

19. *Shuleykin V.N., Shchukin G.G., Kupovykh G.V. Razvitie metodov i sredstv prikladnoy geofiziki – atmosferno-elektricheskiy monitoring geologicheskikh neodnorodnostey i zon geodinamicheskikh protsessov [Development of methods and means of applied geophysics - atmospheric and electrical monitoring of geological heterogeneities and zones of geodynamic processes]. Saint Petersburg: RGGMU, 2015, 206 p.*
20. *Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Gritsov V.V. The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. 913 052041, 6 p.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Куповых Геннадий Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371636; кафедра высшей математики; зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

Клово Александр Георгиевич – e-mail: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371636; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Гривцов Владимир Владиславович – e-mail: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371794; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; к.т.н.; доцент.

Белюсова Ольга Васильевна – e-mail: obelousova@sfedu.ru, тел.: +78634371636; кафедра высшей математики, ассистент.

Kupovkh Gennady Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371636; the department of weisssch mathematics, department; dr. of phis.-math. sc.; professor.

Klovo Alexander Georgievich – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371636; the department of vyshinsky mathematics;cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Gritsov Vladimir Vladislavovich – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371794; the department of engineering graphics and computer design; cand. of eng. sc.; associate professor.

Belousova Olga Vasilievna – e-mail: obelousova@sfedu.ru; phone: +78634371636; the department of the highest mathematician; assistant.

УДК 621.373.1

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-243-254

А.М. Пилипенко, А.В. Агабекян

МОДЕЛЬ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В SPICE-СИМУЛЯТОРАХ

В настоящее время задача разработки методов численного анализа радиотехнических цепей во временной области остается актуальной, поскольку известные методы Гира и трапеций, использующиеся в SPICE-симуляторах, имеют ряд существенных недостатков. Для оценки эффективности новых численных методов необходимы специальные тестовые задачи, позволяющие определить точность методов в различных режимах работы. Численный анализ автоколебательных цепей во временной области представляет наибольшие трудности для программ схемотехнического моделирования (SPICE-симуляторов), поскольку модели таких цепей могут быть осциллирующими и жесткими одновременно. Целью данной работы является создание модели автоколебательной цепи, позволяющей количественно оценить точность методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах. В соответствии с поставленной целью в работе были решены следующие задачи: исследованы особенности численного анализа классических моделей автогенераторов в SPICE-симуляторах; описана обобщенная математическая модель автоколебательных цепей; предложена универсальная схемная модель автоколебательных цепей для SPICE-симуляторов; проведена количественная оценка точности методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах. Предлагаемая в дан-

ной работе модель позволяет определить относительные погрешности численных методов в режиме гармонических колебаний, в режиме релаксационных колебаний, а также в «смешанном» режиме, при котором отклик цепи содержит как экспоненциальные составляющие с различной скоростью изменения, так и квазигармонические составляющие. Полученные результаты подтверждают высокую точность метода трапеций в режиме гармонических колебаний, а метода Гира – в режиме релаксационных колебаний. Относительные погрешности определения амплитуды колебаний с помощью данных методов для соответствующих режимов работы не превышают 3%. В то же время в «смешанном» режиме работы относительные погрешности определения амплитуды колебаний для обоих методов могут достигать 100%, что подтверждает необходимость применения дополнительных опций или специальных методов численного анализа в SPICE-симуляторах.

Автогенератор; гармонические колебания; релаксационные колебания; обыкновенные дифференциальные уравнения; погрешность решения.

A.M. Pilipenko, A.V. Agabekyan

MODEL OF SELF-OSCILLATING CIRCUIT FOR TESTING NUMERICAL METHODS OF TRANSIENT ANALYSIS IN SPICE-SIMULATORS

At present time the problem of developing methods for numerical analysis of RF circuits in the time domain remains actual because the known Gear and trapezoidal methods used in SPICE simulators have a number of significant disadvantages. To evaluate the effectiveness of new numerical methods, special test problems are needed to determine the accuracy of methods in various operating modes. Numerical analysis of self-oscillating circuits in the time domain offers the most difficulties for circuit simulation programs (SPICE-simulators) since models of self-oscillating circuits can be both oscillatory and stiff simultaneously. The aim of this work is to create the model of a self-oscillating circuit that allows to quantify the accuracy of numerical methods. In accordance with the aim, the following problems are solved: the features of the numerical analysis of classical self-oscillators in SPICE-simulators are investigated; the generalized mathematical model of self-oscillating circuits is described; the universal circuit model of self-oscillating circuits for SPICE-simulators is presented; the quantitative accuracy assessment of numerical methods of transient analysis in SPICE-simulators was carried out. The model proposed in this paper makes it possible to determine the relative errors of numerical methods in the harmonic oscillations mode, in the relaxation oscillations mode, as well as in the «mixed» mode, when the circuit response contains both exponential components with different rates of change and quasi-harmonic components. The obtained results confirm the high accuracy of the trapezoidal method in the mode of harmonic oscillations, and the Gear method in the mode of relaxation oscillations. The relative errors in determining the amplitude of oscillation using these methods for the corresponding operating modes do not exceed 3%. At the same time, in the «mixed» mode, the relative errors in determining the amplitude of oscillation for both methods can reach 100%, that confirms the need to use additional options or special methods of numerical analysis in SPICE-simulators.

