

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.313.333
EDN: HCRGKN

К.М. Шляпцев

Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

СИСТЕМА СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ШЕСТИФАЗНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Объект и цель научной работы. Объект исследований – шестифазный (двухобмоточный) асинхронный двигатель с трехфазной короткозамкнутой обмоткой ротора, использующийся в судах нового поколения. Цели – разработка виртуальной системы скалярного управления объектом и исследование его переходных процессов в режиме пуска с нагрузкой.

Материалы и методы. Исходными данными являются научно-техническая информация, представленная в трудах по моделированию электрических машин, а также личные наработки автора. В качестве материального обеспечения служит программная среда моделирования Matlab/Simulink.

Основные результаты. Основной результат – разработанная модель системы скалярного управления двигателем, которая позволяет поддерживать требуемую точность технических характеристик и исследовать переходные процессы двигателя при различных режимах эксплуатации. Алгоритм управления дает возможность синхронизировать независимо работающие друг от друга автономные инверторы. Математическая модель двигателя позволяет провести анализ переходных процессов в двигателе при несимметричных параметрах статорных и роторной обмоток.

Заклучение. Ценность практического результата заключается в том, что он может быть использован в ходе проведения различных виртуальных экспериментов, связанных с гребными многообмоточными асинхронными электроприводами.

Ключевые слова: шестифазный асинхронный двигатель, скалярное управление, естественные координаты, фазные координаты, матрицы, векторы.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

UDC 621.313.333
EDN: HCRGKN

K.M. Shlyaptsev

SET Branch of the Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

U/F CONTROL SYSTEM FOR A SIX-PHASE INDUCTION MOTOR

Object and purpose of research. The object of this study is a six-phase (two-winding) induction motor with a three-phase squirrel cage rotor winding used in the ships of new generation. The purpose is to develop a virtual system of U/f control and investigate transient processes in the load start mode.

Materials and methods. The initial data are technical information contained in papers dealing with electric machine simulations as well as personal exploratory work of the author. Matlab/Simulink software is employed for the simulation.

Main results. The main result is a model of U/f control system for the motor making it possible to maintain the required accuracy of technical characteristics and investigate transient processes in the motor under various modes of operation. The control algorithm enables synchronization of invertors operating independently from each other. The mathematical model of the motor makes it possible to analyze transient processes in the motor under asymmetric parameters of stator and rotor windings.

Для цитирования: Шляпцев К.М. Система скалярного управления шестифазным асинхронным двигателем. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 1(415): 95–102.

For citations: Shlyaptsev K.M. U/f control system for a six-phase induction motor. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 1(415): 95–102 (in Russian).

Conclusion. The practical value of these investigation is that the results can be used in various virtual experiments related to multi-winding induction motors.

Keywords: six-phase induction motor, U/f control, natural coordinates, phase coordinates, matrices, vectors.
The author declares no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Математическое моделирование шестифазного асинхронного двигателя произведено с помощью фазных (естественных) координат, где входные воздействия, переменные состояния и параметры представлены в виде матрично-векторной формы [1]. Для наглядности ниже представлена обобщенная система уравнений электромагнитного равновесия статора и ротора асинхронного двигателя [2]:

$$\begin{cases} \overline{U_s} = R_s \times \overline{I_s} + \frac{d\overline{\Psi_s}}{dt}, \\ \overline{U_r} = R_r \times \overline{I_r} + \frac{d\overline{\Psi_r}}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\overline{U_s}$ и $\overline{U_r}$ – векторы-столбцы фазных напряжений статора и ротора (отвечают за входные воздействия в математической модели двигателя), R_s и R_r – диагональные матрицы активных сопротивлений фаз статора и ротора (параметры), $\overline{I_s}$ и $\overline{I_r}$ – векторы-столбцы фазных токов статора и ротора (переменные состояния), $\overline{\Psi_s}$ и $\overline{\Psi_r}$ – векторы-столбцы потокоцеплений статора и ротора (переменные состояния).

Следовательно, для шестифазного асинхронного двигателя уравнение электромагнитного равновесия статора примет вид:

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \\ U_{sd} \\ U_{se} \\ U_{sf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{sd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{se} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{sf} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ I_{sd} \\ I_{se} \\ I_{sf} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \\ \Psi_{sd} \\ \Psi_{se} \\ \Psi_{sf} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Вектор-столбец фазных напряжений ротора – нулевой, т.к. ротор короткозамкнутый. Уравнение электромагнитного равновесия ротора принимает вид:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \Psi_{rc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Данная интерпретация позволяет исследовать различные конструкционные особенности в многообмоточных асинхронных двигателях, такие как фазный ротор либо ротор с двойной беличьей клеткой [3]. Также возможно провести анализ переходных процессов в двигателе при несимметричных параметрах статорных и роторной обмоток.

