

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 1 (82)

январь

2008

**Редакционный совет:**

МАКАРОВ И. М.  
МАТВЕЕНКО А. М.  
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.  
ФЕДОРОВ И. Б.

**Главный редактор:**

ТЕРЯЕВ Е. Д.

**Заместители гл. редактора:**

ПОДУРАЕВ Ю. В.  
ПУТОВ В. В.  
ЮЩЕНКО А. С.

**Ответственный секретарь:**

ПЕТРИН К. В.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСАНДРОВ В. В.  
АНТОНОВ Б. И.  
АРШАНСКИЙ М. М.  
БОГАЧЕВ Ю. П.  
БУКОВ В. Н.  
ВОСТРИКОВ А. С.  
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.  
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.  
ИВЧЕНКО В. Д.  
ИЛЬЯСОВ Б. Г.  
КАЛЯЕВ И. А.  
КОЛОСОВ О. С.  
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.  
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.  
КУЗЬМИН Н. Н.  
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.  
ЛЁВИН Б. А.  
ЛОХИН В. М.  
НОРЕНКОВ И. П.  
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.  
РАПОПОРТ Э. Я.  
РАССАДКИН Ю. И.  
РАЧКОВ М. Ю.  
РЕЗЧИКОВ А. Ф.  
СЕБРЯКОВ Г. Г.  
СИГОВ А. С.  
СИРОТКИН О. С.  
СОЙФЕР В. А.  
ТИМОФЕЕВ А. В.  
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.  
ФУРСОВ В. А.  
ЮРЕВИЧ Е. И.  
ЮСУПОВ Р. М.

**Редакция:**

БЕЗМЕНОВА М. Ю.  
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.  
ЛЫСЕНКО А. В.  
ЧУТУНОВА А. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

**МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

- Ефанов В. Н., Шевяков Е. Н. Стабилизация сложных динамических систем с использованием метода полосного сдвига . . . . . 2  
Ахундов Т. А., Слита О. В., Ушаков А. В. Назначение структуры собственных векторов, доставляющей динамической системе модальную робастность с минимальными затратами на управление . . . . . 6

**МЕХАТРОННЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

- Афонин С. М. Исследование абсолютной устойчивости системы управления деформацией пьезопреобразователя для нано- и микроперемещений . . . . . 10  
Мусатов В. Ю., Сыроев В. В., Машенко А. А., Варезников А. С., Хризостомов А. А. О возможности применения нейропроцессора для обработки отклика однокристалльной мультисенсорной микросистемы идентификации газов . . . . . 17  
Козырев В. В. Мехатронные модули для наноиндустрии: разработка, создание и внедрение . . . . . 23

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

- Колоколов Ю. В., Моновова А. В., Мелихов А. Ю. Гибридный алгоритм моделирования динамики импульсных систем преобразования энергии большой размерности. Ч. 1. Разработка гибридного алгоритма . . . . . 27  
Коростелев В. Ф., Раскозачиков А. Н., Мартынов И. Е. Алгоритмическое и программное обеспечение системы управления процессом литья с наложением давления . . . . . 35  
Саханский С. П. Управление температурой нагревателя на установке выращивания монокристаллов германия . . . . . 42

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

- Валева Р. Г., Сильнова С. В., Пузырикова Е. А. Интеллектуальная система управления производством и сбытом . . . . . 47

**ПРОБЛЕМЫ МЕХАТРОНИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ В РАБОТАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ЮФУ**

- Рогозов Ю. И., Бутенков С. А., Санридов А. С., Горбань Н. С., Дубровский А. А., Друпов С. А., Жибушко Ю. А., Почечуев Н. В., Стужотий Л. Н. Метод создания инструментальных средств разработки автоматизированных информационно-управляющих систем . . . . . 52  
Кравченко П. П., Хусанов Н. Ш. Оптимизированные дельта-преобразования второго порядка и синтез алгоритмов цифрового управления для объектов с частичной структурной неопределенностью . . . . . 52  
Финаев В. И., Молчанов А. Ю. Задача автоматической оптимизации при нечетком интервальном задании параметров экстремальной характеристики объекта . . . . . 52  
Медведев М. Ю. Робастное управление системой с квадратичной нелинейностью . . . . . 53  
Кузьменко А. А. Синергетический синтез динамических регуляторов для энергосистем, функционирующих в условиях кусочно-постоянных возмущений . . . . . 53  
Contents . . . . . 56

*Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание степени доктора наук*

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:  
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: [mech@novtex.ru](mailto:mech@novtex.ru)

боты передачи. Вследствие этого повышается разрешающая способность мехатронного модуля. Однако для применения резьбовых синхронизаторов необходимо отработать технологию их изготовления.

Для дальнейшего улучшения разрешающей способности одно- и многокоординатных подвижек до нескольких нанометров необходимо использование наукоемких компонентов высшего уровня, в том числе датчиков положения с разрешающей способностью 1...5 нм. Для обеспечения высокого уровня наукоемких компонентов при относительно низкой стоимости их изготовления необходима организация индустрии наукоемких компонентов [2].

#### Список литературы

1. Козырев В. В. Прецизионные ролико-винтовые передачи как исполнительные механизмы электромеханических приводов с микропроцессорной системой управления: достижения научной школы ВлГУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 10. С. 21–23.
2. Козырев В. В. О механизмах реализации программы инновационного развития РФ (с позиций опыта работы малого научно-технического коллектива) // Инновации. 2007. № 3 (101). С. 17–26.
3. Козырев В. В. Конструкции ролико-винтовых передач и методика их проектирования / Учеб. пос. Владим. гос. ун-т. Владимир: Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2004. 102 с.
4. Патент РФ № 2292502. Козырев В. В. Планетарная передача винт-гайка с длинными резьбовыми рамками.

## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 519.62: 621.313.333.2

Ю. В. Колоколов, д-р техн. наук, проф.,  
А. В. Мононская, канд. техн. наук, доц.,  
А. Ю. Мелихов,

Югорский государственный университет,  
г. Ханты-Мансийск

### Гибридный алгоритм моделирования динамики импульсных систем преобразования энергии большой размерности

Часть 1. Разработка гибридного алгоритма

*Рассматривается подход к снижению затрат машинного времени при моделировании динамики нелинейных систем с переменной структурой в приложении к модели системы импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем напряжения асинхронного двигателя (СИФУ-ТПН-АД). В первой части статьи предлагается формирование узкоспециализированного "гибридного" алгоритма с переменным методом интегрирования. Использование полученного алгоритма в среде "MATLAB 7.0" позволяет до 30 % снизить затраты машинного времени на моделирование динамики СИФУ-ТПН-АД по сравнению с решением аналогичной задачи с использованием встроенной функции ode45.*

#### Введение

Использование метода припасовывания [1–3] для моделирования динамики систем с переменной структурой сопряжено с проблемой выбора такого устойчивого алгоритма численного интегри-

рования, который позволит минимизировать затраты машинного времени при условии обеспечения заданной погрешности вычислений. Если каждый интервал постоянства структуры (ИПС) интегрируемой модели можно представить в форме системы линейных дифференциальных уравнений, то обычно выбирается алгоритм интегрирования на основе вычисления матричной экспоненты — как наиболее производительный [1–3]. Если в модели ИПС присутствуют нелинейные дифференциальные уравнения, то выбор алгоритма интегрирования оказывается не столь очевидным. В связи с этим для ускорения моделирования предлагается, например, использовать кластерные вычислительные комплексы в рамках теории параллельных алгоритмов [4, 5]; конструировать алгоритмы, оптимальные по критерию наискорейшей сходимости к результату [6] и т. д. В частности, проблема минимизации затрат машинного времени является актуальной при моделировании динамики импульсных систем преобразования энергии. Однако в работах по данной тематике [3, 7–10] обычно не только не ставится задача отыскания и использования более быстродействующего алгоритма интегрирования, но и выбор того или иного алгоритма обосновывается достаточно слабо.

В данной статье формируется подход к снижению затрат машинного времени при моделировании динамики нелинейных систем с переменной структурой в приложении к модели системы импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем напряжения асинхронного двигателя (СИФУ-ТПН-АД). Для этой модели ИПС представляются в форме систем нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка (раздел 1).

В рамках подхода обосновывается выбор методов интегрирования и их параметров (порядок аппроксимации и шаг интегрирования) на основе анализа жесткости систем нелинейных дифференциальных уравнений, требования устойчивости разностной схемы и заданной точности интегрирования (раздел 2). Субалгоритмы, реализующие каждый из выбранных методов, обеспечивают наименьшее время интегрирования для ИПС определенной длительности. Соответственно для снижения затрат машинного времени предлагается объединение субалгоритмов в один "гибридный" алгоритм (раздел 3), который организует выбор одного из них для текущего ИПС. Реализация алгоритма и исследование его работоспособности выполнены в среде *MATLAB 7.0®*.

### 1. Математическая модель СИФУ-ТПН-АД

Симметричный ТПН (рис. 1, а) с синхронизацией СИФУ по напряжению сети может работать в двух режимах в зависимости от значения угла управления  $\alpha$  и угла запаздывания тока в цепях с индуктивной нагрузкой  $\delta$  [1, 2]:

- $\frac{\pi}{3} < (\alpha - \delta) < \frac{2\pi}{3}$  — "сверхграничный" режим (чередование интервалов нулевой и двухфазной проводимости) (рис. 1, б);
- $0 < (\alpha - \delta) < \frac{\pi}{3}$  — "дограничный" режим (чередование интервалов двухфазной и трехфазной проводимости) (рис. 1, в).

При составлении математической модели СИФУ-ТПН-АД в соответствии с методом припасовывания [2] весь интервал интегрирования разбивается на подынтервалы постоянства структуры (рис. 1, з), внутри которых структура объекта управления (асинхронного двигателя) не изменяется.

В общем случае для некоторого  $j$ -го ИПС система обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) объекта управления имеет следующий вид:

$$\frac{du_i(t)}{dt} = f_i[u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), g(t)],$$

$$u_i(t) \in \mathbb{R}^n, t \in [t_j, t_{j+1}], i = 1, 2, \dots, n; \quad (1)$$

$$u_i(0) = u_i^0, i = 1, 2, \dots, n,$$

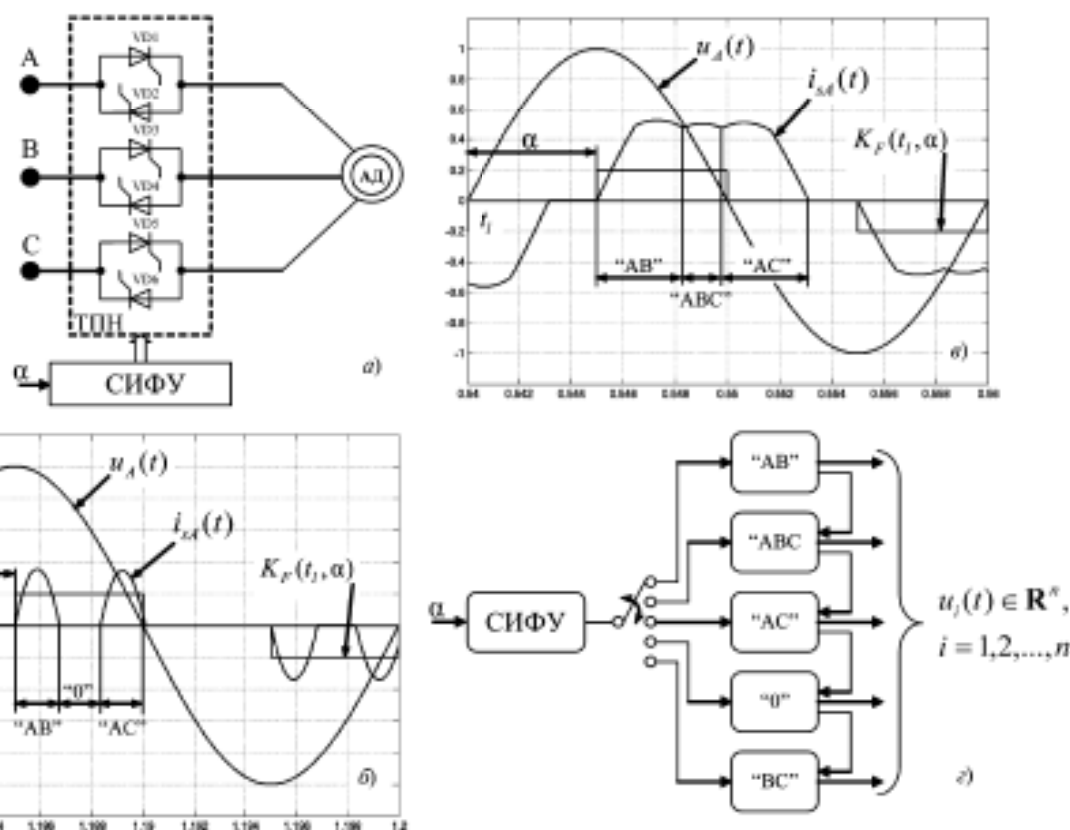


Рис. 1. Электрические процессы в СИФУ-ТПН-АД:

а — структурная схема; б —  $u_A(t)$  — кривая линейного напряжения фазы "А" (о. е.),  $i_{A(t)}$  — кривая мгновенного тока статорной обмотки АД фазы "А" (о. е.),  $K_p(t, \alpha)$  — импульсная функция управления тиристорах ( $\alpha$  — угол управления,  $t_l$  — начало  $l$ -го периода питающего напряжения) в "сверхграничном" режиме; в — то же в "дограничном" режиме; з — последовательность режимов, соответствующих интервалам постоянства структуры СИФУ-ТПН-АД

где  $n$  — порядок системы уравнений:  $n = 4$  для интервала отключения АД от сети (режим "0");  $n = 5$  для режимов двухфазного подключения "AB", "BC", "AC" к сети;  $n = 7$  для симметричного трехфазного подключения (режим "ABC");  $u_j$  — переменные состояния модели (токи и/или потокосцепления статорных и роторных обмоток АД и угловая скорость вращения ротора двигателя);  $g(t)$  — внешнее периодическое воздействие.

Так как СОДУ (1) для всех ИПС (кроме ИПС, соответствующего режиму "0") является нелинейной, то для сокращения машинного времени требуется обосновать выбор метода интегрирования.

## 2. Выбор метода интегрирования математической модели СИФУ-ТПН-АД

Анализ литературных источников [3, 5–12, 14–17] позволил предложить последовательность этапов выбора метода интегрирования, оптимального по критерию временных затрат для заданной СОДУ, показанную на рис. 2.

Как следует из рис. 2, для выбора алгоритма интегрирования потребуется провести анализ жесткости системы уравнений (1), чтобы затем с ис-

пользованием условия устойчивости определить множество алгоритмов, пригодных для проведения серии численных экспериментов.

Жесткость СОДУ определяют по следующему выражению [11]:

$$S(t) = \frac{\max_{1 \leq m \leq n} |\operatorname{Re} \lambda_m(t)|}{\min_{1 \leq m \leq n} |\operatorname{Re} \lambda_m(t)|}, \quad (2)$$

где  $\lambda_m(t)$ ,  $m = 1, 2, \dots, n$ , — собственные числа матрицы  $A(t, w(t))$  системы уравнений первого приближения, составленной для (1);  $w(t)$  — стационарное решение СОДУ (1), относительно которого проводится линеаризация. Система (1) будет называться жесткой на решении  $w(t)$  и на данном интервале  $t \in [t_j; t_{j+1}]$ , если выполняются два требования:

- 1)  $\operatorname{Re} \lambda_m(t) < 0$ ,  $m = 1, 2, \dots, n$ ,  $\forall t \in [t_j; t_{j+1}]$ ;
- 2) значение  $\sup_{t \in [t_j; t_{j+1}]} S(t)$  велико.

Несмотря на то, что второе требование не указывает верхнюю границу для  $\sup_{t \in [t_j; t_{j+1}]} S(t)$ , начиная с которой система уравнений (1) становится жесткой [11], в практике численных методов условно выделяют три группы СОДУ:

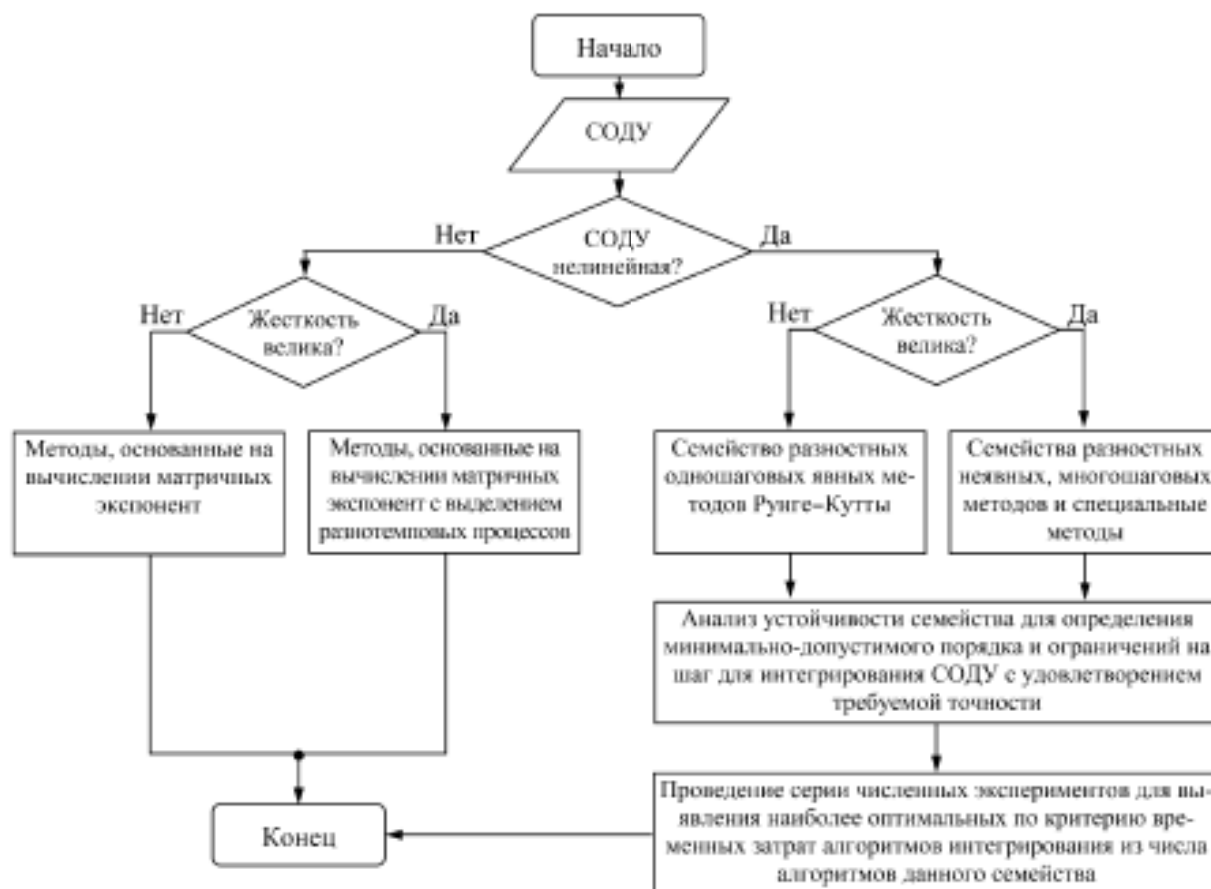


Рис. 2. Выбор алгоритма численного интегрирования СОДУ

- дифференциальные уравнения с незначительной жесткостью ( $\sup_{t \in [t_j; t_{j+1}]} S(t) \sim 10+10^3$ );
- уравнения с умеренной жесткостью ( $\sup_{t \in [t_j; t_{j+1}]} S(t) \sim 10^3+10^4$ ) и
- жесткие уравнения ( $\sup_{t \in [t_j; t_{j+1}]} S(t) > 10^4$ ) [11, 12].

В настоящее время не существует методов, предназначенных для интегрирования уравнений с умеренной жесткостью. В этом случае выбор может осуществляться среди алгоритмов, предназначенных для интегрирования и жестких и нежестких систем.

Исследование жесткости уравнений модели асинхронного двигателя (АД) можно упростить путем применения преобразования координат [1, 2], позволяющего перейти от заторможенной относительно статора системы координат  $\alpha-\beta-\gamma$  к системе координат, вращающейся с угловой частотой  $\omega_s = 2\pi f_u (u-v-w)$ , соответствующей частоте напряжения питания  $f_u$ . Это преобразование осуществляется путем умножения переходной матрицы  $L$  на вектор зависимых переменных  $X_{\alpha\beta\gamma}$ :

$$X_{uvw} = LX_{\alpha\beta\gamma} \quad (3)$$

Преобразование (3) позволяет перейти от периодических функций токов и напряжений к непериодическим функциям переменной амплитуды. Это означает, что в системе координат  $u-v-w$  модель АД представляет собой автономную систему нелинейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Для такой системы жесткость  $S$ , определяемая по формуле (2), не зависит от времени, поскольку не зависят от времени собственные числа матрицы  $A(w)$ .

Рис. 3 демонстрирует изменение жесткости  $S$  при варьировании угловой скорости АД в диапазоне  $\omega_r \in [0, \omega_r^*]$ , где  $\omega_r^*$  — синхронная частота вращения ротора АД. Интегрирование системы (1) осуществляли при нулевых начальных условиях для всех существующих в модели СИФУ-ТПН-АД режимов постоянства структуры (см. рис. 1, 2). Здесь и далее в работе параметры схемы замещения соответствуют АД 4A225M4Y3 (номинальная мощность  $P_{ном} = 55$  кВт).

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, позволяет сделать два вывода:

- 1) максимальное значение числа жесткости ( $S_{max}$ ) относится к уравнениям несимметричных режимов "AB", "AC", "BC" и составляет

$$S_{max} = \frac{\max_{|\lambda_{max}|} |\operatorname{Re} \lambda_m|}{\min_{|\lambda_{min}|} |\operatorname{Re} \lambda_m|} = \frac{187,6971}{0,3474} \approx 540,23 \text{ ед.} \quad (4)$$

В практике численных методов это значение соответствует нежестким системам [11, 12];

2) характер изменения числа жесткости позволяет ожидать различия в свойствах интегрирования уравнений симметричного и несимметричных режимов в области подсинхронных скоростей (при  $\omega_r > 150$  рад  $\cdot$  с $^{-1}$ ). На этом основании дальнейший анализ будет проводиться на примере двух СОДУ: для ИПС симметричного подключения АД к сети (режим "ABC") и одного из ИПС несимметричного подключения к сети (например, режим "AB"). В этом случае система уравнений (1) может быть представлена следующим образом [13]:

$$\begin{aligned} \frac{du_i^{abc}(t)}{dt} &= f_i^{abc} [u_1^{abc}, u_2^{abc}, \dots, u_n^{abc}, g(t)], \\ u_i^{abc}(t) &\in \mathbb{R}^n, t \in [t_j, t_{j+1}], u_i(0) = u_i^0, \\ i &= 1, 2, \dots, n, n = 7; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_i^{ab}(t)}{dt} &= f_i^{ab} [u_1^{ab}, u_2^{ab}, \dots, u_n^{ab}, g(t)], \\ u_i^{ab}(t) &\in \mathbb{R}^n, t \in [t_j, t_{j+1}], u_i(0) = u_i^0, \\ i &= 1, 2, \dots, n, n = 5, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $u_i^{abc}$  ( $u_i^{ab}$ ) — переменные состояния модели (токи и/или потокосцепления статорных и роторных обмоток АД и угловая скорость вращения ротора двигателя) режима "ABC" ("AB");  $g(t)$  — сетевое напряжение на интервале постоянства структуры  $t \in [t_j, t_{j+1}]$ .

Из теории численных методов известно, что для интегрирования СОДУ с незначительной жестко-

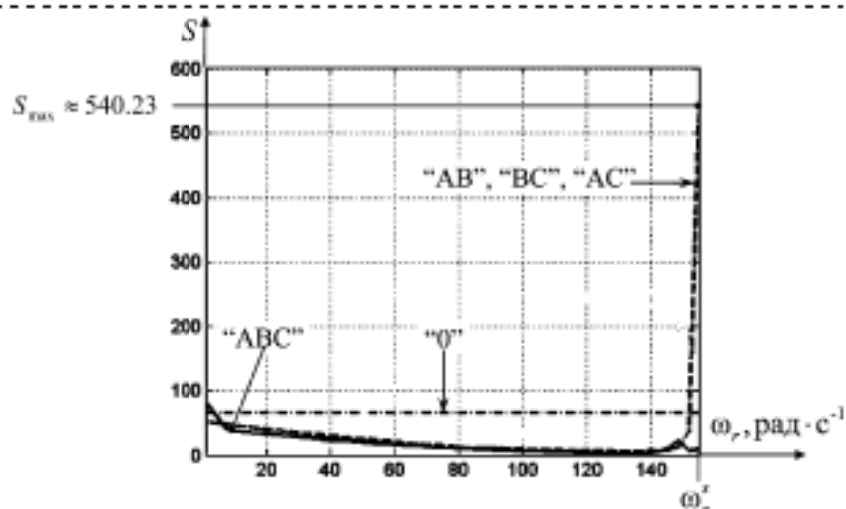


Рис. 3. Изменение жесткости моделей несимметричных режимов и симметричного режима в диапазоне варьирования угловой частоты вращения ротора АД  $\omega_r \in [0, \omega_r^*]$

