

# МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АДАПТИВНЫМ ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В CASPOC

Светлана Юрьевна МОЛЧАНОВА родилась в городе Москве. Аспирантка МАИ. Основные научные интересы — в области электромеханических комплексов и систем. Автор пяти научных работ.

Svetlana Yu. MOLCHANOVA, was born in Moscow. She is Post-Graduate Student at the MAI. Her research interests are in electro-mechanical systems. She has published 5 technical papers.

*Работа посвящена поиску законов и параметров регулирования асинхронным электроприводом с векторным инвертором напряжения. Модель построена в программной среде CASPOC. Моделирование выполнено при различных критериях оптимальности и ограничениях зон управления. Параметры регулирования представлены логическими функциями управления для реализации программы специализированного микроконтроллера.*

## Введение

Актуальной проблемой управления электроприводами является повышение точности и достижение предельных динамических и энергетических возможностей при регулировании момента и скорости. Управление электромагнитным моментом и частотой вращения в электроприводах переменного тока осуществляется по способу амплитудно-частотного регулирования — это частотное и частотно-токовое, векторное и трансвекторное управление [1, 2]. Во всех этих случаях для улучшения формы питающих асинхронный двигатель (АД) токов и амплитудного регулирования применяется ШИМ. Векторное и трансвекторное управление позволяет заметно улучшить качество управления асинхронным приводом (АП), обеспечить «гибкость» в управлении, достичь максимального уровня по различным критериям при заданных ограничениях. В качестве критериев оптимизации управления могут быть выбраны, например, такие, как минимум потерь, максимум выходной механической мощности, максимум отношения момента к току при ограничении тока, оптимизация частотно-управляемого АД по минимуму потерь, оптимальное управление напряжением и частотой по динамическим показателям, векторная оптимизация асинхронного электропривода [3].

Известные методы и структуры оптимального векторного управления обеспечивают необходимое качество регулирования только при строго постоянных параметрах самого привода, нагрузки режима работы и внешних воздействий. Однако в реальных условиях эксплуатации параметры не остаются

неизменными, что требует постоянной коррекции настройки схемы управления и в ряде случаев ограничивает применение рассматриваемых приводов. Разработка адаптивных алгоритмов управления значительно расширяет сферу применения АД, позволяя корректировать параметры управления в соответствии с внешними условиями и режимами работы АД [3].

В статье рассматриваются вопросы разработки методики построения адаптивных законов векторного управления АД на основе компьютерной модели и управляющих логических функций, а также способа их реализации в виде программы для управляющего микроконтроллера.

## 1. Разработка модели асинхронного электропривода

Структура рассматриваемого электропривода с векторным управлением представлена в виде блок-схемы на рис. 1. В ее состав входит трехфазный асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором, блок нагрузки (Н), автономный инвертор напряжения (АИН), система управления (СУ), включая специализированный микроконтроллер (СМК), который обеспечивает реализацию закона

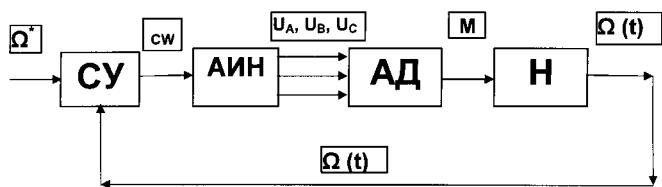


Рис. 1. Структура электропривода с векторным управлением

регулирования, векторное управление и формирование ШИМ сигнала для АИН.

Входными сигналами для системы управления являются: управляющее слово — CW,  $\Omega(t)$  — мгновенная скорость вращения на валу;  $\Omega^*$  — заданный закон изменения частоты вращения.

Модель привода с векторным управлением, разработанная в программной среде CASPOC, изображена на рис. 2, где

*a* — асинхронный двигатель и нагрузка; *b* — тиристорный инвертор; *в* — блок, имитирующий эффект вытеснения тока в обмотке ротора; *г* — блок, имитирующий механическую нагрузку; *д* — блок управления частотой и амплитудой питающего напряжения. В качестве силовых элементов (двигатель, транзисторный инвертор) использованы макросы встроенной библиотеки CASPOC. Блоки, реализующие требуемый закон управления, широтно-импульсную модуляцию и имитирующие механическую нагрузку, блок вытеснения тока ротора, собраны из элементов по оригинальным схемам.