Разработка системы управления

Development of control system

Скалярное регулирование асинхронного двигателя в данном случае основано на законе управления – $U/f^2 = \text{const}$, т.к. характер нагрузки двигателя – вентиляторный [4, 5]. Для более плавного пуска и точной поддержки скорости вращения ротора при установившемся режиме работы предлагается использовать двухконтурную замкнутую систему управления. Внешний контур – по обратной связи с датчика оборотов двигателя, внутренний – с датчиков токов статора. На рис. 1 изображена структурная схема системы скалярного управления шестифазным асинхронным двигателем.

Рассмотрим подробнее алгоритм управления. Для начала введем некоторые пояснения: *ref* = = *reference* = заданный; *fact* = *factual* = фактический.

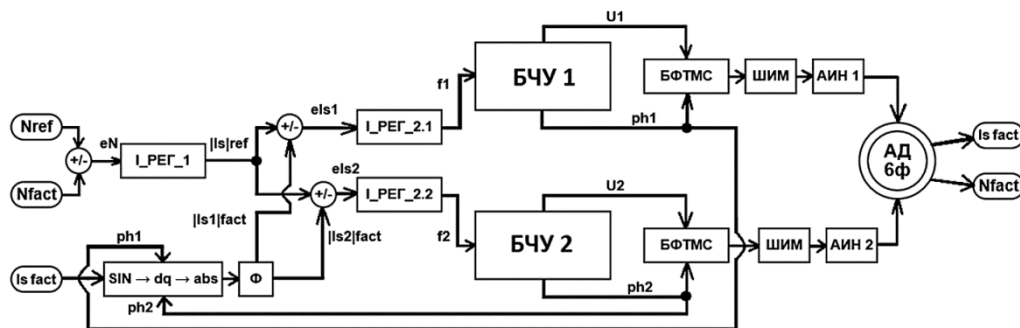


Рис. 1. Структурная схема системы

Fig. 1. System's block diagram

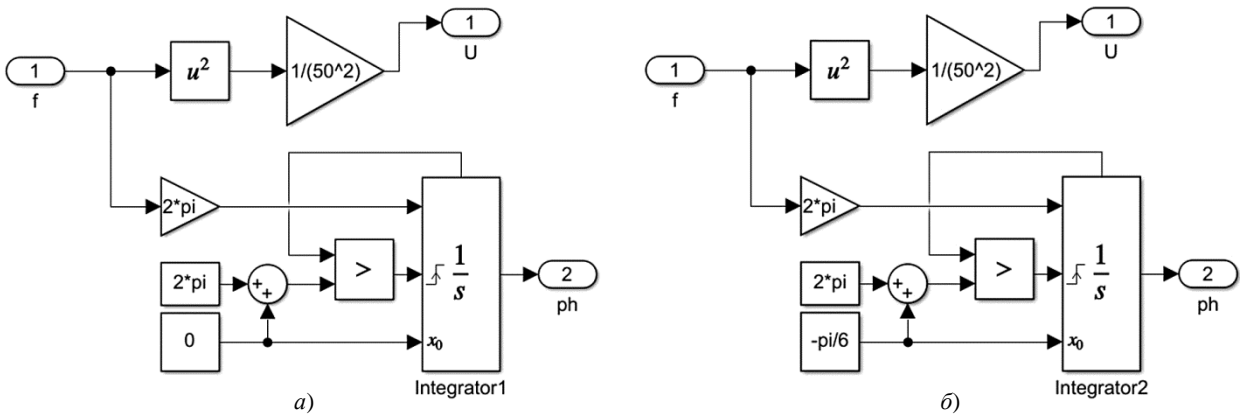


Рис. 2. Алгоритм работы блока частотного регулирования в среде Matlab/Simulink: а) управление АИН № 1 (БЧУ 1); б) управление АИН № 2 (БЧУ 2). u^2 – математический оператор возведения в квадратную степень. Вход блока: 1 – f ; выходы блока: 1 – U ; 2 – ph

Fig. 2. Algorithm of frequency control unit in Matlab/Simulink: а) control AIN No. 1 (BChU 1); б) control AIN No. 2 (BChU 2). u^2 – mathematical quadratic operator. Unit input: 1 – f ; unit outputs: 1 – U ; 2 – ph

