Holatlar fazosining umumlashgan modeli yordamida kuch zanjirlari dinamikasini modellashtirish

Miraziz V. Sagatov[1], Oleksandr A. Sytnik[2]

[1] DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O‘zbekiston; informtgtu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8369-3866
[2] t.f.n., prof., Cherkasi Davlat Texnologik Universiteti, Cherkasi, Ukraina; http://orcid.org/0000-0002-2741-9376

Dolzarbligi: zamonaviy energetikani rivojlantirishning dolzarb muammolaridan biri yuqori samarali energiya qurilmalarining yangi modellarini ishlab chiqish va mavjudlarini modernizatsiya qilishdir. Zamonaviy energetik qurilmalarning rivojlanish jarayoni ularning qo‘llanilish sohasini kengaytirish va murakkablik darajasini oshirishning barqaror tendensiyasi bilan tavsiflanadi. Energetik qurilmalar oddiy analog rostlagichli tizimlardan zamonaviy kompyuterli boshqaruv tizimlarigacha yol bosdi va buning natijasida yangi imkoniyatlar paydo bo’ldi, xususan, boshqaruv algoritmlarining moslashuvchanligi, masofadan boshqarishni ta’minlash va h.k. Bunday qurilmalarning funksionalligi va ishonchliligiga, ularning dinamik xususiyatlarini yaxshilashga, boshqaruv va diagnostika quyi tizimlarini rivojlantirishga, yangi intellektual texnologiyalardan foydalangan holda boshqaruv funksiyalarini kengaytirish va murakkablashtirishga qo‘yiladigan talablar sezilarli darajada oshdi. Ushbu talablarni ta’minlash yo‘llaridan biri energetik qurilmalarning o‘zini va ularning tarkibiy qismlarini matematik va kompyuterli modellashtirish usullari va vositalarini yanada rivojlantirish hamda ularni loyihalash, boshqarish, nazorat va diagnostika jarayonlariga jalb qilish hisoblanadi.
Maqsad: kuch zanjirlarini modellashtirish uchun holatlar fazosining umumlashgan modelidan foydalanishni tahlil qilish va asoslash.
Usullar: matematik va kompyuter modellashtirish usullari va avtomatik boshqarish nazariyasi elementlari.
Natijalar: kuch zanjiri dinamikasini modellashtirish uchun holatlar fazosining umumlashgan modeli usulini qo‘llash modellashtirish tenglamalari sonini kamaytirish va differensial-algebraik tenglamalar to‘plamini yechish uchun yagona algoritmdan foydalanish imkonini beradi. Natijalar ushbu yondashuvning amalga oshirilishi va samaradorligini ko‘rsatdi.
Kalit so‘zlar: energetik qurilmalar, matematik va kompyuter modellashtirish, holatlar fazosining umumlashgan modeli, kuch zanjirlari, differensial-algebraik tenglama.

Моделирование динамики силовых цепей с использованием обобщенной модели пространства состояний

Миразиз В. Сагатов[1], Олександр А. Сытник[2]

[1] DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; informtgtu@mail.ru , https://orcid.org/0000-0001-8369-3866
[2] к.т.н, проф., Черкасский государственный технологический университет, Черкассы 100095, Украина; http://orcid.org/0000-0002-2741-9376

For citation: Sagatov M.V., Sytnik O.A. Modeling the dynamics of power circuits using a generalized state space model. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 4, pp. 276-283.
https://doi.org/10.5281/zenodo.18616880

Received: 04.04.2025
Revised: 18.04.2025
Accepted: 10.07.2025
Published: 27.12.2025

Актуальность: одной из актуальных проблем развития современной энергетики является разработка новых моделей и модернизация существующих энергетических установок высокой эффективности. Процесс развития современных энергетических установок характеризуется устойчивой тенденцией к расширению сферы их применения и повышению уровня сложности. Энергетические установки прошли путь от систем с простыми аналоговыми регуляторами до современных систем с компьютерным управлением и, как следствие, с новыми возможностями, в частности гибкостью алгоритмов управления, обеспечением дистанционного управления и т.д. Существенно возросли требования к функциональности и надежности таких установок, улучшению их динамических характеристик, развитию подсистем управления и диагностики, расширению и усложнению функций управления с использованием новых интеллектуальных технологий. Одним из путей обеспечения этих требований является дальнейшее развитие методов и средств математического и компьютерного моделирования самих энергетических установок и их составных частей, а также их вовлечение в процессы проектирования, управления, контроля и диагностики.
Цель: анализ и обоснование использования обобщенной модели пространства состояний для моделирования силовых цепей.
Методы: математического и компьютерного моделирования и элементы теории автоматического управления.
Результаты: применение метода обобщенной модели пространства состояний для моделирования динамики силовой цепи позволяет сократить количество уравнений моделирования и использовать единый алгоритм для решения набора дифференциально-алгебраических уравнений. Результаты продемонстрировали реализуемость и эффективность данного подхода.