Построение законов управления в работе выполнено в два этапа: на первом этапе на основании выбранного критерия методами, описанными в [1], строится закон, приведенный в [3], и структура схемы:

$$U = A + B \cdot f \cdot \sqrt{C + D \cdot f^2},$$

где *A* — определяется опытным путем;

$$B = \frac{U_H}{f_H \cdot p}; \quad C = \frac{X \cdot p^2}{M_H}; \quad D = 4 \cdot \pi^2 \cdot Y \cdot (1 - s_H)^2;$$

$U_H$  — номинальное напряжение, В;  $f_H$  — номинальная частота, Гц; *p* — число пар полюсов; *X* и *Y* — коэффициенты «вентиляторной» нагрузки;  $M_H$  — номинальный момент, Н·м;  $s_H$  — номинальное скольжение.

Коэффициенты определяются путем эксперимента для ряда наиболее важных режимов. Это, в свою очередь, дало возможность создать методику,

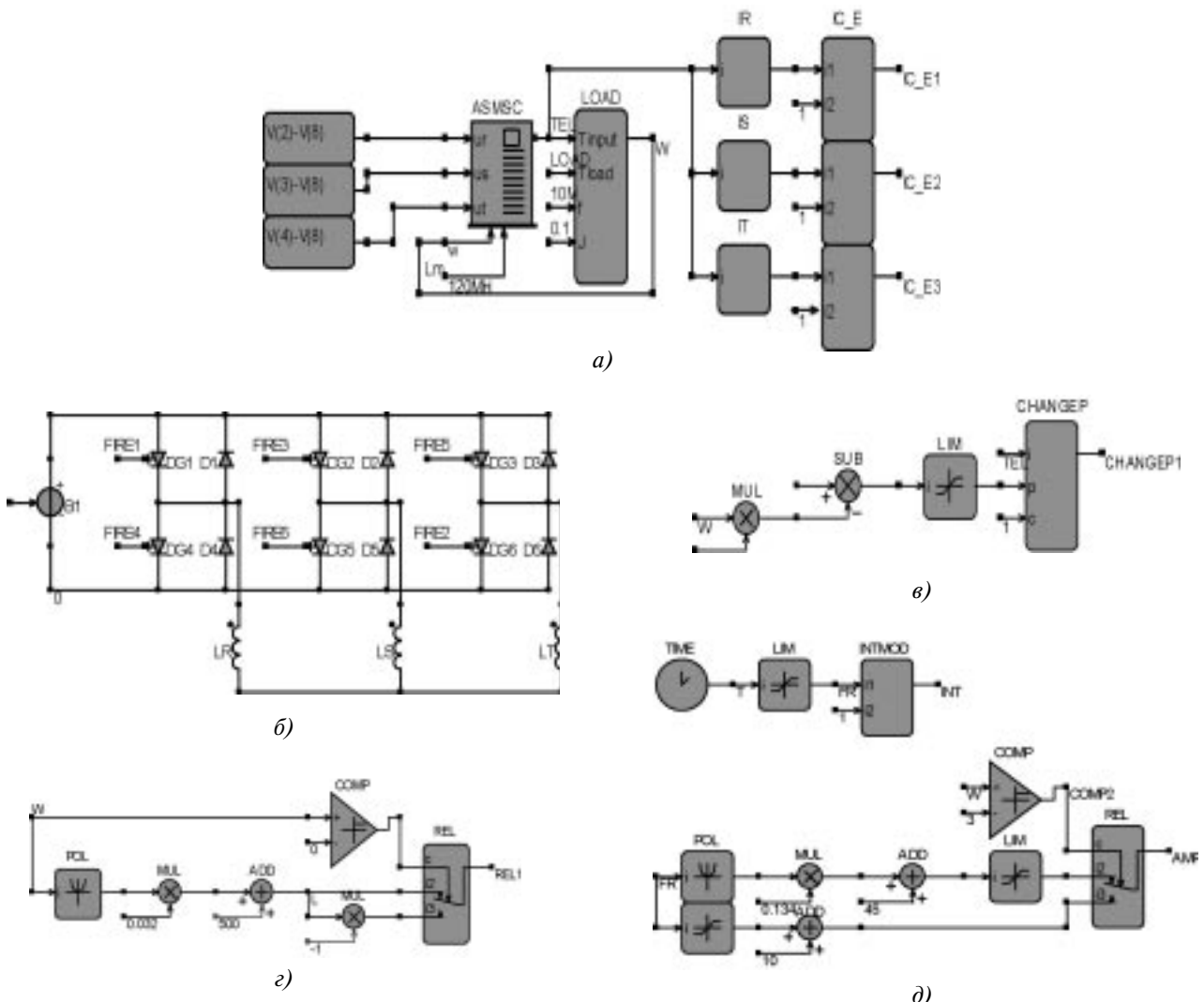


Рис. 2. Модель привода

позволяющую синтезировать оптимальные законы управления с точки зрения динамических характеристик.

На втором этапе эта зависимость в виде модели привода и схемы управления исследуется методом факторного анализа. На основании серии модельных расчетов определяется влияние выбранных факторов на динамические режимы. В алгоритм управления вводятся дополнительные связи, обеспечивающие коррекцию законов управления в соответствии с флуктуациями параметров силовой схемы привода. Далее строится алгоритм ШИМ управления в виде аналитической функции булевых переменных для микроконтроллера [2].

Для построения и отладки адаптивных алгоритмов векторного управления в данной работе выполнено моделирование асинхронного привода в спе-

циализированной программной среде CASPOC [5]. Разработка адаптивных алгоритмов требует формализации записи законов управления. Эффективным аппаратом для этих целей является применение управляющих логических функций и аппарата булевой алгебры [2]. Этот подход применен и в данной работе.

*Реализация законов управления.* Алгоритм управления строится в зависимости от закона и способа управления в координатах потока ротора или напряжения статора. При этом осуществляется переход в систему координат  $d, q$  и обратно в фазную, для чего используются блоки прямого и обратного преобразования координат. Для управления ключами инвертора формируются импульсные двуполярные напряжения фаз управления регулируемой во времени частоты и с регулируемым сдвигом по

