

атомами фтора, азота или кислорода БОВ, что говорит о меньшей устойчивости таких АК, так как чем больше глубина минимума энергии адсорбции, тем меньше энергии тратится на образование связи сорбат – сорбент, тем прочнее идет образование АК.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что представленные варианты взаимодействия между молекулами зарина, зомана, табуна и компонентами клеточной мембраны будут наиболее характерными.

Таким образом, молекулы этих боевых отравляющих веществ препятствуют дальнейшему взаимодействию между компонентами клеточной мембраны с другими молекулами, что говорит о блокировке жизненных процессов в этих точках клеточной мембраны.

На основе результатов проведенных расчетов можно предсказать основные реакционные центры биологической мембраны при воздействии на неё зарин, зоманом и табуном. Эта информация является необходимым материалом для подбора противоядия к этим веществам и раскрывает основной механизм адсорбции исследуемых БОВ на клеточную мембрану.

Список литературы

1. Алыков Н. М. Математическое моделирование этапов поиска антидотов к сероводороду / Н. М. Алыков, Л. И. Жарких // Экологические системы и приборы. – 2008. – № 4. – С. 43–47.
2. Жарких Л. И. Квантово-химическое кластерное моделирование процесса адсорбции сероводорода на поверхности белковой мембраны / Л. И. Жарких // Вестник МГОУ. – 2006. – № 9. – С. 56–59. – (Серия химическая).
3. Schmidt M. W. The General Atomic and Molecular Electronic Structure System / M. W. Schmidt, K. K. Baldrige, J. A. Boatz et al. // J. Comput. Chem. – 1993. – Vol. 14. – P. 1347–1363.

References

1. Alykov N. M., Zharkikh L. I. Matematicheskoe modelirovanie etapov poiska antidotov k serovodorodu [Mathematical modeling of the phases of searching for antidotes to hydrogen sulphide]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Equipment], 2008, no. 4, pp. 43–47.
2. Zharkikh L.I. Kvantovo-khimicheskoe klasternoe modelirovanie protsesssa adsorbtsii serovodoroda na poverkhnosti belkovoy membrany [Quantum-chemical cluster modeling of adsorption of hydrogen sulphide on the surface of protein membrane]. *Vestnik MGOU. Seriya khimicheskaya* [Bulletin of the Moscow State Regional University. Chemical Series], 2006, no. 9, pp. 56–59.
3. Schmidt M. W., Baldrige K. K., Boatz J. A. et al. The General Atomic and Molecular Electronic Structure System. *J. Comput. Chem.*, 1993, vol. 14, pp. 1347–1363.

УДК 681.511.4

АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА В СРЕДЕ МАТЛАВ

Шапкарин Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Российская Федерация, г. Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: prosandeev@bk.ru, kivan.mail@gmail.com

Просандеев Антон Валерьевич, старший преподаватель, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Российская Федерация, г. Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: prosandeev@bk.ru, kivan.mail@gmail.com

Кулло Иван Геннадьевич, старший преподаватель, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Российская Федерация, г. Москва, Каширское шоссе, 31, e-mail: prosandeev@bk.ru, kivan.mail@gmail.com

При предварительных исследованиях систем автоматического управления на этапах эскизного проектирования при неполной информации об объекте управления обычно используют упрощенную линейную модель объекта с постоянными параметрами. На данном этапе в полной мере хватает возможностей встроенных функций пакета Control System Toolbox системы MATLAB. Но на последующих этапах проектирования модель уточняется, и в большинстве случаев выявляются нелинейные элементы, которые не позволяют использовать этот инструмент, предназначенный для анализа и проектирования линейных систем. В таком случае для исследования нелинейных систем остается использовать методы, связанные с моделированием. Однако за счет гармонической линеаризации нелинейных характеристик удается применить средства MATLAB. В данной статье рассматривается методика анализа нелинейных динамических систем методом гармонического баланса на основе пакета Control System Toolbox.