Ключевые слова: энергетические установки, математическое и компьютерное моделирование, обобщенная модель пространства состояний, силовые цепи, дифференциально-алгебраическое уравнение.

Modeling the dynamics of power circuits using a generalized state space model

Miraziz V. Sagatov[1], Oleksandr A. Sytnik[2]

[1] DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan; informtgtu@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-8369-3866
[2] Cand.Sc. in Technology, prof., Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine; http://orcid.org/0000-0002-2741-9376

Relevance: one of the pressing issues in the development of modern energy is the development of new models and the modernization of existing high-efficiency power plants. The evolution of modern power plants is characterized by a steady trend toward expanding their scope of application and increasing complexity. Power plants have evolved from systems with simple analog regulators to modern computer-controlled systems, which, as a result, offer new capabilities, including flexible control algorithms, remote control, and more. Requirements for the functionality and reliability of such plants have increased significantly, improving their dynamic characteristics, developing control and diagnostic subsystems, and expanding and complicating control functions using new intelligent technologies. One way to meet these requirements is the further development of methods and tools for mathematical and computer modeling of power plants themselves and their components, as well as their integration into design, control, monitoring, and diagnostic processes.
Aim: analysis and justification of the use of a generalized state space model for modeling power circuits.
Methods: of mathematical and computer modeling and elements of automatic control theory.
Results: using a generalized state space model to simulate power circuit dynamics reduces the number of modeling equations and uses a single algorithm to solve a set of differential-algebraic equations. The results demonstrated the feasibility and effectiveness of this approach.
Keywords: power plants, mathematical and computer modeling, generalized state space model, power circuits, differential-algebraic equation.

1. Введение (Introduction)

Существенными особенностями современных энергетических установок, наряду с усложнением структур и режимов работы, повышением требований к качеству эксплуатации, являются неоднородность их состава, наличие связей с распределенными параметрами, изменяющимися в процессе эксплуатации, наличие компьютерных средств управления, контроля и диагностики. Характерной особенностью управляемых энергетических установок является многообразие элементов, входящих в их состав. Это, в свою очередь, обычно создает неоднородность математического описания системы. Физическая неоднородность обусловлена наличием различных по физической сущности элементов (механических, электрических, оптических, магнитных и электромагнитных и т. д.). Функциональная неоднородность проявляется в наличии сигналов различного назначения (управляющих, измерительных, дублирующих, вспомогательных и т. д.). Таким образом, современные энергетические установки относятся к классу сложных неоднородных динамических систем. Указанные особенности обуславливают появление новых требований к методам и средствам математического моделирования динамических процессов в энергетических установках, в частности необходимость перехода от распространенного на практике автономного изучения отдельных компонентов, к комплексному исследованию системы в целом с использованием макромоделей, построения моделей по экспериментальным данным, повышения адекватности математических моделей за счет рационального учета распределения параметров соответ-ствующих звеньев, возможности оперативного изменения состава компьютерных моделей с учетом физической и функциональной неоднородности [1-6].

Энергосистемы представляют собой класс жёстких систем, моделирование которых особенно сложно из-за наличия алгебраических и жёстких нелинейностей, таких как импульсные преобразователи, а также из-за значительного разброса их собственных значений. Поэтому численный анализ поведения энергосистем традиционно требовал интенсивного использования компьютерных ресурсов и разработки сложного специализированного программмного обеспечения [7].

Развитие систем управления электроэнергией (СУЭ), включающих в себя разнообразные инструменты анализа, контроля и управления, повысило требования к совершенствованию методов математического моделирования, а также к разработке новых численных методов и программных средств для моделирования энергосистем. Именно поэтому данная статья посвящена обсуждению альтернативного метода построения математических моделей силовых цепей [8-10].