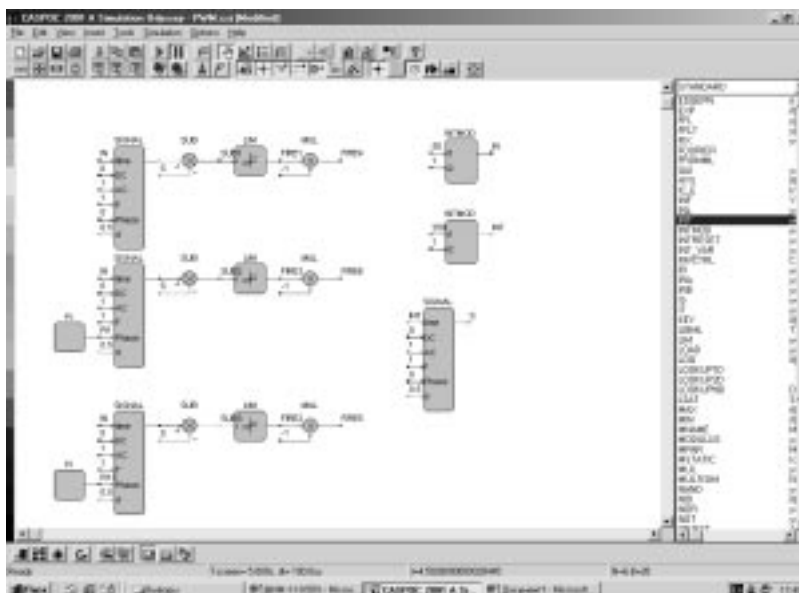


Рис. 3. Система управления с фронтальной ШИМ

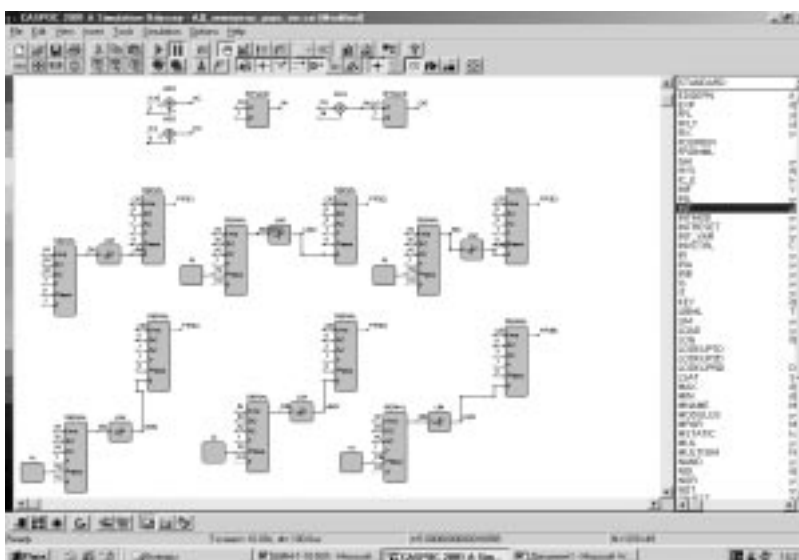


Рис. 4. Система управления с центральной ШИМ

фазе. Законы управления описываются управляющими логическими функциями (УЛФ) согласно методике [2]. Различные способы формирования ШИМ в CASPOC приведены на рис. 3 и 4, где

1 — элементы, задающие пределы изменения ширины импульса (от 0 до 1), фактически имитируют глубину модуляции; 2 — генераторы частот, модулирующая частота кратна несущей.

## 2. Результаты моделирования

С помощью построенной модели были выполнены исследования пусковых режимов и определены оптимальные законы управления приводом пневмокомпрессора электропоезда, имеющего следующие параметры. *Инвертор имеет следующие уровни выходных величин:* выходное трёхфазное напряжение — 220 В (линейное), 50 Гц, номинальная выходная мощность — 15 кВт, максимальная выходная мощность — 20 кВт. Потребляемый ток при постоянном напряжении 280 В — не более 50 А. *Применяемый в приводе тип двигателя — 4A160S6УЗ.* Параметры двигателя: напряжение питания двигателя (фазное) — 220 В, частота тока сети — 50 Гц, синхронная частота вращения — 1000 об/мин, номинальная мощность на валу двигателя — 11 кВт, максимальная мощность на валу двигателя — 20 кВт. Номинальный коэффициент полезного действия —

0,87, скольжение при номинальной нагрузке — 0,023, номинальный ток статора —  $(19 - i3)$  А.

*Нагрузкой* двигателя является компрессор поршневого типа. Датчик давления пневмосистемы измеряет давление в ней. Он настроен таким образом, что подает сигнал на включение компрессора при давлении в пневмосистеме ниже 6 атм. и снижает его при достижении давления 8 атм. В связи с этим режим работы мотор-компрессора — повторно-кратковременный. Он работает в течение 40 с с промежутком в 2 мин.

Анализ результатов моделирования пусковых режимов АД представлен в таблице, где

- $M_{ст}$  — момент сухого трения, Н·м;
- $M^m$  — максимальный момент двигателя, Н·м;
- $M^n$  — установившийся момент двигателя, Н·м;
- $I^s_m$  — максимальный ток статора, А;
- $I^s_n$  — установившийся ток статора, А;
- $T_{уст}$  — время выхода на установившийся режим, с;
- $T_{зад}$  — время задержки пуска, с.