Self-oscillator; harmonic oscillations; relaxation oscillations; ordinary differential equations; solution error.

Введение. В настоящее время продолжается разработка методов численного анализа радиотехнических цепей во временной области для пакетов схемотехнического моделирования (SPICE-симуляторов) [1–4]. Актуальность проблемы разработки новых методов численного анализа радиотехнических цепей во временной области связана с тем, что используемые в SPICE-симуляторах методы трапеций и Гира позволяют решать осциллирующие или жесткие задачи соответственно, в то время как модели автоколебательных цепей могут быть осциллирующими и жесткими одновременно [5–7]. Важным этапом разработки численных методов является их тестирование при решении специальных задач. При тестировании численного метода необходимо определить как качественную, так и количественную оценку точности полученного решения.

Для достоверной количественной оценки точности численного решения тестовой задачи необходимо знать ее аналитическое решение. В общем случае аналитическое решение обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) автоколе-

бательных цепей определить не удастся, однако, в частных случаях, при использовании кубической или кусочно-линейной аппроксимации вольт-амперной характеристики (ВАХ) нелинейного элемента автогенератора возможно получение аналитического решения [8, 9].

Целью данной работы является создание модели автоколебательной цепи, позволяющей количественно оценить точность методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие **задачи**:

- ◆ исследование особенностей численного анализа классических моделей автогенераторов в SPICE-симуляторах;
- ◆ описание обобщенной математической модели автоколебательной цепи в виде обыкновенного дифференциального уравнения с известным аналитическим решением в различных режимах работы;
- ◆ разработка универсальной схемной модели автоколебательной цепи для SPICE-симуляторов;
- ◆ количественная оценка точности методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах с помощью предложенной модели.

1. Численный анализ классических моделей автогенераторов. Классические схемы автоколебательных цепей, генерирующих гармонические и релаксационные колебания описаны, например, в работах [10] и [11]. На рис. 1 представлены классические схемы автогенераторов, реализованные в популярном SPICE-симуляторе NI Multisim [12]. Схема на рис. 1,а представляет собой генератор гармонических колебаний с автотрансформаторной обратной связью, а схема на рис. 1,б – генератор релаксационных колебаний, также называемый симметричным мультивибратором.

Параметры моделей пассивных элементов и источников постоянного напряжения рассматриваемых генераторов указаны непосредственно на рис. 1, параметры трансформатора T1 и биполярных транзисторов Q1, Q2 приведены в работе [13].

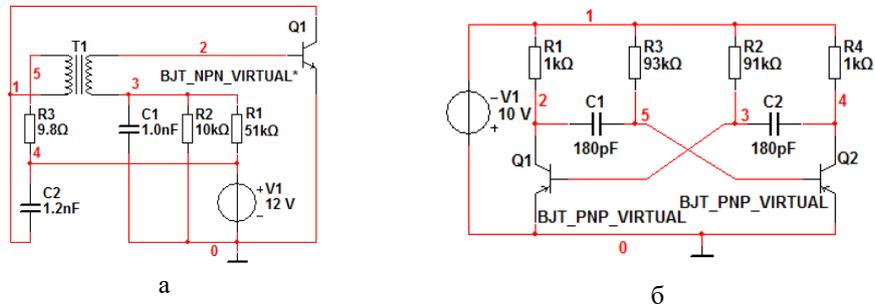


Рис. 1. Схемы автогенераторов, реализованные в NI Multisim:

а – генератор гармонических колебаний, б – генератор релаксационных колебаний

На рис. 2 представлены временные диаграммы напряжения на выходе генератора гармонических колебаний u_{C2} , полученные в симуляторе NI Multisim методами трапеций и Гира при выбранных «по умолчанию» настройках временного шага и точности решения (автоматический выбор величины шага, предельно допустимая относительная погрешность решения $REL TOL = 10^{-3}$). На рис. 3 приведены аналогичные результаты, полученные в симуляторе NI Multisim для генератора релаксационных колебаний.

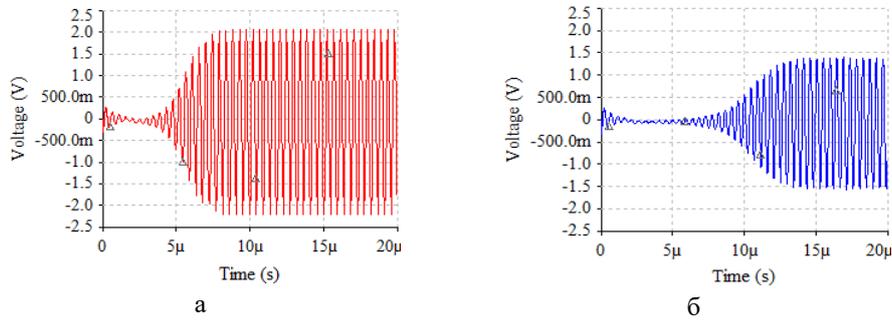


Рис. 2. Временные диаграммы напряжения на выходе генератора гармонических колебаний, полученные методами трапеций (а) и Гира (б)