2. Методы и материалы (Methods and materials)

Динамическое поведение силовой цепи описывается набором нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и набором нелинейных алгебраических уравнений следующим образом:

$$dx/dt = f\,(x, V); \tag{1}$$

$$I(x, V) \;=\; Y \cdot V; \tag{2}$$

где x — вектор состояния, f — нелинейная векторная функция, V — вектор комплексных узловых напряжений, Y — матрица узловой проводимости, а I — вектор инжектируемых узловых токов.

Дифференциальные уравнения описывают динамическое поведение элементов системы (трансформаторов, асинхронных двигателей, синхронных машин и их контроллеров, силовой электроники и т. д.), а алгебраические уравнения — уравнения сети и подключение внешних элементов к сети.

Схемы решения можно классифицировать по стратегии решения дифференциальных и алгебраических систем уравнений: переменные или совместные. Схема переменного решения основана на теории решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, теории решения алгебраических уравнений и теории метода пространства состояний. Схема одновременного решения основана на теории решения систем дифференциальных алгебраических уравнений и теории обобщенного метода пространства состояний [11-13].

Обобщенная модель пространства состояний (ОМПС) представляет собой набор дифференциальных и/или алгебраических уравнений, которые для линейных стационарных динамических систем имеют вид:

$$\begin{gathered} E\,\dot{x}(t) = \;A\,x(t) + \;B\,u(t); \\ y(t) = C\,x(t) + D\,u(t); \end{gathered} \tag{3}$$

где x — вектор состояния, u — входной вектор, y — выходной вектор, E, A, B, C, D — постоянные матрицы соответствующих размерностей.

Обратите внимание, что в случае, когда E невырожден, систему (3) можно переписать как:

$$\begin{gathered} \dot{\mathrm{x}}(\mathrm{t}) = \;\mathrm{E}^{-1}\mathrm{A}\,\mathrm{x}(\mathrm{t}) + \;\mathrm{E}^{-1}\mathrm{B}\,\mathrm{u}(\mathrm{t}); \\ \mathrm{y}(\mathrm{t}) = \mathrm{C}\,\mathrm{x}(\mathrm{t}) + \mathrm{D}\,\mathrm{u}(\mathrm{t}); \end{gathered} \tag{4}$$

что является хорошо известным представлением пространства состояний.

Аналогично, если $E{=}I$ (где I — единичная матрица), система (3) является «классической» моделью пространства состояний:

$$\begin{gathered} \dot{\mathrm{x}}(\mathrm{t}) = \;\mathrm{A}\,\mathrm{x}(\mathrm{t}) + \mathrm{B}\,\mathrm{u}(\mathrm{t}); \\ \mathrm{y}(\mathrm{t}) = \mathrm{Cx}(\mathrm{t}) + \mathrm{Du}(\mathrm{t}). \end{gathered} \tag{5}$$

Следовательно, обобщенная модель пространства состояний (3) описывает более общий класс динамических систем, чем «классическая» модель пространства состояний (5).

Силовые цепи, как правило, являются нелинейными нестационарными цепями. Как показал Ньюкомб, метод ОМПС наиболее удобен для компьютерного моделирования нелинейных нестационарных цепей.

Фактически, динамика нелинейных нестационарных цепей в общем случае описывается системой уравнений вида:

$$\begin{gathered} \mathrm{F}(\dot{\mathrm{x}}, \mathrm{x}, \mathrm{u}, \mathrm{t}) = \;0; \\ \mathrm{G}(\mathrm{y}, \mathrm{x}, \mathrm{u}, \mathrm{t}) \;=\; 0; \end{gathered} \tag{6}$$

где x — вектор состояния, u — входной вектор, y — выходной вектор, F, G — нелинейные векторные функции. Однако этот подход сложен, поскольку модель (6) слишком громоздка для использования в большинстве задач анализа, синтеза или оптимизации.

«Классическая» модель пространства состояний нелинейных нестационарных цепей описывается следующим набором уравнений:

$$\begin{gathered} \dot{x} = F(x, u, t); \\ y = G(x, t). \end{gathered} \tag{7}$$

Преимуществом данного подхода является хорошо развитая теория математического и вычислительного моделирования электрических цепей с использованием метода пространства состояний. Сложность модели (7) заключается в необходимости отдельного поэлементного расчёта приращений нелинейной функции G.