стью оптимальными показателями по критерию минимизации полного времени интегрирования ( $T_{\text{total}}$ ) обладают разностные одношаговые методы [11, 12, 14], что обосновывает их выбор для дальнейшего анализа. Большую часть явных одношаговых методов составляют методы семейства Рунге—Кутты и методы, полученные на их основе. В настоящее время теория методов Рунге—Кутты (МРК) детально рассмотрена в целом ряде фундаментальных работ [6, 14, 15] и продолжает развиваться в направлении оптимизации по различным критериям [6, 16, 17].

В теории МРК установлены ограничения на шаг интегрирования для удовлетворения условия устойчивости разностной схемы. Например, для схемы второго порядка ( $p = 2$ ) такое условие имеет следующий вид [11]:

$$h_{p, \max} |_{p=2} \leq \frac{2}{|\lambda_{\max}|}, \quad (7)$$

где  $\lambda_{\max}$  — действительная часть максимального собственного числа матрицы Якоби уравнения первого приближения исходной СОДУ.

Подставив в неравенство (7) значение максимального собственного числа из выражения (4), получим

$$h_{p, \max} |_{p=2} \leq \frac{2}{187,7} \leq 1,07 \cdot 10^{-2}. \quad (8)$$

Таким образом, требование устойчивости указывает максимальное значение локального шага ( $h_{p, \max}$ ), с которым может проводиться интегрирование исходной СОДУ на  $j$ -м интервале постоянства структуры  $t \in [t_j, t_{j+1}]$  разностным методом порядка  $p$ .

При использовании вложенных методов Рунге—Кутты (ВМРК) для моделирования СИФУ-ТПН-АД  $k$ -й шаг интегрирования  $h_k$  ( $h_k < h_{p, \max}$ ) будет автоматически выбираться алгоритмом интегрирования так, чтобы обеспечить требуемую точность. Точность интегрирования, задаваемая локальной погрешностью  $\xi_j \in E_{\text{total}}^{\text{local}}$ , в данной работе связывается с метрологическими характеристиками существующих измерительных приборов. Так, при проведении физического эксперимента для регистрации угловой скорости вращения ротора двигателя широкое распространение получили энкодеры серии ProCoder (Baumer Electric, Germany). К примеру, энкодер BDH имеет абсолютную погрешность, не превышающую  $e_{\text{sensor}} < 2 \cdot 10^{-4}$  [18]. Для обеспечения запаса по точности потребуем выполнение интегрирования исследуемых СОДУ (1) и (2) с погрешностью  $\xi_j = 1 \cdot 10^{-4}$ , в два раза меньшей  $e_{\text{sensor}}$ .

Найдем диапазон изменения шага при интегрировании модели СИФУ-ТПН-АД для того, чтобы

определить границы варьирования шага при проведении серии численных экспериментов. Максимальное значение шага интегрирования  $h_{\max}$  для модели СИФУ-ТПН-АД будет определяться максимальной продолжительностью ИПС  $\tau_{\max}$  ( $h_{\max} = \tau_{\max}$ ). В ТПН  $\tau_{\max}$  определяется частотой коммутации тиристорных ключей ( $f_{\text{sw}}$ ), которая прямо пропорциональна числу ключей ( $q$ ) ( $q = 6$ , см. рис. 1, а) и частоте напряжения питания  $f_u$  [1, 2]:

$$f_{\text{sw}} = qf_u.$$

Следовательно, максимальная длительность одного ИПС в системах с симметричным ТПН при  $f_u = 50$  Гц составит

$$\tau_{\max} = \frac{1}{f_{\text{sw}}} = \frac{1}{6 \cdot 50} \approx 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (9)$$

Минимальное значение шага интегрирования рассчитывалось по следующей формуле:

$$h_{\min} = \min(h_{\min}^{\alpha}, \forall \alpha),$$

где  $h_{\min}^{\alpha}$  — минимальный шаг интегрирования для каждого  $\alpha$ .

Численное моделирование СИФУ-ТПН-АД показывает, что минимальное значение шага интегрирования  $h_{\min}^{\alpha}$  в модели СИФУ-ТПН-АД сложным образом зависит от угла управления  $\alpha$ . В частности, такая зависимость получена с использованием функции *ode45* (MATLAB 7.0) при интегрировании с локальной погрешностью  $\xi_j < 1 \cdot 10^{-4}$  (рис. 4). Диапазон изменения угла управления  $\alpha \in [80; 120]$ , использованный при построении графиков рис. 4, соответствует типичному диапазону изменения угла управления в симметричном ТПН с синхронизацией по напряжению сети [1, 2].

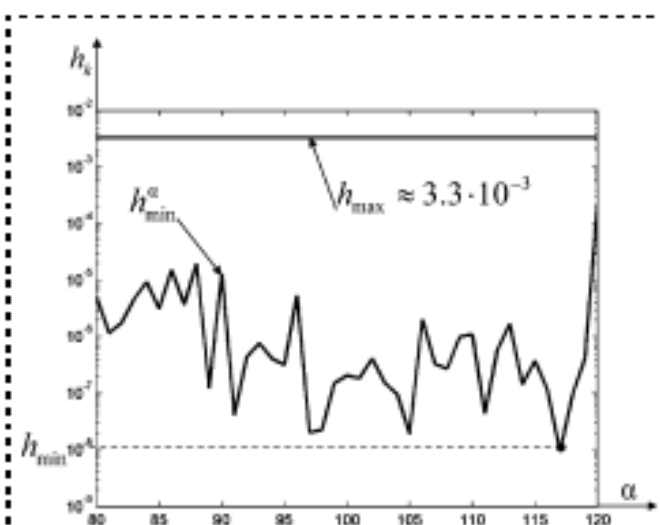


Рис. 4. График зависимости минимального шага интегрирования модели СИФУ-ТПН-АД в функции угла управления  $\alpha$

Приведенная выше длительность максимального ИПС  $\tau_{\max}$  меньше максимального шага интегрирования  $h_p$ ,  $\max|p-2|$ , обеспечивающего устойчивость МРК порядка аппроксимации  $p=2$  (сравните формулы (8) и (9)). На этом основании для проведения серии численных экспериментов, нацеленных на сравнение затрат машинного времени, могут быть использованы различные ВМРК с  $p \geq 2$  (поскольку увеличение порядка приводит к расширению области устойчивости МРК [11]).