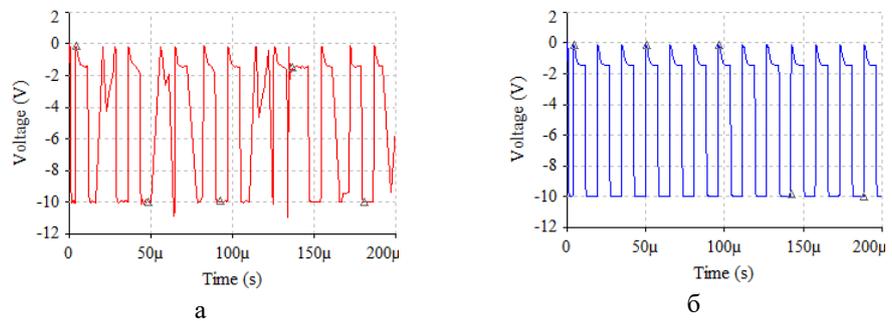


Рис. 3. Временные диаграммы напряжения на выходе генератора релаксационных колебаний, полученные методами трапеций (а) и Гира (б)

Как видно из рис. 2 и 3 численные решения, полученные разными методами для рассматриваемых автогенераторов, существенно отличаются. Так для генератора гармонических колебаний, напряжение на выходе, полученное методом Гира, отличается от напряжения, полученного методом трапеций примерно в два раза по амплитуде и времени установления стационарного режима. Для генератора релаксационных колебаний численные решения отличаются не только по амплитуде, но и по характеру колебаний: при использовании метода Гира напряжение на выходе имеет вид периодической последовательности импульсов, а при использовании метода трапеций периодичность импульсов нарушается, между импульсами наблюдаются осцилляции и выбросы.

В рассмотренных выше примерах количественная оценка точности полученных результатов невозможна, так как аналитические решения уравнений соответствующих автогенераторов неизвестны. Для проверки достоверности полученных результатов численного анализа необходимо уменьшать предельно допустимую относительную погрешность решения *RELTOL* в настройках SPICE-симулятора.

Для генератора гармонических колебаний при уменьшении *RELTOL* в 10 и 100 раз по сравнению со значением, установленным «по умолчанию» численное решение, полученное методом Гира, приближается к решению, полученному методом трапеций, в то же время изменения вида решения для метода трапеций при уменьшении *RELTOL* практически незаметны. Для генератора релаксационных колебаний при уменьшении *RELTOL* в 10 и 100 раз по сравнению со значением, установленным «по умолчанию», наблюдается обратная ситуация – численное решение, полученное методом трапеций, приближается к решению, полученному методом Гира, в то время как изменения вида решения для метода Гира при уменьшении *RELTOL* практически незаметны.

Полученные выше результаты моделирования классических автогенераторов показывают, что для численного анализа генератора гармонических колебаний, описывающегося осциллирующей системой ОДУ, наиболее эффективен метод трапеций, а для численного анализа генератора релаксационных колебаний, описывающегося жесткой системой ОДУ, – метод Гира. К сожалению, достоверная количественная оценка точности полученных выше результатов численного анализа автогенераторов невозможна, поэтому далее рассматривается модель автоколебательной цепи, для которой известно аналитическое выражение для выходного напряжения.

2. Обобщенная математическая модель автоколебательной цепи. Обобщенная математическая модель автоколебательной цепи может быть получена на основании простейшей схемы замещения автогенератора, показанной на рис. 4.

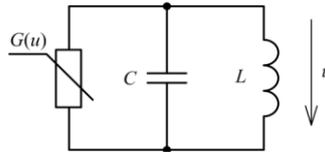


Рис. 4. Схема замещения автогенератора

Схема на рис. 4 включает в себя линейные емкость C и индуктивность L , а также нелинейный резистивный элемент, дифференциальная проводимость которого $G(u)$ имеет как положительные, так и отрицательные значения.

Математическая модель автоколебательной цепи, представленной на рис. 4, имеет вид ОДУ второго порядка [14]:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{1}{C} \frac{df(u)}{du} \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = 0, \quad (1)$$

где u – напряжение на выходе автогенератора; t – время; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансная частота LC -контура; $f(u)$ – ВАХ нелинейного резистивного элемента.

Аналитическое решение уравнения (1) может быть получено при использовании кубической или кусочно-линейной аппроксимации функции $f(u)$.

При использовании кубической аппроксимации уравнение (1) также называют уравнением Ван-дер-Поля [15]. Аналитическое решение уравнения Ван-дер-Поля требует значительных вычислительных затрат, особенно в режиме релаксационных колебаний [8]. Кроме того, кубическая аппроксимация в большинстве случаев не позволяет описать ВАХ нелинейного элемента с достаточной точностью.