Ключевые слова: метод гармонического баланса, нелинейные динамические системы, анализ устойчивости, автоколебания, MATLAB

ANALYSIS OF NONLINEAR AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS USING THE MATLAB HARMONIC BALANCE APPROACH

Shapkarin Aleksey V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, National Research Nuclear University “MEPhI”, 31 Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russian Federation, e-mail: prosandeev@bk.ru, kivan.mail@gmail.com

Prosandeev Anton V., Senior Lecturer, National Research Nuclear University “MEPhI”, 31 Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russian Federation, e-mail: prosandeev@bk.ru, kivan.mail@gmail.com

Kullo Ivan G., Senior Lecturer, National Research Nuclear University “MEPhI”, 31 Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russian Federation, e-mail: prosandeev@bk.ru, kivan.mail@gmail.com

The article provides details on a preliminary study of automatic control systems, using incomplete information (with constant parameters) about an object as well as a simplified linear model of that object. At this stage, the critique lists the capabilities of the built-in functions included in the MATLAB Control System Toolbox (CST) package. (MATLAB is a high-performance language for technical computing, which integrates computation, visualization, and programming in an easy-to-use environment). Subsequent design stages specify a model, which can be used, in most cases, to detect nonlinear components. But the latter capability implies that this tool is not intended for the analysis and design stages of linear systems. Consequently, to fill this 'knowledge shortfall,' the non-linear system-related study relies on modeling-oriented approaches. For this task, the document states that harmonic linearization of nonlinear characteristics makes it possible to apply MATLAB tools. In conclusion, the blueprint adopts the perspective of the harmonic balance approach in analyzing the nonlinear dynamic systems' CST package.

Keywords: harmonic balance model, nonlinear dynamic systems, stability analysis, self-oscillations, MATLAB

Рассмотрим систему, в которой можно выделить нелинейную характеристику типа «трехпозиционное реле с гистерезисом» и линейную часть, состоящую из трех апериодических звеньев (рис. 1).

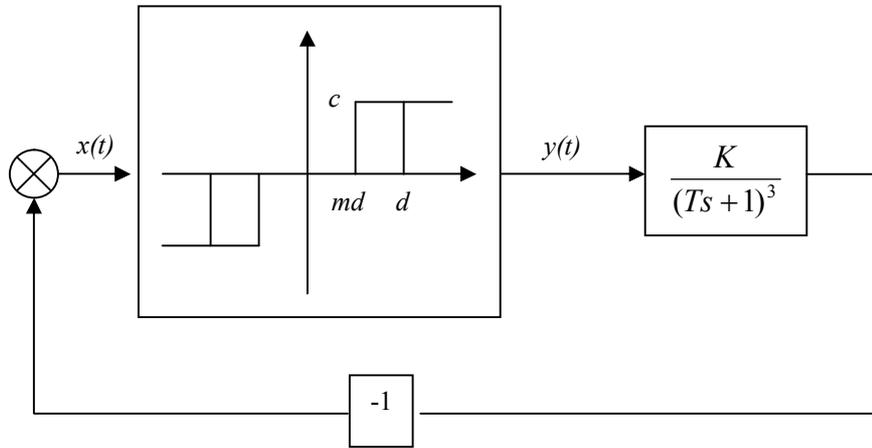


Рис. 1. Пример нелинейной динамической системы

При исследовании системы методом гармонического баланса предполагается, что в ней присутствует периодическое решение $x(t) = A \sin \omega t$.

Границы области устойчивости получаются в результате отыскания совокупности решений уравнения Гольдфарба при вариации какого-либо параметра. Средства MATLAB позволяют получить решение как с помощью построения на комплексной плоскости годографов линейной части $W(j\omega)$ и нелинейного элемента $-\frac{1}{J(A)}$, так и путем построения логарифмических амплитудной и фазовой частотных характеристик (ЛАФЧХ) линейной части и шаблона для нелинейности.