Обобщённая модель пространства состояний в каноническом виде для нелинейных нестационарных цепей представлена ниже:

$$E\,\dot{x} = A(x,t) + Bu;$$
$$y = Cx; \quad (8)$$

где *B, C, E* — постоянные матрицы. Эта форма применяется для силовых цепей, моделирование которых обычно затруднено из-за наличия алгебраических и жёстких нелинейностей.

Таким образом, для моделирования силовых цепей с помощью ОМПС необходимо решить систему нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ). В отличие от явного обыкновенного дифференциального уравнения, интегрирование ДАУ может вызвать существенные трудности. Ограничения определяют многообразие, на котором должны располагаться решения ДАУ. Начальные значения должны быть выбраны таким образом, чтобы они удовлетворяли ограничениям. Кроме того, численное решение не должно слишком сильно отклоняться от многообразия. Поэтому следующий раздел представляет собой краткий обзор основных результатов по ДАУ и их численному моделированию.

ДАУ являются всюду сингулярными неявными обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ) :

$$F(x', x, t) = 0; \quad (9)$$

где частичный якобиан ∂F/∂x' тождественно сингулярен (является сингулярным для всех значений своих аргументов). Если бы ∂F/∂x' был несингулярным, то (9) можно было бы решить относительно x', по крайней мере теоретически, и мы бы имели явное ОДУ. На самом деле, ДАУ являются ОДУ, но такими, которые не могут быть решены относительно x'. Название ДАУ возникает, поскольку часто (9) представляет собой смесь дифференциальных и алгебраических уравнений. В зависимости от области применения ДАУ также называются неявными, дескрипторными или сингулярными [1].

Динамическое поведение многочисленных задач в физике, химии и технических приложениях можно моделировать дифференциальными уравнениями. Кроме того, модели часто содержат неявные нелинейные алгебраические уравнения для учета законов сохранения, геометрических или кинематических ограничений, законов Кирхгофа и т.д. Следовательно, ДАУ возникают в различных областях, например: в движении механических систем, анализе электрических цепей, кинетике химических реакций, теории управления, полудискретизации уравнений в частных производных [14-17].

Для краткого обзора особенностей ДАУ рассмотрим следующий простой пример:

$$x'_2 = x_1; \quad (10a)$$
$$x_2 = t + \alpha(t)x_3; \quad (10b)$$
$$x'_3 = x_3 + 1. \quad (10c)$$

Здесь $\alpha(t)$ — ненулевой коэффициент.

Решение (10) имеет вид:

$$x = \begin{bmatrix} 1 + \alpha'(t)(-1 + ce^t) + c\alpha(t)e^t \\ t + \alpha(t)(-1 + ce^t) \\ -1 + ce^t \end{bmatrix}; \quad (11)$$

где с — произвольная константа.

Этот пример иллюстрирует несколько отличий ДАУ от ОДУ.

1. Решение *x* (11) может зависеть от производных определяющего уравнения *F*. Обратите внимание на член $\alpha'(t)$, который появляется в решении.

2. Не все начальные условия приводят к гладким решениям. Начальные условия, допускающие гладкие решения, называются согласованными начальными условиями.

3. Могут быть скрытые ограничения. Решение (10) удовлетворяет не только ограничению (10b), но и ограничению $\alpha'(t)x_3 + \alpha(t)(1 + x_3) - x_1 = 0$.

4. Лучшее, на что можно надеяться, — это решение из гладкого многообразия, называемого многообразием решений. В приведенном выше примере оно параметризуется *t, c*.

Как упоминалось выше, ДАУ являются сингулярными уравнениями. Одной из мер сингулярности ДАУ является неотрицательное целое число, называемое индексом. Понятие индекса также позволяет классифицировать ДАУ по поведению их решений. Существует ряд определений индекса (глобальный индекс, геометрический индекс, индекс возмущения, дифференциальный индекс, индекс управляемости), которые идентичны для простых систем (описываемых линейными ДАУ с некоторыми дополнительными предположениями), но могут различаться для более сложных систем (например, для нелинейных ДАУ). Но во всех случаях ОДУ имеют нулевой индекс (поскольку, иначе говоря, индекс является мерой отклонения ДАУ от (обычного) ОДУ).

Одно из определений индекса — это количество раз, которое необходимо дифференцировать ДАУ, чтобы получить явное ОДУ по всем переменным состояния (индекс дифференцирования).