В данной работе предлагается использовать кусочно-линейную аппроксимацию ВАХ нелинейного элемента, которая описывается следующим выражением [16]:

$$f(u) = \begin{cases} G_1(u + 2U_0), & u < -U_0; \\ -G_0 u, & -U_0 \leq u \leq U_0; \\ G_1(u - 2U_0), & u > U_0, \end{cases} \quad (2)$$

где G_0 и G_1 – модули дифференциальной проводимости нелинейного элемента при $df/du < 0$ и $df/du > 0$ соответственно; $\pm U_0$ – значения напряжения, при которых df/du меняет знак на противоположный.

Методика получения аналитического решения уравнения (1) при использовании кусочно-линейной аппроксимации ВАХ нелинейного элемента в установившемся режиме представлена работе [9]. Вид аналитического решения уравнения (1) будет зависеть от отношений характеристической проводимости LC -контура $\sigma = \sqrt{C/L}$ и модулей дифференциальной проводимости:

$$q = \sigma / G_0; \quad Q = \sigma / G_1.$$

В случае $q > 1/2$ и $Q > 1/2$ в рассматриваемой цепи имеет место режим колебаний близких по форме к гармоническим и установившееся аналитическое решение уравнения (1) на интервале времени $0 \leq t \leq T/2$ будет описываться квазигармоническими функциями:

$$u(t) = \begin{cases} A_0 e^{\delta_0 t} \cos(\omega_{св0} t + \psi_0), & 0 \leq t \leq t_0; \\ A_1 e^{-\delta_1 t} \cos(\omega_{св1} t + \psi_1), & t_0 < t \leq T/2, \end{cases} \quad (3)$$

где $\omega_{св0,1} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta_{0,1}^2}$; $\delta_0 = G_0/2C$; $\delta_1 = G_1/2C$; A_0, A_1, ψ_0, ψ_1 – постоянные интегрирования; t_0 – момент времени, в который дифференциальная проводимость нелинейного элемента меняет знак; T – период колебаний.

В случае $q < 1/2$ и $Q < 1/2$ в рассматриваемой цепи имеет место режим релаксационных колебаний и установившееся аналитическое решение уравнения (1) на интервале времени $0 \leq t \leq T/2$ описывается суммой двух экспоненциальных функций:

$$u(t) = \begin{cases} a_1 e^{t/\tau_1} + a_2 e^{t/\tau_2}, & 0 \leq t \leq t_0; \\ a_3 e^{-t/\tau_3} + a_4 e^{-t/\tau_4}, & t_0 < t \leq T/2, \end{cases} \quad (4)$$

где $\tau_{1,2} = (\delta_0 \pm \sqrt{\delta_0^2 - \omega_0^2})^{-1}$ и $\tau_{3,4} = |-\delta_1 \pm \sqrt{\delta_1^2 - \omega_0^2}|^{-1}$ – постоянные времени автогенератора; a_1, a_2, a_3, a_4 – постоянные интегрирования.

Следует отметить, что при $q > 1/2$ и $Q < 1/2$ установившееся аналитическое решение уравнения (1) будет содержать как квазигармоническую составляющую, так и экспоненциальную, поэтому далее такой режим работы автогенератора будем называть «смешанным»:

$$u(t) = \begin{cases} A_0 e^{\delta_0 t} \cos(\omega_{св0} t + \psi_0), & 0 \leq t \leq t_0; \\ a_3 e^{-t/\tau_3} + a_4 e^{-t/\tau_4}, & t_0 < t \leq T/2. \end{cases} \quad (5)$$

Поскольку ВАХ нелинейного элемента является нечетной функцией аналитическое решение на второй половине периода $T/2 \leq t \leq T$ определяется следующим образом: $u(t) = -u(t - T/2)$.

Установившееся аналитическое решение в произвольный момент времени определяется на основании решения полученного на интервале времени $0 \leq t \leq T$ из условия периодичности: $u(t) = u(t \pm nT)$, где $n = 0, 1, 2, \dots$

Количественную оценку точности полученных численных решений удобно проводить на основании относительных погрешностей расчета основных параметров выходного напряжения, которыми являются амплитуда и период колебаний. Без потери общности полученных результатов далее будем полагать $L = 1$ Гн, $C = 1$ Ф. Данные параметры цепи определяют период колебаний на выходе автогенератора и соответственно время анализа цепи, но для оценки эффективности численного метода имеет значение отношение времени анализа t_a к временному шагу решения h , а не абсолютные значения указанных величин.

Параметры аналитического решения, в соответствии с методикой приведенной в работе [9], определяются с точностью до последнего знака разрядной сетки компьютера. Ниже представлены параметры аналитических решений, полученные для различных режимов работы автогенератора:

- ◆ режим гармонических колебаний $q = Q = 100$

$$A_m = 2,475416990116814 \text{ В}, T = 6,283212578195301 \text{ с};$$

- ◆ режим релаксационных колебаний $q = 0,25, Q = 0,01$

$$A_m = 1,084334602144661 \text{ В}, T = 18,16115240463717 \text{ с};$$

- ♦ «смешанный» режим работы $q = 10$, $Q=0,005$

$$A_m = 1,002862707954253 \text{ В}, T = 6,379517383846021 \text{ с.}$$

3. Универсальная модель автоколебательной цепи для SPICE-симуляторов. Универсальная схемная модель автоколебательной цепи, позволяющая проводить численный анализ физических процессов в различных режимах работы с помощью SPICE-симуляторов, может быть построена на основе схемы замещения автогенератора, показанной на рис. 4.