Обобщенный комплексный коэффициент усиления для рассматриваемой нелинейной характеристики $J(A)$ будет равен $J(A) = a(A) + jb(A)$, где $a(A)$ и $b(A)$ – коэффициенты гармонической линеаризации:

$$a(A) = \frac{2c}{\pi A} \left(\sqrt{1 - \frac{d^2}{A^2}} + \sqrt{1 - \frac{m^2 d^2}{A^2}} \right), \quad (1)$$

$$b(A) = \frac{2cd}{\pi A^2} (m - 1).$$

Зададимся следующими значениями параметров системы:

$$c = 2, d = 2, m = 0.9, T = 1$$

и исследуем поведение системы в зависимости от коэффициента усиления K линейной части.

Среда MATLAB с использованием пакета *Control System Toolbox* позволяет легко совместить на одной комплексной плоскости годографы линейной части $W(j\omega)$ и нелинейно-

го элемента $-\frac{1}{J(A)}$ (рис. 2).

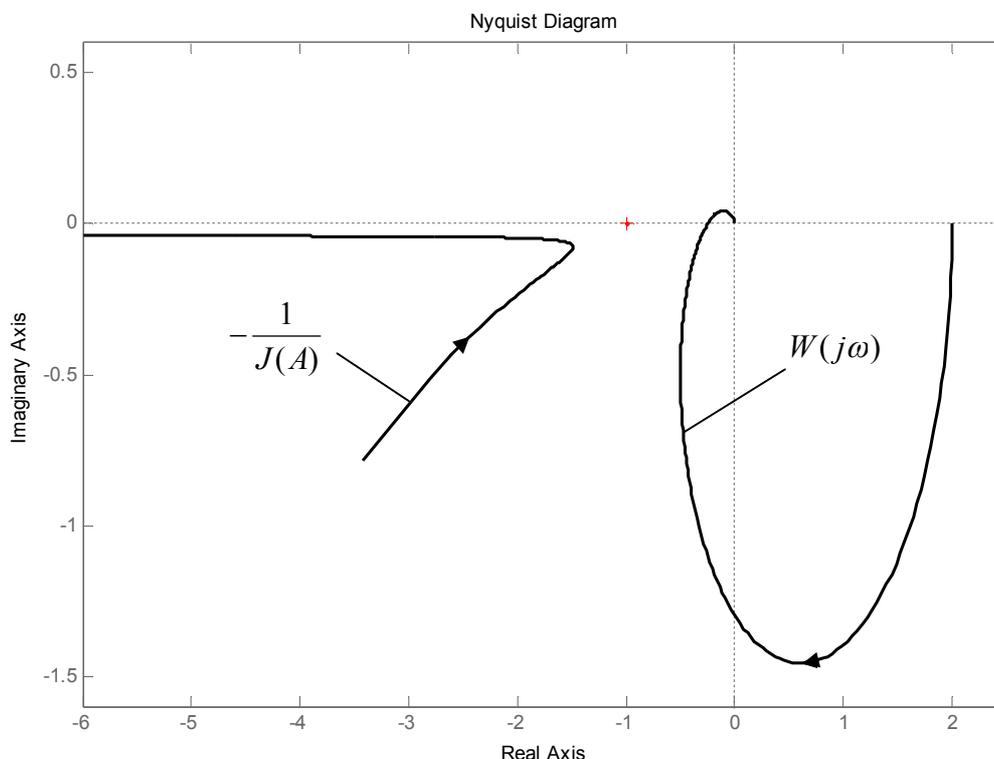


Рис. 2. Годографы линейной части и нелинейного элемента рассматриваемой системы (коэффициент усиления $K = 2$)

Для этого необходимо выполнить следующий набор команд в среде MATLAB:
 $c = 2$; $d = 2$; $m = 0.9$; $T = 1$; %Задание параметров системы
 $K=2$; %Некоторое начальное выбранное значение коэффициента усиления линейной части

```
W=K*tf([1],[T 1])^3; %Задание линейной части в виде передаточной функции
A=d:0.01:20; %Диапазон значений амплитуды с шагом 0.01 для расчета коэффициентов гармонической линеаризации
a=2*c./(pi*A).*(sqrt(1-d^2./(A.^2))+sqrt(1-m^2*d^2./(A.^2))); %Расчет коэффициентов гармонической линеаризации
b=2*c*d./(pi*(A.^2))*(m-1);
J=a+1i*b; %Получение обобщенного коэффициента усиления для нелинейной части системы
```

```
plot(real(-1./J),imag(-1./J)); %Построение годографа нелинейной части системы
hold on; %Команда, необходимая для построения годографов в одном окне
w=0:0.01:20; %Диапазон частот для построения годографа линейной части
nyquist(W,w); %Построение годографа линейной части системы
```