ДАУ с более высоким индексом (≥2) некорректны в том смысле, что малые возмущения исходных данных могут привести к произвольно большим изменениям в данных решения. Поэтому классические численные методы не могут быть применены ко всем ДАУ.

Наиболее изученными сегодня являются ДАУ с индексом 1. Для их численного решения могут быть успешно использованы формулы обратного дифференцирования (ФОД), неявный метод Рунге-Кутта (НРК) и различные методы экстраполяции. Известными кодами для ДАУ с индексом 1 являются DASSL, DASPK, LSODI, RADAU5, CHORAL. Но для ДАУ с индексом 2 и выше, эти классические методы работают только для некоторых специальных структурированных систем, таких как системы Гессенберга. В настоящее время не существует общего кода для задач с индексом 2, хотя существует несколько методов, разработанных специально для конкретных приложений, таких как механика со связями или электрические цепи.

3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Рассмотрим применение метода ОМПС к задаче моделирования динамики силовых цепей. Было проведено моделирование многофункционального регулятора напряжения. Такие устройства предназначены для обеспечения пуска асинхронных двигателей в сетях малой мощности. На рис. 1 представлена электрическая схема, а на рис. 2 – эквивалентная схема одной фазы многофункционального регулятора напряжения.

Динамическое поведение многофункционального регулятора напряжения можно моделировать с помощью набора нелинейных дифференциальных уравнений и набора нелинейных алгебраических уравнений, как показано ниже:

$$\begin{cases} \Psi'_1 = u - R_1 i_1 - u_c - R_{k3}(i_1 - i_3) \\ \Psi'_2 = -(R_H + R_2) i_2 \\ \Psi'_3 = u_C - R_3 i_3 - R_m(i_3 - i_4) + R_{k3}(i_1 - i_3) \\ \Psi'_4 = R_m(i_3 - i_4) - (R_{k3} + R_4 + R_p) i_4 \\ u'_C = \frac{1}{C}(i_1 - i_3) \end{cases}. \qquad (12)$$

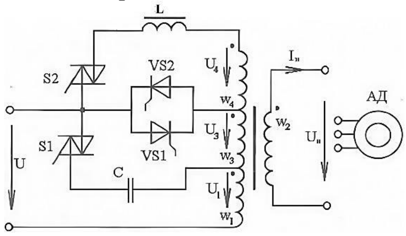

Fig. 1. Electrical circuit of one phase of multifunctional voltage regulator
Рис. 1. Электрическая схема одной фазы многофункционального регулятора напряжения

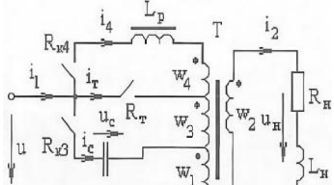

Fig. 2. Equivalent circuit schematic of one phase of multifunctional voltage regulator
Рис. 2. Эквивалентная схема одной фазы многофункционального регулятора напряжения

$$\begin{cases} (L_1 + L_{\sigma 1}) i_1 + M_{12} i_2 + M_{13} i_3 + M_{14} i_4 = \Psi_1 \\ M_{21} i_1 + (L_2 + L_{\sigma 2} + L_H) i_2 + M_{23} i_3 + M_{24} i_4 = \Psi_2 \\ M_{31} i_1 + M_{32} i_2 + (L_3 + L_{\sigma 3}) i_3 + M_{34} i_4 = \Psi_3 \\ M_{41} i_1 + M_{42} i_2 + M_{43} i_3 + \left(L_4 + L_{\sigma 4} + L_p\right) i_4 = \Psi_4 \\ u_H = -(R_H + R_2) i_2 \end{cases}. \qquad (13)$$

где: $\Psi_1 \dots \Psi_4$ - потоки обмоток многофункционального регулятора напряжения;

– $i_1 \dots i_4$ – токи обмоток;

– u, u_H, u_C - входное, выходное и конденсаторное напряжения соответственно;

– $R_1 \dots R_4$, R_h - активные сопротивления обмоток трансформатора и нагрузки, соответственно;

– R_{k3}, R_{k4}, R_m - сопротивления управляемых переключателей;

– C - емкость конденсатора;

– L_H - индуктивность нагрузки;

– $L_j = \frac{w_j^2}{R_\mu}, j = \overline{1{,}4}$ - самоиндукции обмоток трансформатора;

– $L_{\sigma 1} \dots L_{\sigma 4}$ - индуктивности рассеяния обмоток трансформатора;

$-M_{ij} = \frac{w_i \cdot w_j}{R_\mu}$, $i,j = \overline{1,4}$ - взаимные индуктивности обмоток трансформатора;

$-w_1 \ldots w_4$ – количество обмоток;

$-R_\mu$ — сопротивление намагничиванию, которое является нелинейной функцией суммы ампер-витков всех обмоток трансформатора.