В качестве нелинейной проводимости в SPICE-симуляторах, как правило, используется источник тока, управляемый напряжением (ИТУН). В пакете NI Multisim отсутствует модель ИТУН с кусочно-линейной характеристикой, поэтому для реализации указанного источника в данной работе предлагается использовать источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН) с кусочно-линейной передаточной характеристикой (Voltage-Controlled Piecewise Linear Source – PWL) совместно с линейным источником тока, управляемым напряжением (Voltage-Controlled Current Source), как показано на рис. 5. Полагая, что передаточная проводимость линейного ИТУН равна 1 См (1 Mho) нетрудно показать, что ток i на его выходе будет определяться кусочно-линейной функцией, численно равной характеристике ИНУН, которую, в свою очередь можно представить в виде функции (2), таким образом $i = f(u)$.

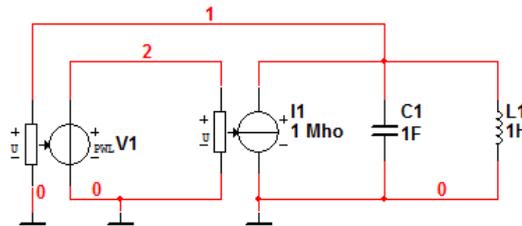


Рис. 5. Универсальная схемная модель автогенератора для SPICE-симуляторов

На рис. 6–8 приведены временные диаграммы напряжений, полученные в симуляторе NI Multisim методами трапеций и Гира для различных режимов работы универсальной модели автогенератора при выбранных «по умолчанию» настройках временного шага и точности решения. Для уменьшения влияния переходных процессов начальное значение выходного напряжения полагалось равным точному значению амплитуды колебаний, полученной для соответствующего режима работы.

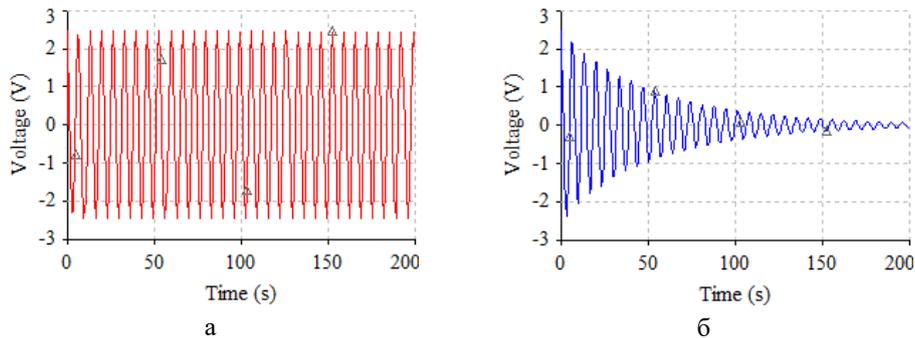


Рис. 6. Временные диаграммы напряжения на выходе универсальной модели автогенератора в режиме гармонических колебаний, полученные методами трапеций (а) и Гира (б)

Результаты, представленные на рис. 6 и 7, подтверждают недостатки методов трапеций и Гира, которые были выявлены ранее при численном анализе классических автогенераторов. В частности, численное решение, полученное методом Гира для случая гармонических колебаний, и численное решение, полученное методом трапеций для случая релаксационных колебаний, качественно не соответствуют реальным физическим процессам.

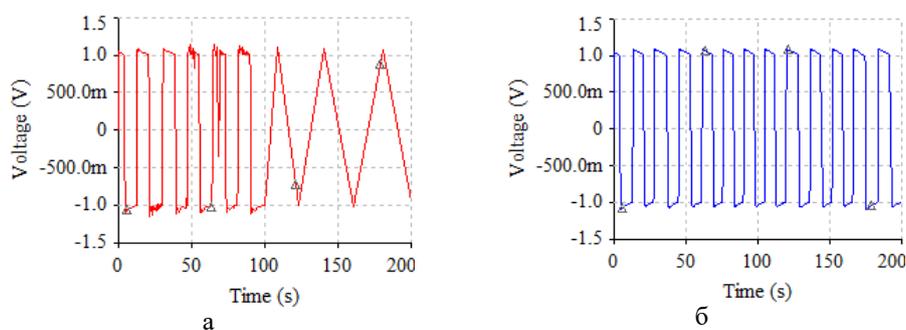


Рис. 7. Временные диаграммы напряжения на выходе универсальной модели автогенератора в режиме релаксационных колебаний, полученные методами трапеций (а) и Гира (б)

В «смешанном» режиме работы, при котором модель автогенератора является осциллирующей и жесткой одновременно, полученные численные решения как для метода трапеций, так и для метода Гира (см. рис. 8) существенно отличаются от аналитического решения, показанного на рис. 9, как по амплитуде и периоду колебаний, так и по характеру изменения физических процессов.