Сразу же можно увидеть, что есть некоторый диапазон значений коэффициента усиления K , при котором годографы не имеют пересечений, т.е. уравнение Гольдфарба $W(j\omega) = -\frac{1}{J(A)}$ не имеет решение. Следовательно, в пределах этого диапазона нелинейная система будет устойчивой.

Однако при увеличении коэффициента усиления возникает баланс в двух точках, одна из которых будет соответствовать устойчивым автоколебаниям, другая – неустойчивым (рис. 3). На рисунке показан случай для коэффициента усиления K , равного 15.

Найти параметры автоколебаний (частоту и амплитуду) можно, решая систему уравнений, на которую распадается уравнение Гольдфарба:

$$\begin{cases} H(\omega) = \frac{1}{q(A)}, \\ \Theta(\omega) = -\pi - \mu(A), \end{cases} \quad (2)$$

где $H(\omega)$ и $\Theta(\omega)$ – модуль и фаза для выражения $W(j\omega)$, а $q(A)$ и $\mu(A)$ – соответственно модуль и фаза комплексного коэффициента для нелинейности.

Однако частоту автоколебаний можно сразу легко найти с помощью инструментария среды MATLAB. Для этого достаточно выделить с помощью кнопки мыши точки пересечения годографов (рис. 4).

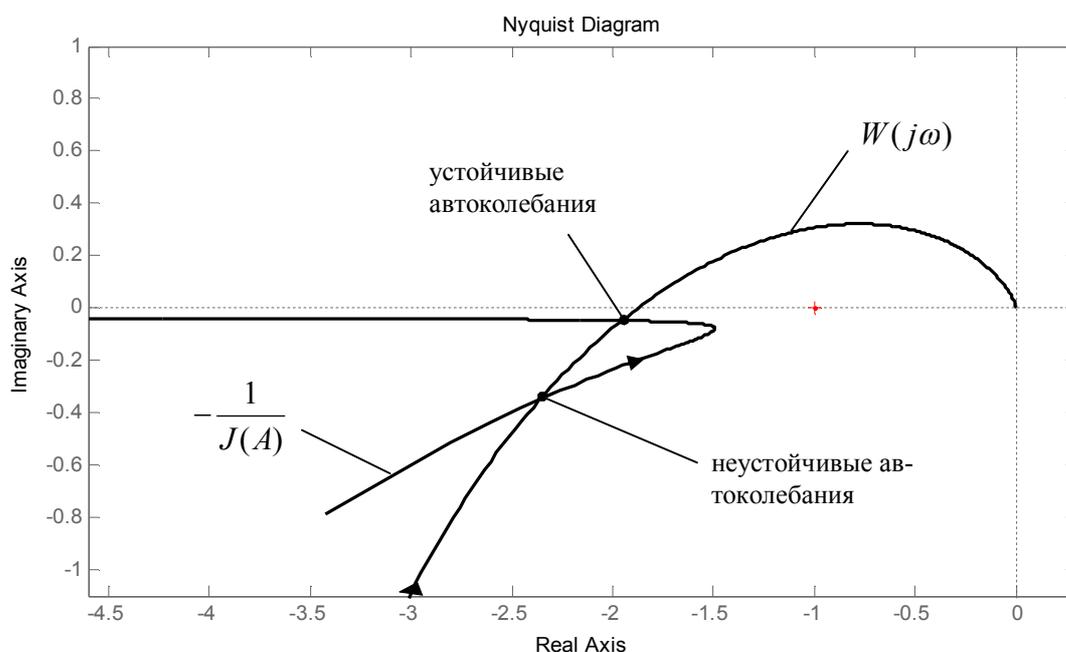


Рис. 3. Пересечение годографов линейной части и нелинейного элемента (коэффициент усиления $K = 15$)

