удельная ёмкость фазных проводов ВЛ, Ф/м;
- L_0 – удельная индуктивность фазных проводов ВЛ, Гн/м;
- v_0 – скорость распространения волны напряжения вдоль ВЛ, м/с;
- E – в примере 1 – ЭДС, В; в примере 2 – напряжённость электрического поля, В/м;
- N – количество узлов конечно-разностной сетки (в примере 1) или эквивалентных зарядов (в примере 2).

Спасибо за внимание!

Контакты докладчика:



Андрей Анатольевич

Белогловский

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва.

e-mail: BeloglovskyAA@mpei.ru