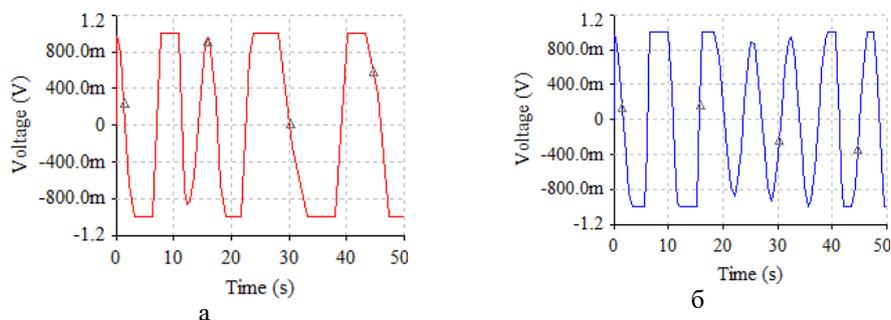


Рис. 8. Временные диаграммы напряжения на выходе универсальной модели автогенератора в «смешанном» режиме, полученные методами трапеций (а) и Гира (б)

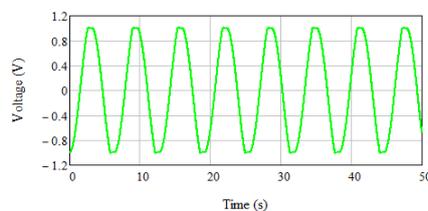


Рис. 9. Временная диаграмма аналитического решения уравнения автогенератора в «смешанном» режиме работы

4. Количественная оценка точности методов численного анализа переходных процессов. Для количественной оценки точности численных методов существуют различные способы: анализ локальной, глобальной и текущей погрешностей; определение погрешности в особых точках решения; определение погрешности расчета основных параметров физического процесса [17–20].

В данной работе удобно использовать последний способ, поскольку аналитическое решение уравнения (1) позволяет определить параметры генерируемых колебаний в установившемся режиме работы с точностью до последней значащей цифры, кроме того, данный способ имеет практическую направленность для задач разработки автоколебательных систем.

Рассмотрим относительную погрешность оценки амплитуды генерируемых колебаний:

$$\varepsilon_A = |A_{mk} - A_{m0}| / A_{m0}, \quad (6)$$

где A_{mk} – оценка амплитуды генерируемого колебания, полученная в результате численного анализа; A_{m0} – точное значение амплитуды.

На рис. 10 приведены относительные погрешности расчета амплитуды колебаний в универсальной модели автогенератора, полученные для методов трапеций (Tr) и Гира (Gear) в различных режимах работы и при различных значениях RELTOL.

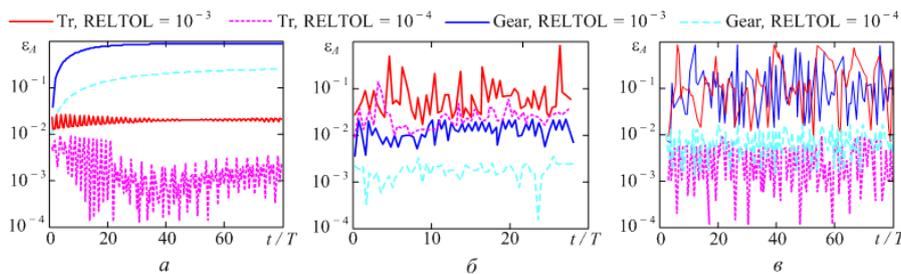


Рис. 10. Относительные погрешности расчета амплитуды колебаний для универсальной модели автогенератора методами Tr и Gear в режиме гармонических колебаний (а), в режиме релаксационных колебаний (б) и в «смешанном» режиме (в)

Из рис. 10 видно, что максимальная относительная погрешность расчета амплитуды колебаний $\varepsilon_{A \max}$ существенно зависит от выбора численного метода и режима работы автогенератора:

- ♦ в режиме гармонических колебаний $\varepsilon_{A \max}$ для метода трапеций не превышает 3%, а для метода Гира может достигать 100 %;
- ♦ в режиме релаксационных колебаний $\varepsilon_{A \max}$ для метода трапеций – до 100%, для метода Гира – не более 3%;
- ♦ в «смешанном» режиме работы $\varepsilon_{A \max}$ для метода трапеций и для метода Гира может достигать 100%.

Заключение. В работе представлена универсальная схемная модель автоколебательной цепи, для которой получено установившееся аналитическое решение и определены его основные параметры с точностью до последнего знака разрядной сетки компьютера.

Представленная модель позволяет как качественно, так и количественно оценить точность методов численного анализа переходных процессов в SPICE-симуляторах в различных режимах работы – в режиме гармонических колебаний, в

режиме релаксационных колебаний, а также в «смешанном» режиме, при котором отклик цепи содержит как экспоненциальные составляющие с различной скоростью изменения, так и квазигармонические составляющие.