Используя полученные выше границы изменения шага интегрирования  $h_k \in [h_{\min}; h_{\max}]$ , построим зависимости временных затрат  $T_{\text{total}}$  при интегрировании систем (5), (6) на интервале  $t \in [0, T_y]$  с локальной погрешностью  $\xi_j < 1 \cdot 10^{-4}$ . Эти результаты получены с нулевыми начальными условиями и представлены на рис. 5. Для построения зависимостей были использованы ВМРК переменного порядка  $p(p+1)$ , характеризующиеся наилучшей сходимостью из числа прочих алгоритмов равного порядка [6, 14–16]. Далее эти ВМРК будут обозначаться ВМРК- $p(p+1)$ .

Анализ зависимостей  $T_{\text{total}} = f(h_k)$  (рис. 5, а, в) позволяет заключить, что повышение порядка метода интегрирования  $p$ , а равно и числа стадий  $s$ , приводит к возрастанию времени интегрирования при расчете правых частей систем уравнений на  $k$ -м шаге. Это отчетливо видно на рис. 5, в, где показано, что ВМРК-4(5) Cash&Karp [16] требует меньшее время для интегрирования СОДУ (5), чем ВМРК-5(6) Бутчера [6] (при прочих равных условиях). Кроме того, можно указать некоторые критические значения шага интегрирования  $h_c$  (например,  $h_c^{ABC}$  на рис. 5, б и  $h_{c1}^{AB}$ ,  $h_{c2}^{AB}$  на рис. 5, з), которые будут разделять весь диапазон изменения шага  $h_k \in [h_{\min}; h_{\max}]$  на области, оптимальные по критерию временных затрат для различных алгоритмов интегрирования. Например, из анализа зависимостей рис. 5, б следует, что для значений  $h_k < h_c^{ABC}$  минимальные временные затраты относятся к алгоритму ВМРК-2(3), а для значений  $h_k > h_c^{ABC}$  меньшее время интегрирования имеет алгоритм ВМРК-4(5) Cash&Karp. При этом если различие временных затрат в выделенном диапазоне незначительно, то предпочтение следует отда-

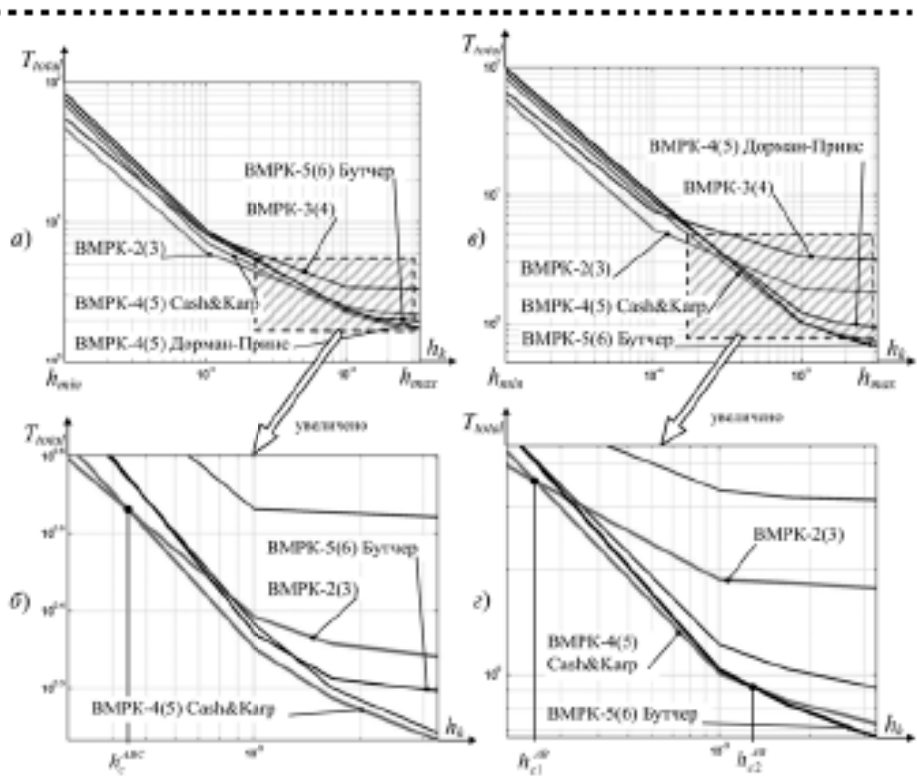


Рис. 5. Графики зависимостей полного времени интегрирования ( $T_{\text{total}}$ ) от шага интегрирования  $h_k$  СОДУ (5) (а, б) и СОДУ (6) (в, з) при использовании вложенных методов Рунге–Кутты

вать алгоритму с меньшим порядком аппроксимации, поскольку это позволяет сократить число расчетов при очередном обращении к правой части интегрируемых уравнений. На этом основании ВМРК-4(5) Cash&Karp следует использовать для интегрирования СОДУ (6) во всем диапазоне  $h_k \in [h_{c1}^{AB}; h_{\max}]$ , поскольку на интервале  $h_k \in [h_{c2}^{AB}; h_{\max}]$  (рис. 5, з) временные затраты на интегрирование СОДУ (6) ВМРК-5(6) Бутчера оказались незначительно меньше по сравнению с ВМРК-4(5) Cash&Karp.