Путем некоторых эквивалентных преобразований (12), (13) получаем обобщенную модель пространства состояний многофункционального регулятора напряжения следующего вида:

$$\begin{cases} E\dot{x} = Ax + Bu \\ y = C_1 x \end{cases}; \tag{14}$$

где $x = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ u_C \end{bmatrix}, y = u_H;$

$$E = \begin{bmatrix} L_1 + L_{\sigma 1} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & 0 \\ M_{21} & L_2 + L_{\sigma 2} + L_H & M_{23} & M_{24} & 0 \\ M_{31} & M_{32} & L_3 + L_{\sigma 3} & M_{34} & 0 \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 + L_{\sigma 4} + L_p & 0 \\ M_{12} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} -(R_1 + R_{k3}) & 0 & R_{k3} & 0 & -1 \\ 0 & -(R_H + R_2) & 0 & 0 & 0 \\ R_{k3} & 0 & -(R_3 + R_m - R_{k3}) & -R_m & 1 \\ 0 & 0 & R_m & -(R_m + R_{k3} + R_4 + R_p) & 0 \\ \frac{1}{c} & 0 & -\frac{1}{c} & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(R_H + R_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

Изучаются следующие режимы работы многофункционального регулятора напряжения:

- емкостная ветвь подключена, а индуктивная ветвь выключена: $R_{k3} = 0$; $R_{k4} = \infty$; R_m - регулируется;
- емкостная ветвь подключена, а конденсаторная ветвь выключена: $R_{k3} = \infty$; $R_{k4} = 0$; R_m - регулируется;
- обе ветви включены (резонансный режим): $R_{k3} = 0$; $R_{k4} = 0$; $R_m = \infty$.

На рис.3 показано поведение многофункционального регулятора напряжения, когда $R_{k3} = 0$; $R_{k4} = \infty$; запираемые тиристоры Rm модулируются по положению импульса.

На рис. 4 показано поведение многофункционального регулятора напряжения, когда $R_{k3} = 0$; $R_{k4} = \infty$; запираемые тиристоры R_m модулируются по ширине импульса.

Параметры многофункционального регулятора напряжения следующие:

$w_1 = 1300$; $w_2 = 52$; $w_3 = w_4 = 130$; $C = 79*10^{-6}$ 6F; $R_1 = 3.397\Omega$; $R_2 = 0.0492\Omega$; $R_3 = R_4 = 0.3394\ \Omega$; $R_H = 0.43\ \Omega$; $R_p = 0.5\ \Omega$; $R_\mu = 14300\ \Omega$; $L_{\sigma 1} = 0.028$ H; $L_{\sigma 2} = 3.8*10^{-5}$ H; $L_{\sigma 3} = L_{\sigma 4} = 0.0029$ H; $L_H = 0.0013$ H.