Заданное номинальное значение оборотов (N_{ref}) сравнивается с фактическими оборотами с датчика (N_{fact}). В результате сравнения получается ошибка регулирования (eN), которая после преобразования интегральным регулятором (I_PEG_1) становится заданным значением модуля тока статора для обеих обмоток ($|Is|_{ref}$). Далее идет сравнение заданного модуля тока статора ($|Is|_{ref}$) и фактических абсолютных значений токов статорных обмоток ($|Is1|_{fact}$ и $|Is2|_{fact}$). На выходах сумматоров получаются ошибки регулирования ($eIs1$ и $eIs2$), которые после преобразования интегральными регуляторами (I_PEG_2.1 и I_PEG_2.2) становятся частотами питания обмоток статора ($f1$ и $f2$).

Далее эти сигналы поступают на входы блоков частотного управления (БЧУ 1 и БЧУ 2), чей алго-

ритм действия показан на рис. 2, где по закону регулирования формируются амплитуды управляющих напряжений ($U1$ и $U2$), а также происходит формирование фазовых углов ($ph1$ и $ph2$). Данные сигналы ($U1$ и $U2$, $ph1$ и $ph2$) поступают в блок формирования трехфазного модуляционного сигнала (БФТМС), который далее сравнивается с опорным пилообразным сигналом в блоке широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

На выходе блока формируются управляющие импульсные последовательности, которые поступают на транзисторы в трехфазных двухуровневых автономных инверторах напряжения (АИН № 1 и АИН № 2). Токи статорных обмоток (Is_{fact}) с датчиков поступают на блок координатного преобразования Парка – Горева ($SIN \rightarrow dq \rightarrow abs$), на

Fig. 3. Unit $SIN \rightarrow dq \rightarrow abs$ in Matlab/Simulink.

u^2 – mathematical quadratic operator; \sqrt{u} – mathematical square root operator.

Unit inputs: 1 – Is ; 2 – $Ph1$; 3 – $Ph2$;
unit outputs: 1 – $|Is1|$;
(2) – $|Is2|$

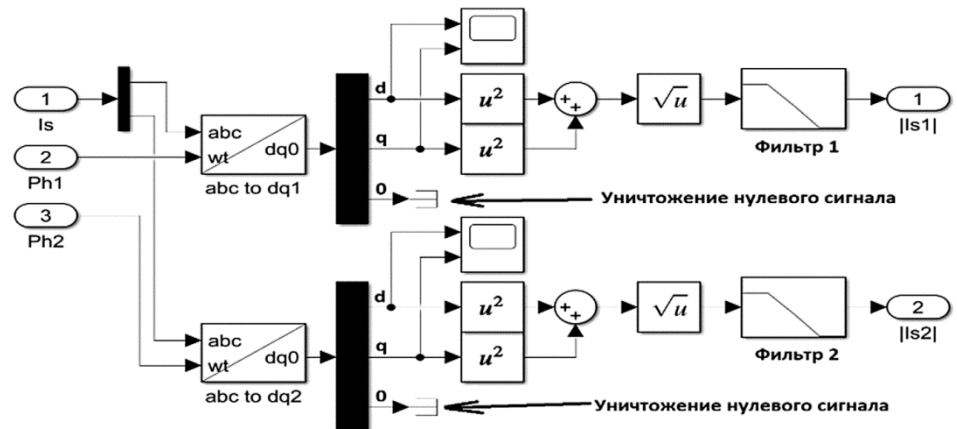


Рис. 3. Блок $SIN \rightarrow dq \rightarrow abs$ в среде Matlab/Simulink. u^2 – математический оператор возведения в квадратную степень; \sqrt{u} – математический оператор квадратного корня. Входы блока: 1 – Is ; 2 – $Ph1$; 3 – $Ph2$; выходы блока: 1 – $|Is1|$; (2) – $|Is2|$