Полученные результаты подтверждают высокую точность метода трапеций в режиме гармонических колебаний, а метода Гира – в режиме релаксационных колебаний. Относительные погрешности определения амплитуды колебаний с помощью данных методов для соответствующих им режимов работы не превышают 3%. В то же время, в «смешанном» режиме работы относительные погрешности определения амплитуды колебаний для обоих методов могут достигать 100%, что подтверждает необходимость применения дополнительных опций или разработки специальных методов численного анализа переходных процессов для SPICE-симуляторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жук Д.М., Кожевников Д.Ю., Маничев В.Б. Проблемы разработки математического ядра для программ моделирования динамики технических систем // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2020. – № 4. – С. 31-38.
2. Bernardini A., Maffezzoni P., Sarti A. Linear Multistep Discretization Methods with Variable Step-Size in Nonlinear Wave Digital Structures for Virtual Analog Modeling // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. – 2019. – Vol. 27, No. 11. – P. 1763-1776.
3. Pilipenko A.M., Biryukov V.N. Development and Testing of High Accuracy Hybrid Methods for Time-Domain Simulation of Electronic Circuits and Systems // Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). – 2017. – URL: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110124>.
4. Maffezzoni P., Codecasa L., D'Amore D. Time-domain simulation of nonlinear circuits through implicit Runge–Kutta methods // IEEE Transactions on Circuits Systems – I: Regular Papers. – 2007. – Vol. 54, No. 2. – P. 391-400.
5. Hairer E. Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems – 2nd rev. ed. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. – 614 p.
6. Ascher U.M. Computer Methods for Ordinary Equations and Differential-Algebraic Equations – Philadelphia, PA: SIAM, 1998. – 332 p.
7. Butcher J.C. Numerical methods for ordinary differential equations. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, 2008. – 463 p.
8. Гужев Д.С., Калиткин Н.Н. Уравнение Бюргерса – тест для численных методов // Математическое моделирование. – 1995. – Т. 7, № 4. – С. 99-127.
9. Пилипенко А.М., Бирюков В.Н. Исследование эффективности современных численных методов при анализе автоколебательных цепей // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 8. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug13/9/text.html>.
10. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие для студ. вузов. – 5-е изд., испр. – Москва: Дрофа, 2006. – 717 с.
11. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
12. NI Circuit Design Suite. Getting Started with NI Circuit Design Suite. – National Instruments Corporation, August 2010. – 198 p.
13. Бирюков В.Н. Руководство к лабораторным работам по курсу «Основы автоматизированного анализа цепей». – Вып. 3 – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. – 27 с.
14. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2002. – 292 с.
15. Hairer E., Norsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems. – 2nd rev. ed. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993. – 528 p.
16. Pilipenko A.M., Biryukov V.N., Fadeeva A.B. Methods of Testing Time-Domain Simulators in EDA Packages // Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). – 2016. – P. 172-175.
17. Modern Numerical Methods for Ordinary Differential Equations / ed. by G. Hall, J.M. Watt – Clarendon Press, Oxford, 1976. – 336 p.

18. Maffezzoni P.A. Versatile Time-Domain Approach to Simulate Oscillators in RF Circuits // IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers. – 2009. – Vol. 56, No. 3. – P. 594-603.
19. Бирюков В.Н., Пилипенко А.М. Анализ погрешности численного моделирования автогенераторов во временной области // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 11 (160). – С. 119-127.
20. Biryukov V.N., Pilipenko A.M. An Approach to Estimate the Error of Oscillator Time-Domain Analysis // Proceedings of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS). – 2013. – P. 223-226.