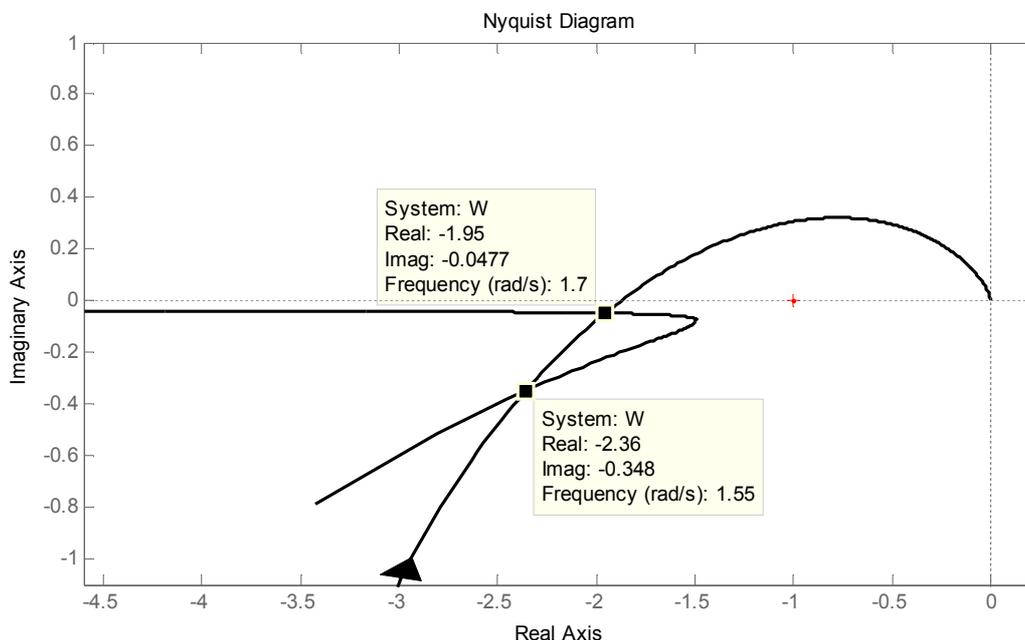


Рис. 4. Определение частоты автоколебаний в рассматриваемой системе

Таким образом, стали известны значения частот для автоколебаний:

$$\omega_{уст} = 1.7 \text{ рад/с},$$

$$\omega_{неуст} = 1.55 \text{ рад/с}.$$

Для отыскания амплитуд автоколебаний можно использовать первое уравнение системы (2), но среда MATLAB позволяет найти решение более простым способом. Поскольку помимо значений частот нам известны также реальные и мнимые части точек пересечения годографов (см. рис. 4), то достаточно построить график зависимости, например, реальной части $-\frac{1}{J(A)}$ от амплитуды A и найти пересечения графика с нужными значениями реальной части (рис. 5). Здесь необходимо лишь учесть, что для точки со значением реальной части -2.36 соответствуют автоколебания с меньшей амплитудой и, наоборот, для точки со значением реальной части -1.95 (рис. 5).

Таким образом, получаем следующие значения амплитуд автоколебаний:

$$A_{уст} = 4.51,$$

$$A_{неуст} = 2.04.$$

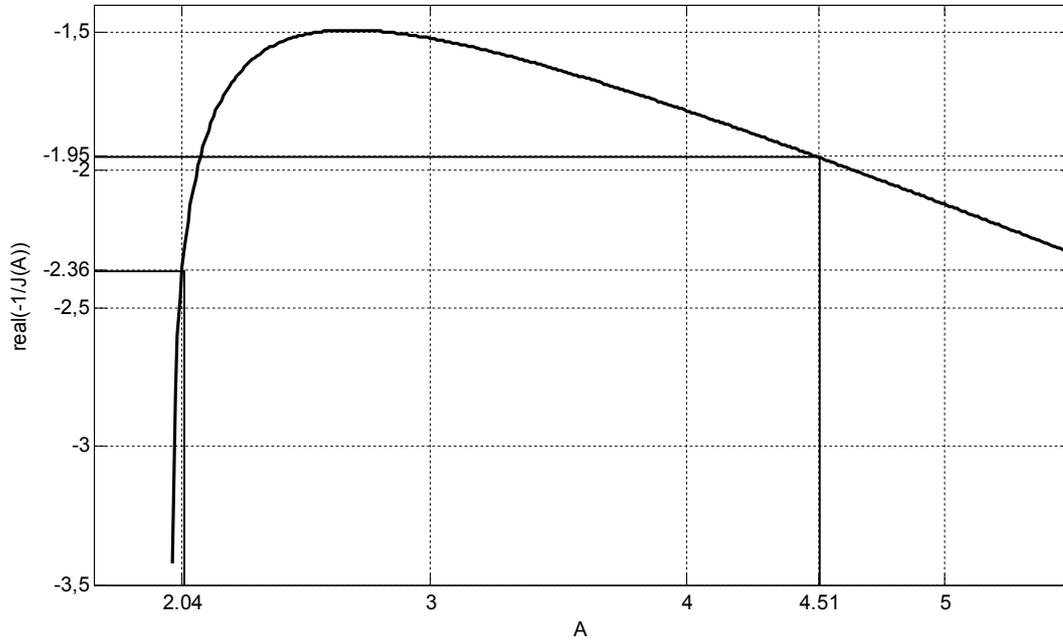


Рис. 5. Определение амплитуд автоколебаний в рассматриваемой системе

Найденные параметры автоколебаний практически можно подтвердить с помощью среды моделирования *Simulink*, входящей в состав системы *MATLAB*. На рис. 6 представлена структурная схема рассматриваемой системы с импульсным входным воздействием, а на рис. 7 – результаты ее моделирования, показывающие устойчивые автоколебания.

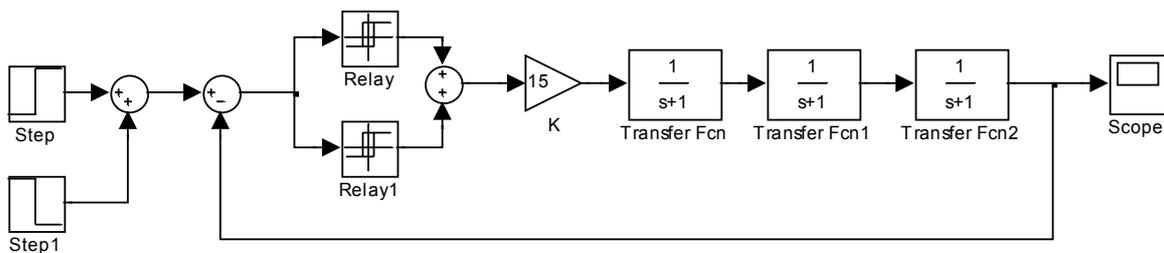


Рис. 6. Структурная схема нелинейной системы для моделирования в среде *Simulink*

Моделирование показало, что эксперимент хорошо сочетается с теоретическим расчетом:

$$A_{\text{эксн.}} = 4.52,$$

$$\omega_{\text{эксн.}} = 1.7.$$

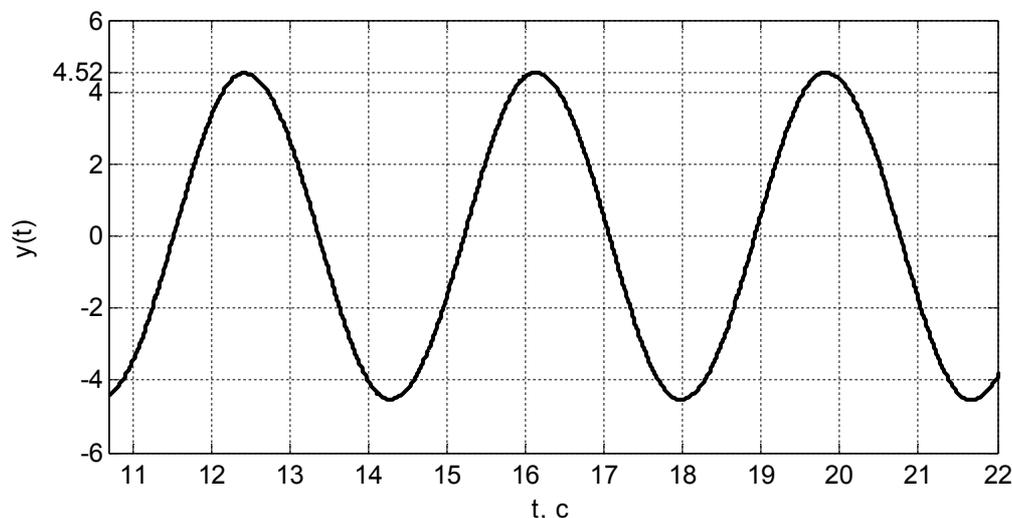


Рис. 7. Устойчивые автоколебания на выходе системы

В заключение стоит отметить, что рассмотренная методика справедлива и для исследования более сложных нелинейных динамических систем, например таких, как системы с несимметричными нелинейностями, что, как известно, при определенных условиях может привести к возникновению смещенных автоколебаний. В отличие от случая с симметричными нелинейностями, здесь необходимо помимо частоты и амплитуды автоколебаний находить и величину смещения их относительно нуля.

Однако и эти более трудные задачи поддаются решению благодаря автоматизации процедуры вычисления в среде MATLAB. А правильность полученных результатов имеем возможность подтвердить, используя систему моделирования SIMULINK.

Список литературы

1. Дэбни Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Дэбни, Т. Харман – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.
2. Кулло И. Г. Анализ нелинейных САУ в среде MATLAB / И. Г. Кулло, А. В. Шапкарин // Научная сессия МИФИ-2008 : сб. науч. тр. : в 15 т. – Москва : МИФИ, 2008. – Т. 8. Автоматика и электроника в атомной технике. Микро- и нанoeлектроника. – С. 39.
3. Медведев В. С. Control system toolbox. MATLAB 5 для студентов / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин ; под общ. ред. канд. техн. наук В. Г. Потемкина. – Москва : ДИАЛОГ-МИФИ, 1999.
4. Теория автоматического управления : в 2 ч. / под ред. А. А. Воронова. – Москва : Высшая школа, 1986. – Ч. 2.

References

1. Debni Dzh., Kharman T. *Simulink 4. Sekrety masterstva* [Simulink 4. Secrets of skill]. Moscow, BINOM. Knowledge Laboratory Publishers, 2003.
2. Kullo I. G., Shapkarin A. V. *Analiz nelineynykh SAU v srede MATLAB* [Analysis of nonlinear automatic control systems in MATLAB]. *Nauchnaya sessiya MIFI-2008: sbornik nauchnykh trudov: v 15 t.* [Scientific Session MEFPhI-2008: Proceedings in 15 vol.]. Moscow, Moscow Engineering Physics Institute Publ., 2008. T. 8. *Avtomatika i elektronika v atomnoy tekhnike. Mikro- i nanoelektronika* [Vol. 8. Automation and electronics in atomic engineering. Micro- and nanoelectronics], p. 39.
3. Medvedev V. S., Potemkin V. G. *Control system toolbox. MATLAB 5 dlya studentov* [Control system toolbox. MATLAB 5 for students] ed. by Candidate of Technical Sciences V. G. Potemkin. Moscow, DIALOG-Moscow Engineering Physics Institute, 1999.
4. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automation control theory]: in 2 parts, ed. by A. A. Voronov. Moscow, Vysshaya shkola, 1986, part 2.