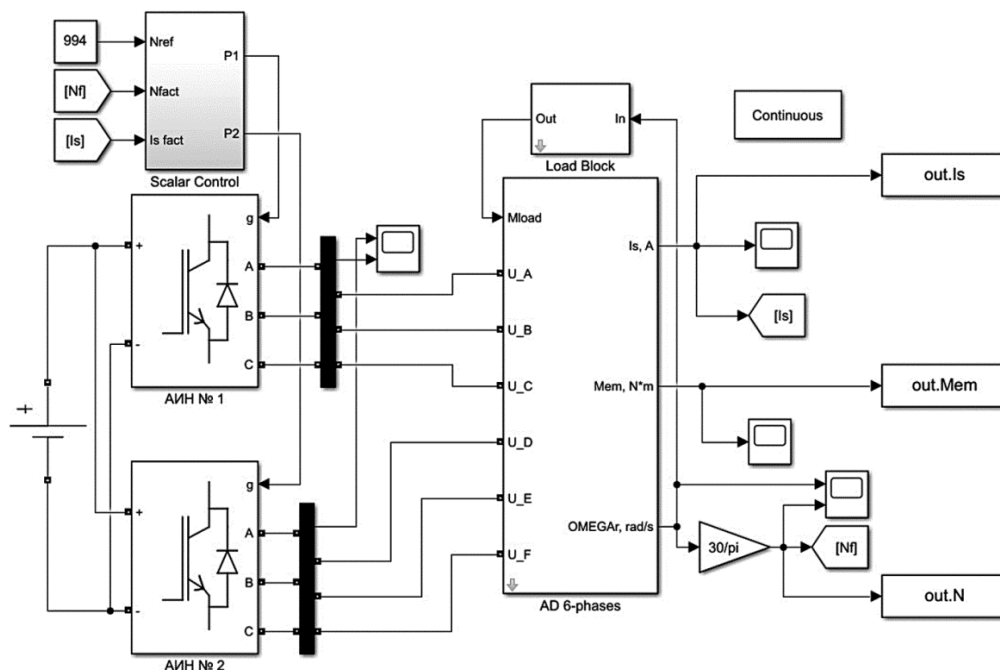


Рис. 4. Виртуальный стенд в среде Matlab/Simulink
Fig. 4. Virtual setup in Matlab/Simulink

выходе которого вычисляются их модули. На рис. 3 показан алгоритм работы данного блока. Нежелательные пульсации в сигналах фильтруются. В качестве фильтра (Φ) использовано апериодическое звено с постоянной времени: $\tau = 0,001$ с.

Блоки Integrator 1 и 2 интегрируют входные сигналы в виде скоростей вращения магнитных полей статора $= 2\pi f$. После того как электрические углы полей достигают значений 2π и $2\pi - \pi/6$, соответственно в блоках Integrator 1 и 2, сигналы обрываются до начальных условий и преобразование

Таблица 1. Основные технические характеристики асинхронного двигателя Schorch (модель KL6538B-AS06)

Table 1. Main data of induction motor Schorch (model KL6538B-AS06)

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность двигателя, кВт	2400
КПД двигателя, %	96,5
Номинальное действующее напряжение статора, В	960
Номинальная частота напряжения статора, Гц	50
Номинальный действующий ток статора, А	871
Номинальный момент, Н·м	23 060
Номинальная частота вращения, об/мин	994

происходит заново. Начальные условия интегрирования для блока Integrator 1 = 0, для блока Integrator 2 = $-\pi/6$, т.к. учитывается сдвиг фаз между двумя обмотками статора.

Шесть сигналов с датчиков тока статора 1 – I_s разбиваются мультиплексором (черный прямоугольник) на две группы по три сигнала. Таким образом происходит дальнейший расчет модулей токов в обмотках ABC и DEF соответственно.

Моделирование переходных процессов при номинальной нагрузке

Modeling of transient processes at rated load

На рис. 4 показан виртуальный испытательный стенд, состоящий непосредственно из математической модели шестифазного асинхронного двигателя (AD 6-phases), блока вентиляторной нагрузки (Load Block) и двух источников напряжения (АИН № 1 и АИН № 2), управляемых блоком Scalar Control. Осциллографы снимают переходные процессы. У второго источника напряжения относительно первого сдвиг фаз 30° или $\pi/6$ радиан. В качестве исследуемого объекта взят двигатель фирмы Schorch, модель KL6538B-AS06 и его паспортные данные (табл. 1).

На рис. 5 представлен реализованный алгоритм работы блока Scalar Control.

В блоках ABC_mod и DEF_mod происходит формирование трехфазных синусоидальных сигналов. Далее в каждый сигнал вводится третья гармоника, т.е. происходит наложение. В результате на выходах блоков формируются управляющие модифицированные трехфазные синусоидальные сигналы. Это обусловлено необходимостью полного использования питания от источника постоянного напряжения. В итоге модуляционные сигналы попадают в блоки PWM Generator (2-Level) 1 и 2, где происходит их сравнение с пилообразным сигналом частотой 1180 Гц, в результате которого формируются управляющие воздействия для инверторов.