На основании данных эксперимента для рассматриваемого двигателя (привода компрессора) при выбранном законе управления частотой на валу двигателя  $\Omega^*$  были выбраны оптимальные параметры (A, B, C, D) закона управления амплитудой напряжения  $U(f)$  в пусковом режиме по следующим критериям:

- кратность пускового тока не более 1,1;

АД с питанием от инвертора при различных параметрах закона управления

$M_{ст}$	$M^m_{max}$	$M^m_{min}$	$M^n_{max}$	$M^n_{min}$	$I^s_m$	$I^s_n$	$T_{уст}$	$T_{зад}$
Регулирование при начальных значениях частоты и амплитуды, равных 10% от номинальных значений								
40	67	43	48,5	37,5	45,5	30	2,5	0,1
50	78	52	59	47	55	35,5	2,5	0,3
65	97,5	73,5	74	61,5	74	45	2,8	0,6
70	Не пускается							
Регулирование при начальных значениях частоты и амплитуды, равных 10% от номинальных значений, с увеличенным вдвое коэффициентом скорости нарастания частоты и амплитуды								
40	95,6	18,5	49	38	60	29	1,3	0,05
50	101	35	59	47	66	34	1,35	0,1
65	107	29	75	61	86,5	41	2,45	0,25
70	Не пускается							
Регулирование при начальном значении амплитуды, равном 10% от номинальных значений и непропорциональном увеличении частоты и амплитуды								
40	105	22	48,5	37,5	48	30	2,6	0,2
50	101	32	59	47	50	35,5	2,5	0,2
60	121	31	69	56	54	41,5	2,9	0,2
70	131	26	80	66	62,5	48,5	3,7	0,35
80	138	20	90	76	76,5	57	3,8	0,35
90	Не пускается.							

- минимальные электрические потери;
- максимальный КПД;
- пульсации момента в пусковом режиме относительно номинального не более 30%.

Полученные на модели эпюры управляющих и электрических силовых сигналов приведены на рис. 5–7.

Осциллограммы момента и частоты вращения ротора пускового и установившегося режимов привода компрессора приведены на рис. 8. Отправной точкой для оценки влияния различных способов ШИМ управления на пусковые характеристики являются характеристики при гармонических фазных напряжениях питающих АД для линейного закона регулирования частоты.

На рис. 8,а приведены характеристики при гармонических питающих напряжениях; на рис. 8,б — импульсных питающих напряжениях, а также фазный ток в одной из фаз обмоток АД при импульсных питающих напряжениях — рис. 8,в.

**Анализ результатов:**

- из графиков видно, что удовлетворительный гармонический состав питающих АД токов обеспечивается на частоте модуляции ШИМ 2–4 кГц;
- разгон двигателя  $\Omega(t)$  осуществляется по закону, близкому к линейному;

- пульсации момента и кратность пускового тока при выбранной частоте находятся в пределах установленных ограничений;

— сопоставление графиков рис. 8,а и 8,б говорит о существенном влиянии ШИМ на характеристики как в пусковых, так и в установившемся режимах и необходимости исследования формы токов при различных способах ШИМ.

Для реализации операций *программного управления* и регулирования, в том числе алгоритма ШИМ управления электроприводов АД, использован специализированный микроконтроллер с цифровым сигнальным процессором (DSP) типа TMS320C24 производства Texas Instruments.

**Выводы**

1. Построена имитационная модель регулируемого асинхронного привода с векторным и трансвекторным управлением в моделирующей среде CASPOC, позволяющая производить расчеты характеристик при различном характере нагрузки, заданных законах управления и различных способах формирования ШИМ.
2. Выполнен анализ динамических процессов при питании асинхронного двигателя импульсным и гармоническим напряжением.