REFERENCES

1. Zhuk D.M., Kozhevnikov D.Yu., Manichev V.B. Problemy razrabotki matematicheskogo yadra dlya programm modelirovaniya dinamiki tekhnicheskikh sistem [Problems of developing a mathematical core for modeling the dynamics of technical systems], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* [Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development], 2020, No 4, pp. 31-38.
2. Bernardini A., Maffezzoni P., Sarti A. Linear Multistep Discretization Methods with Variable Step-Size in Nonlinear Wave Digital Structures for Virtual Analog Modeling, *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2019, Vol. 27, No. 11, pp. 1763-1776.
3. Pilipenko A.M., Biryukov V.N. Development and Testing of High Accuracy Hybrid Methods for Time-Domain Simulation of Electronic Circuits and Systems, *Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110124>.
4. Maffezzoni P., Codecasa L., D'Amore D. Time-domain simulation of nonlinear circuits through implicit Runge–Kutta methods, *IEEE Transactions on Circuits Systems – I: Regular Papers*, 2007, Vol. 54, No. 2, pp. 391-400.
5. Hairer E. Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems. 2nd rev. ed., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996, 614 p.
6. Ascher U.M. Computer Methods for Ordinary Equations and Differential-Algebraic Equations, Philadelphia, PA: SIAM, 1998, 332 p.
7. Butcher J.C. Numerical methods for ordinary differential equations. 2nd ed., John Wiley & Sons, 2008, 463 p.
8. Guzhev D.S., Kalitkin N.N. Uravnenie Biurgersa – test dlia chislennykh metodov [Burgers equation is a test for numerical methods], *Matematicheskoe modelirovanie* [Russian Journal of Mathematical Modeling], 1995, Vol. 7, No. 4, pp. 99-127.
9. Pilipenko A.M., Biryukov V.N. Investigation of modern numerical analysis methods of self-oscillatory circuits efficiency, *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics], 2013, No. 8. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/aug13/9/text-engl.html>.
10. Gonorovskiy I.S. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: ucheb. posobie dlya stud. vuzov [Radio engineering circuits and signals: textbook manual for university students], 5th ed., rev., Moscow: Drofa, 2006, 717 p.
11. Manaev E.I. Osnovy radioelektroniki [Fundamentals of radio electronics], Moscow: Radio i sviaz, 1990, 512 p.
12. NI Circuit Design Suite. Getting Started with NI Circuit Design Suite, National Instruments Corporation, August 2010, 198 p.
13. Biriukov V.N. Rukovodstvo k laboratornym rabotam po kursu «Osnovy avtomatizirovannogo analiza tsepei» [Guide to laboratory works on the course «Fundamentals of computer-aided circuit analysis»], Issue 3, Taganrog: Izd-vo TRTU, 2001, 27 p.
14. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Ryskin N.M. Nelineinye kolebaniya: ucheb. posobie dlya vuzov [Nonlinear vibrations: textbook manual for universities], Moscow: Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 2002, 292 p.
15. Hairer E., Norsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems, 2nd rev. ed., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993, 528 p.
16. Pilipenko A.M. Biryukov V.N., Fadeeva A.B. Methods of Testing Time-Domain Simulators in EDA Packages, *Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2016, pp. 172-175.
17. Modern Numerical Methods for Ordinary Differential Equations, ed. by G. Hall, J.M. Watt, Clarendon Press, Oxford, 1976, 336 p.

18. Maffezzoni P.A. Versatile Time-Domain Approach to Simulate Oscillators in RF Circuits, *IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers*, 2009, Vol. 56, No. 3, pp. 594-603.
19. Biryukov V.N., Pilipenko A.M. Analiz pogreshnosti chislennogo modelirovaniya avtogeneratorov vo vremennoy oblasti [Analysis of the error of oscillator's numerical simulation in the time domain], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 11 (160), pp. 119-127.
20. Biryukov V.N., Pilipenko A.M. An Approach to Estimate the Error of Oscillator Time-Domain Analysis, *Proceedings of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2013, pp. 223-226.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.В. Демьяненко.

Пилипенко Александр Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: ampilipenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; зав. кафедрой; к.т.н.

Агабекян Артём Вячеславович – e-mail: artyom.agabekyan@mail.ru; кафедра теоретических основ радиотехники; студент.

Pilipenko Alexandr Mikhaylovich – Southern Federal University; e-mail: ampilipenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; cand. of eng. sc.; head of the department.

Agabekyan Artyom Vyacheslavovich – e-mail: artyom.agabekyan@mail.ru; the department of fundamentals of radio engineering; student.

УДК 303.717

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-254-262

А. Аль-Шамки, В.В. Шадрина, В.Г. Галалу

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

Одной из самых распространенных технологических операций является сварка отдельных деталей и блоков. Сварка находит широкое применение в судостроении, авиационной, оборонной и химической промышленности, при строительстве нефте- и газопроводов. При этом к качеству сварного шва предъявляются весьма жесткие требования по прочности, отсутствию пустот и каверн, работоспособности при высоких давлениях (до 100 кг/см²) и в широком диапазоне температур ($\pm 50^\circ\text{C}$). Наиболее полно этим требованиям соответствует плазменная (аргоновая) сварка. Выполнен краткий аналитический обзор по теме исследования. Показано, что перспективным направлением развития систем управления плазменной сваркой является применение гибридных регуляторов, созданных на основе классических методов автоматического управления и нечетком регулировании, формализующем усредненные знания экспертов. Нечеткий компонент (знание экспертов) должен быть доступен для быстрого и простого ввода в регулятор. Была разработана структурная схема и модель одного канала гибридного регулятора в среде Matlab Simulink. Моделировался канал управления силой тока с использованием нечеткого регулятора из библиотеки Fuzzy Logic, с применением алгоритма нечеткого вывода Мамдани. Задавалось 19 вариантов лингвистических и нечетких переменных, была получена поверхность функции принадлежности переменных. Следует отметить возможность быстрого ввода лингвистических оценок экспертов в память гибридного регулятора. Анализировалось поведение моделей гибридного регулятора и стандартных ПИ и ПИД-регуляторов при единичном ступенчатом воздействии. Гибридный регулятор обеспечивает существенно лучшие показатели качества (в 2,5-3 раза), чем стандартные регуляторы. Гибридный регулятор выходит на установившийся режим через 6с, ПИД-регулятор – через 13с, ПИ-регулятор – через 15с, причем стандартные регуляторы имеют