### 3. Построение гибридного алгоритма

Результаты, полученные в предыдущем разделе, являются основанием для построения гибридного алгоритма интегрирования модели СИФУ-ТПН-АД (рис. 6). Входной информацией гибридного алгоритма (А. 1) являются время интегрирования ( $T_{\text{end}}$ ), значения  $h_{c1}^{AB}$ ,  $h_c^{ABC}$ , а также множества коэффициентов  $\{B_{ABC}^{23}\}$  и  $\{B_{AB}^{23}\}$ ,  $\{B_{AB}^{45}\}$  алгоритмов управления шагом ВМРК для систем уравнений (5) и (6), соответствующих симметричному и несимметричному режимам. Если не достигнуто  $T_{\text{end}}$  (А. 2), то вычисляется шаг интегрирования  $h_{k+1}$  следующей итерации как функция текущего угла управления ( $\alpha$ ) текущего момента времени  $t_j$  и зна-

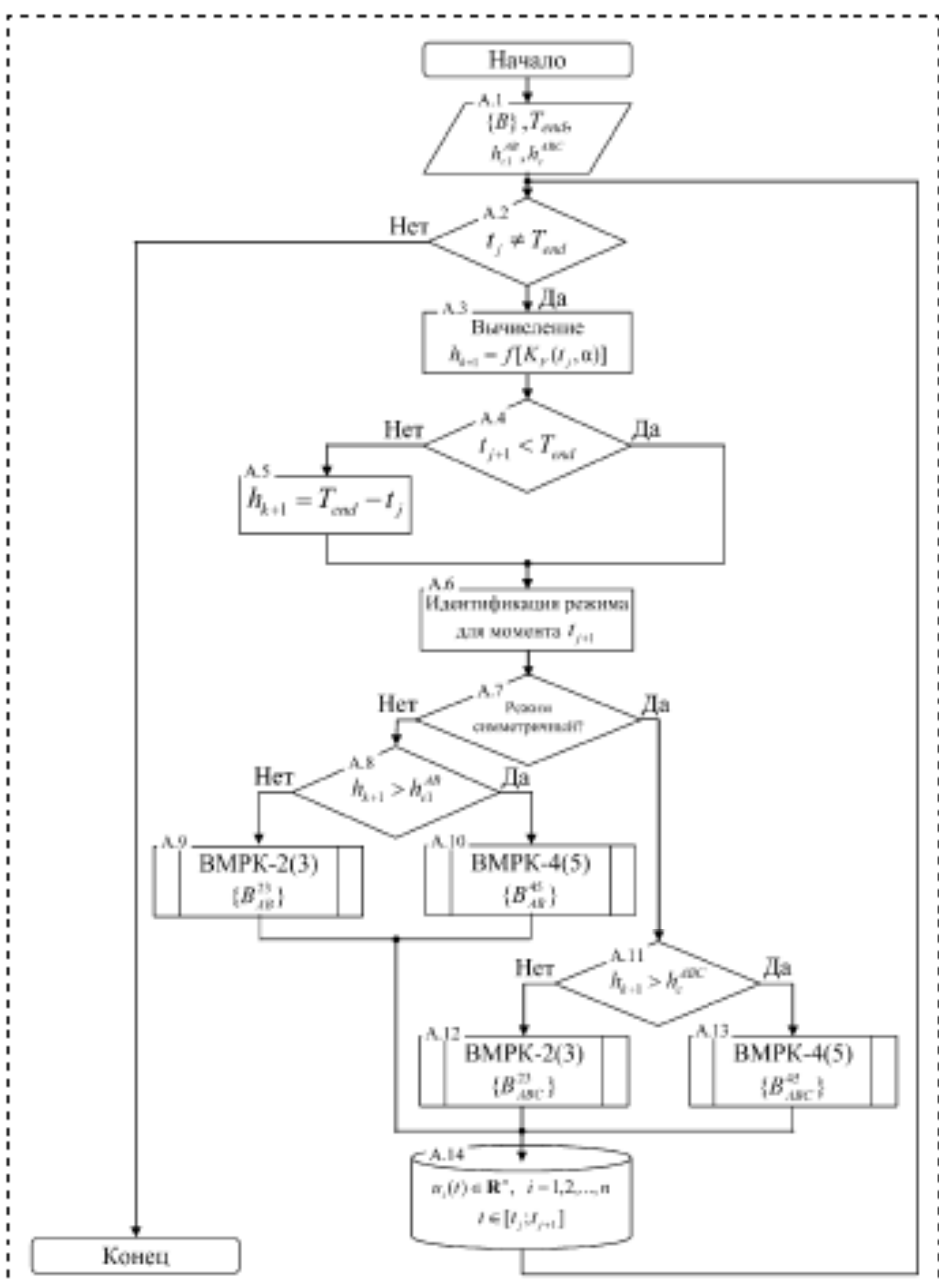


Рис. 6. Гибридный алгоритм интегрирования модели СИФУ-ТПН-АД

чения импульсной коммутационной функции ( $K_F$ ) (А. 3). Если интегрирование осуществляется в окрестности  $T_{end}$ , то вычисленный шаг  $h_{k+1}$  корректируется так, чтобы не превысить  $T_{end}$  (А. 4, А. 5). Затем осуществляется идентификация режима (симметричный или несимметричный) для момента времени  $t_{j+1} = t_j + h_{k+1}$  (А. 6). В случае несимметричного режима в зависимости от выполнения условия  $h_{k+1} > h_{c1}^{AB}$  (А. 8) используется ВМРК-2(3) с параметрами алгоритма предсказания шага  $\{B_{AB}^{23}\}$  (А. 9), в противном случае — ВМРК-4(5) Cash&Карп (А. 10) с множеством параметров алго-

ритма предсказания шага  $\{B_{AB}^{45}\}$ . Аналогично выполняется интегрирование на интервале  $t \in [t_j; t_{j+1}]$  для симметричного режима (А.11—А.13). Вектор решения  $u_i(t) \in \mathbb{R}^n$  на интервале  $t \in [t_j; t_{j+1}]$  записывается в выходной массив (А.14).

На рис. 7 приведено сравнение затрат машинного времени ( $T_{mat}$ ) на интегрирование полной модели СИФУ-ТПН-АД на интервале  $t \in [0, T_y^{max}]$  (где  $T_y^{max}$  — наибольшая длительность переходного процесса для всех  $\alpha \in [80, 120]$ ) с использованием встроенной функции *ode45* (MATLAB 7.0®) и предложенного выше гибридного алгоритма. Графики, приведенные на рис. 7, демонстрируют сокращение временных затрат на моделирование динамики СИФУ-ТПН-АД с использованием гибридного алгоритма по сравнению со временем решения аналогичной задачи при использовании встроенной функции *ode45*. В зависимости от значения угла управления  $\alpha$  затраты машинного времени могут быть сокращены с 19,2 до 30 % при среднем значении 27,3 % на интервале  $\alpha \in [80, 120]$ .