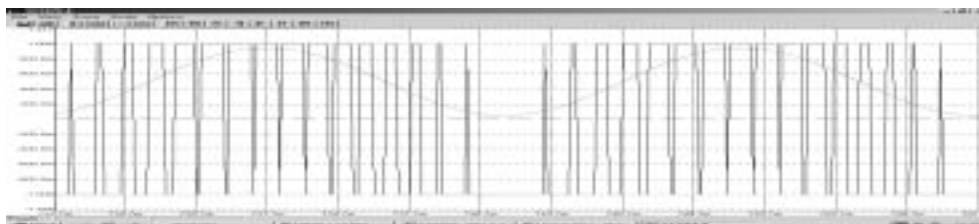


Рис. 5. Форма импульсов управления для центральной ШИМ



Рис. 6. Форма напряжения в фазах



Рис. 7. Форма токов в фазах

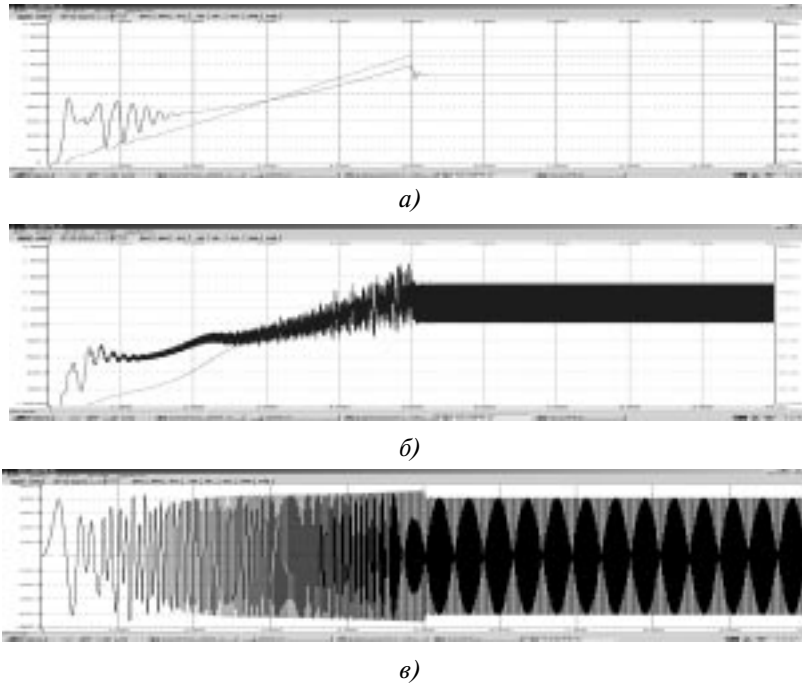


Рис. 8. Осциллограммы пускового и установившегося режимов

3. Выполнено исследование влияния характера нагрузки на выбор параметров закона управления.

4. Предложена методика, позволяющая синтезировать закон управления по частоте  $\omega(t)$  и амплитуде  $U_m(t)$  питающего асинхронный двигатель напряжения при заданных критериях оптимальности и ограничениях.

5. Исследовано ШИМ-управление при «пусковых» режимах работы. Дана сопоставительная оценка фронтальной и центральной ШИМ при работе трансвекторного инвертора с нагрузкой в виде асинхронного двигателя.

#### Summary

A synthesis problem is considered as applies to control laws and parameters for induction motor drive with adaptive control basing on vector voltage inverter. The model which is used to solve the problem is generated in the CASPOC software environment. A simulation is carried out for various performance indices and control constraints. Regulation parameters are presented with logical functions to implement microprograms for some dedicated microprocessor.

#### Библиографический список

1. Мищенко В.А. Теория, способы и системы векторного и оптимального векторного управления электроприводами переменного тока. — М.: Информэлектро, 2002.

2. Электропривод летательных аппаратов: Учебник для авиационных вузов / В.А.Полковников, Б.Н.Петров, Б.Н.Попов, А.В.Сергеев, А.Н.Сперанский; Под общей ред. В.А. Полковникова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990.

3. S.I. Volsky, E. V. Syroezhkin, A. V. Lamanov, D. V. Chuev, A. V. Ostrovsky TRACTION INDUCTION DRIVE FOR RAILWAY. 10th European Conference on Power Electronics and Application, EPE 2003, paper 1107, Toulouse, France 2003. e-mail: epe-association@vub.ac.be.

4. Морозов С.В. Асинхронный электропривод с адаптивным регулятором: Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук. Воронеж, 2000. (AP01- 1322).

5. CASPOC — User Guide. Version 2001. A simulation Odyssey. Peter Von Dyssen, 235 p.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 25.03.2008