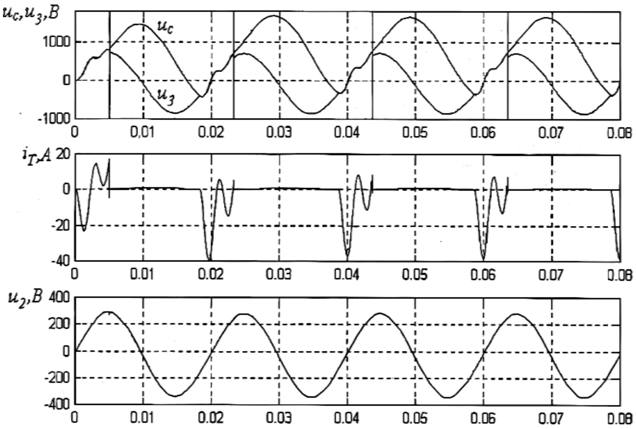

Fig. 3. Pulse-position modulated control

Рис. 3. Импульсно-позиционное модулированное управление

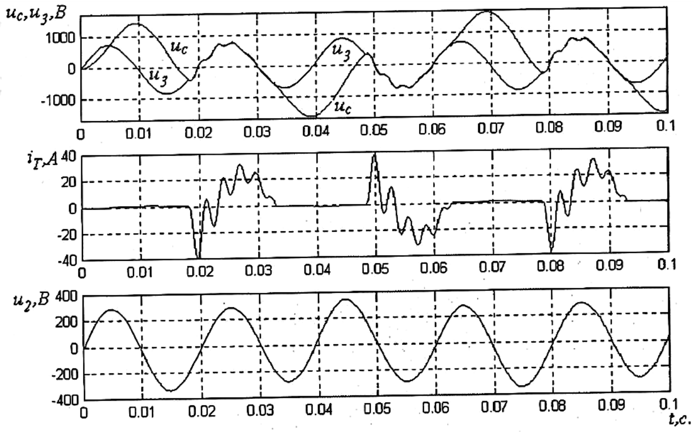

Fig. 4. Pulse-width modulated control
Рис. 4. Управление с широтно-импульсной модуляцией

Применение метода ОМПС для моделирования динамики силовой цепи позволяет сократить количество уравнений моделирования и использовать единый алгоритм для решения набора ДАУ (в отличие от «классического» метода, который требует использования двух отдельных алгоритмов для решения набора ОДУ и набора алгебраических уравнений).

4. Заключение (Conclusion)

Таким образом, результаты продемонстрировали реализуемость и эффективность моделирования динамики силовых цепей с использованием обобщенной модели пространства состояний и могут быть использованы для разработки эффективных и устойчивых алгоритмов численного решения ДАУ, возникающих при моделировании силовых цепей, создания интеллектуальных программных средств для автоматического решения ДАУ, разработка модифицированного метода автоматизированной генерации уравнений динамического состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Ф. Верлань, В.В. Мохор. Методы математического моделирования энергетических цепей: монография / С.Е. Саух. — К.: «Три К», 2020. — 278 с.

2. В.Б. Венчславский. Моделирование электронных систем источник-приёмник. Монография. -Чита, ЗабГГПУ, 2013. -139 с.

3. А.А. Верлань, М.В. Сагатов, В.А. Федорчук. Интегральные динамические модели электромеханических объектов. ISBN 978-9943-13-539-0, “IQTISOD-MOLIYA”, 2015, - 328 с.

4. Inzhiniring elektroprivodov i sistem avtomatizatsii [M. P. Belov, O. I. Зementov, A. Ye. Kozyaruk i dr.] ; pod red. V.A. Novikova, L. M. Chernigova. — M. : Publishing center «Akademiya», 2006. - 368 p.

5. Shreyner R. T. Matematicheskoye modelirovaniye elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty / R. T. Shreyner. — Yekaterinburg. : URO RAN, 2000. — 654 p.

6. Samarskiy A.A., Mikhaylov A.P. Matematicheskoye modelirovaniya: Idei. Metody. Primery / M.: Fizmatlit, 2005. 320 p.

7. Алямовский А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / [А. А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др.]. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.

8. I. Nagratah. “Control Systems Engineering.” 2005, 858 p.

9. И.Кузмицкий и Г.Кулаков.“Теория автоматического управления: учебник”. -Минск: БГТУ, 2010. – 572 с.

10. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учеб. в 5 т.; [2-е изд.]. - Т. l: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 656 с., ил.

11. Бенькович Е. С. Практическое моделирование сложных динамических систем / Е. С. Бенькович, Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков — СПб.: БХВ, 2001. — 401 с.

12.Oleksandr Sytnik, Konstantin Klyuchka Miraziz Sagatov and Sergey Protasov. Application of the Time Method for Studying Linear Reproducing Systems for Assessing the Dynamic Accuracy of Devices Based on Magnetoelectric Systems. Proceedings of the 11th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAIIT), March 2023. 2023/03/09, Volume 11, Issue 1, 213-220 pp.