### Заключение

В статье предложен подход к снижению затрат машинного времени при моделировании динамики системы импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем напряжения асинхронного двигателя (СИФУ-ТПН-АД). С этой целью предложено формирование узкоспециализированного "гибридного" алгоритма, адаптирующего метод интегрирования к текущему состоянию модели. Выбор методов интегрирования обосновывается исходя из критерия минимизации времени интегрирования с учетом выполнения требования устойчивости разностной схемы и заданной точности интегрирования. Текущее состояние модели СИФУ-ТПН-АД характеризуется режимом подключения АД к сети и временем сохранения этого режима (длительностью ИПС). В частности, было показано, что:





Рис. 7. График зависимости затрат машинного времени на интегрирование модели СИФУ-ТПН-АД на интервале  $t \in [0, T_{max}]$  в функции угла управления  $\alpha$

1) необходимо различать методы интегрирования для симметричных и несимметричных режимов СИФУ-ТПН-АД и четырех подынтервалов постоянства структуры;

2) оптимизация времени интегрирования для всех возможных состояний рассмотренной модели достигается посредством использования двух суб-алгоритмов, реализующих адаптивные вложенные методы Рунге—Кутты ВМК-2(3) и ВМК-4(5) Cash&Karp;

3) реализация гибридного алгоритма в среде *MATLAB 7.0®* позволяет снизить затраты машинного времени до 30 % по сравнению с решением аналогичной задачи с использованием встроенной функции *ode45*.

Таким образом, использование гибридного алгоритма позволяет снизить затраты машинного времени в ходе автоматизированного исследования динамики импульсных систем преобразования энергии, которые на интервалах постоянства структуры представляются в форме систем нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Далее, поскольку коэффициенты алгоритмов управления длиной шага интегрирования в ВМК-2(3) и ВМК-4(5) Cash&Karp задаются в некотором диапазоне, то оптимальным выбором указанных коэффициентов из заданного диапазона может быть достигнуто дальнейшее сокращение затрат машинного времени. Решению этой задачи будет посвящена вторая статья цикла.

#### Список литературы

1. Брадлацкий И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / М: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
2. Глазко Т. А., Храсанов В. И. Полупроводниковые системы импульсного асинхронного электропривода малой мощности. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 176 с.
3. Nonlinear phenomena in power electronics. Attractors, bifurcation, chaos, and nonlinear control / Edited by S. Banerjee, G. Verghese // IEEE Press, New York, 2001. 441 p.
4. Брадлацкий И. Я., Костылев А. В., Мезушова Д. В. Методы синтеза систем управления асинхронными электроприводами с использованием нейронных сетей // Тр. междунар. 13-й науч.-техн. конф. "Электроприводы переменного тока". 15–18 марта 2005 г. Екатеринбург, 2005. С. 57–59.
5. Forcés J. The Speculative Method of Transient State Analysis with a Variable Integration Step // Proc. of the International Conference on Parallel Computing in Electrical Engineering (PARELEC'02) 2002 IEEE. 5 p.
6. Butcher J. C. Numerical Methods for Ordinary Differential Equations. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 425 p.
7. Gdchof K., Vyncke T., De Belle F., Vandervelde L. and Melkebeek J. Embedded Runge—Kutta Methods for the Numerical Solution of an Integrated Model Including Converter, Nonlinear Inductance and Current Control Loop // 6th Intern. Conf. on Computational Electromagnetics, CEM 2006. 4–6 April 2006. Aachen, Germany.
8. De Flaviis F., Coedoli R. Combined Mechanical and Electrical Analysis of a Microelectromechanical Switch for RF Applications [Electronic source]. Department of Electrical Engineering & Computer Science. The University of California, the Henry Samueli School of Engineering, 2005 —. — Access mode: <http://www.ece.uci.edu/rfmems/publications/papers/mems/C021-EUMTT99.pdf>.
9. Barrade P. Simulation tools for Power Electronics: Teaching and Research [Electronic source] / Laboratoire d'Electronique Industrielle Departement Electricite Ecole Polytechnique Federale de Lausanne CH-1015 Lausanne, Switzerland, 2006 —. — Access mode: [http://eiwww.epfl.ch/publications/barrade\\_workshop\\_simplorer\\_01.pdf](http://eiwww.epfl.ch/publications/barrade_workshop_simplorer_01.pdf).
10. Irwin G., Woodford D., Gale A. Precision Simulation of PWM Controllers. [Electronic source] / Manitoba HVDC Research Centre performs innovative research and development in HVDC and power electronic technologies, instrumentation, and simulation, 2006 —. — Access mode: <http://www.hvdc.ca/pdf/misc/IPST1231.pdf>.
11. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 432 с.
12. Илани В. А., Сидлев П. К. Численные методы для физиков теоретиков. В 2 т. Т. 2. Москва—Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 118 с.
13. Колоколов Ю. В., Мельков А. Ю., Цуканов В. Г. Математическая модель асинхронного двигателя при несимметричном подключении к сети // Материал 2-й междунар. науч.-техн. конф. "Информационные технологии в науке, образовании и производстве". 25–26 мая 2006 г. Орел, 2006. С. 67–69.
14. Quarteroni A., Riccardo S., Saleri F. Numerical Mathematics. New York: Springer-Verlag, 2000. 654 p.
15. Hoffman D. Numerical Methods for Engineers and Scientists. New York: Marcal Dekker. Inc., 2001. 823 p.
16. Verner J. A. Classification Scheme for Studying Explicit Runge—Kutta Pairs. Canada: Queen's University at Kingston, 1992. 25 p.
17. Verner J. A. Contrast of a New RK56 pair with DP56. Canada: Department of Mathematics. PIMS. Simon Fraser University, 2005. 14 p.
18. High-grade steel absolute multi-turn shaft encoder, Baumer electric. [Electronic source], 2006 —. — Access mode: [http://www.baumerelectric.com/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Winkel\\_und\\_Positionsmesssysteme/en\\_E-3.38\\_BEMV.pdf](http://www.baumerelectric.com/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Winkel_und_Positionsmesssysteme/en_E-3.38_BEMV.pdf)