13. Алексеев Е. Р. Sci Lab: Решение инженерных и математических задач /Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова, Е.А. Рудченко. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. — 260 с.
14. Necsulescu D. Advanced Mechatronics: Monitoring and Control of Spatially Distributed Systems /D. Necsulescu. - New Jersey - London - Singapore - Beijing - Shanghai - Hong Kong - Taipei - Chennai: World Scientifics Publishing Co., 2009. — 342 p.
15. Riley K. F. Mathematical Methods for Physics and Engineering /K. F. Riley, M. P. Hobson, S. J. Bence. — [Third ed.]. -New York: Cambridge university press, 2006. — 1333 p.
16. Schmitz T. L. Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity /T. L. Schmitz, K. S. Smith. - New York: Springer Science-Business Media, 2009. — 309 p.
17. Shuvra Das. Mechatronic Modeling and Simulation Using Bond Graphs /D. Shuvra. - Oxford: CRC Press. Taylor & Francis publishing group, 2009. — 504 p.

REFERENCES

1. A. F. Verlan, V. V. Mokhor. Methods of Mathematical Modeling of Power Circuits: Monograph / S. E. Saukh. - K.: "Tri K", 2020. - 278 p.
2. V. B. Venchslavsky. Modeling of Electronic Source-Receiver Systems: Monograph. - Chita, ZabGGPU, 2013. - 139 p.
3. A. A. Verlan, M. V. Sagatov, V. A. Fedorchuk. Integral Dynamic Models of Electromechanical Objects. ISBN 978-9943-13-539-0, “IQTISOD-MOLIYA”, 2015, p. 328.
4. Engineering of Electric Drives and Automation Systems / [M. P. Belov, O. I. Zementov, A. Ye. Kozyaruk et al.]; edited by V. A. Novikova, L. M. Chernigova. — M.: Publishing Center “Akademiya”, 2006. — 368 p.
5. Shreyner R. T. Mathematical Modeling of AC Drives with Semiconductor Frequency Converters / R. T. Shreyner. - Yekaterinburg.: URO RAS, 2000. - 654 p.
6. Samarskiy A. A., Mikhaylov A. P. Mathematical Modeling: Ideas. Methods. Examples / Moscow: Fizmatlit, 2005. 320 p.
7. Alyamovsky A. A. SolidWorks. Computer Modeling in Engineering Practice / [A. A. Alyamovsky, A. A. Sobachkin, E. V. Odintsov, et al.]. — St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005. — 800 p.
8. I. Nagratah. “Control Systems Engineering.” 2005, 858 p.
9. I. Kuzmitsky and G. Kulakov. “Theory of Automatic Control: Textbook”. Minsk: BSTU, 2010. - 572 p.
10. Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control: Textbook. in 5 volumes; [2nd ed.]. - T. l: Mathematical Models, Dynamic Characteristics, and Analysis of Automatic Control Systems / edited by K. A. Pupkov, N. D. Egupov. — Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2004. — 656 p., ill.
11. Benkovich E. S. Practical Modeling of Complex Dynamic Systems / E. S. Benkovich, Yu. B. Kolesov, Yu. B. Senichenkov - St. Petersburg: BHV, 2001. - 401 p.
12. Oleksandr Sytnik, Konstantin Klyuchka Miraziz Sagatov and Sergey Protasov. Application of the Time Method for Studying Linear Reproducing Systems for Assessing the Dynamic Accuracy of Devices Based on Magnetoelectric Systems. Proceedings of the 11th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAIIT), March 2023. 2023/03/09, Volume 11, Issue 1, 213-220 pp.
13. Alekseev E. R. Sci Lab: Solving Engineering and Mathematical Problems / E. R. Alekseev, O. V. Chesnokova, E. A. Rudchenko. - Moscow: Binom. Knowledge Laboratory, 2008. - 260 p.
14. Necsulescu D. Advanced Mechatronics: Monitoring and Control of Spatially Distributed Systems / D. Necsulescu. - New Jersey - London - Singapore - Beijing - Shanghai - Hong Kong - Taipei - Chennai: World Scientifics Publishing Co., 2009. - 342 p.
15. Riley K. F. Mathematical Methods for Physics and Engineering / K. F. Riley, M. P. Hobson, S. J. Bence. - [Third ed.]. - New York: Cambridge University Press, 2006. - 1333 p.
16. Schmitz T.L. Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity /T.L. Schmitz, K. S. Smith. - New York: Springer Science-Business Media, 2009. - 309 p.
17.Shuvra Das. Mechatronic Modeling and Simulation Using Bond Graphs / D. Shuvra. - Oxford: CRC Press. Taylor & Francis publishing group, 2009. - 504 p.