Двигатель с вентиляторной нагрузкой на валу разгоняется. На рис. 6–10 (рис. 6 см. вклейку) показаны переходные процессы и временные развертки токов статора, частот питания статора, фаз статора (электрических углов вращения магнитных полей), электромагнитного момента и частоты вращения ротора соответственно.

За счет применения интегральных регуляторов получен плавный монотонный переходный процесс в виде роста токов статора и выхода их на установившейся номинальный режим. Для достижения большей скорости переходных процессов и точности поддержания установившихся характеристик можно применить пропорционально-интегральные, пропорционально-интегрально-дифференциальные и другие виды регуляторов.

Временная развертка на рис. 7 (см. вклейку) показывает, что ошибка поддержания номинальной частоты питания статора – 0,0038 %, перерегулирование – 0,0076 %.

Временная развертка на рис. 8 (см. вклейку) показывает, что управляющий сигнал фазы для АИН № 2 имеет пространственный сдвиг, равный 30° или

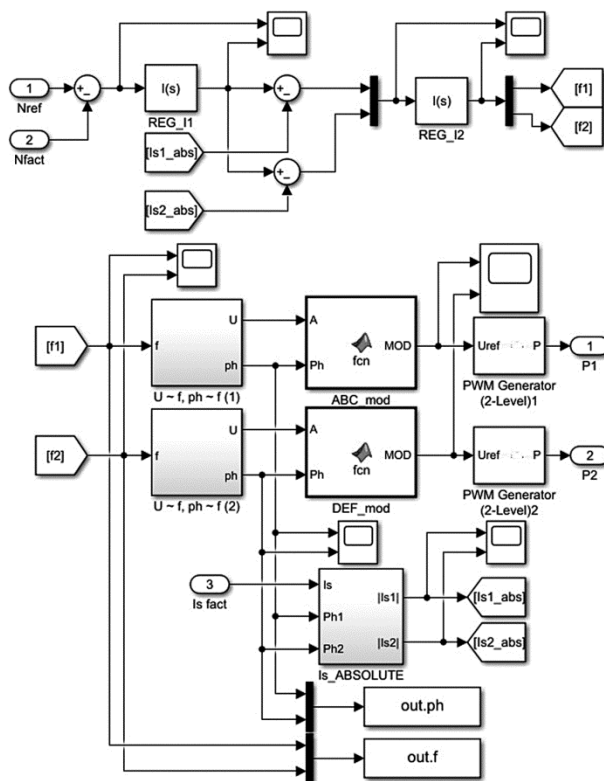


Рис. 5. Система скалярного управления в среде Matlab/Simulink

Fig. 5. U/f control system in Matlab/Simulink

$\pi/6$ радиан. Единовременный рост и обрыв управляющих сигналов говорит о синхронизированной работе АИН № 1 и АИН № 2.

На рис. 9 значительные колебания момента обусловлены колебаниями токов статора. В установившемся режиме работы они не критичны, т.к.

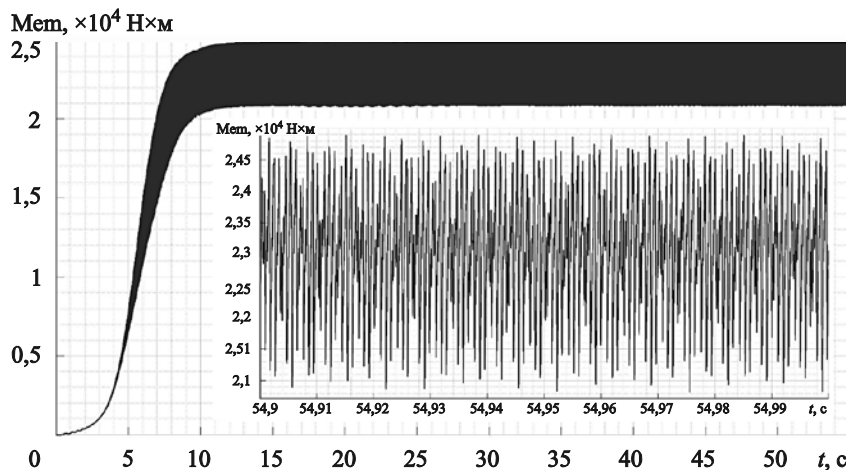


Рис. 9. Электромагнитный момент

Fig. 9. Electromagnetic moment

на виртуальном испытательном стенде не планировалось добавление в электрическую цепь различных *RLC*-фильтров, сглаживающих токи. Другая

причина колебаний момента – скалярное (частотное) управление, математика которого основана на установившемся режиме работы [6]. В дальнейшем

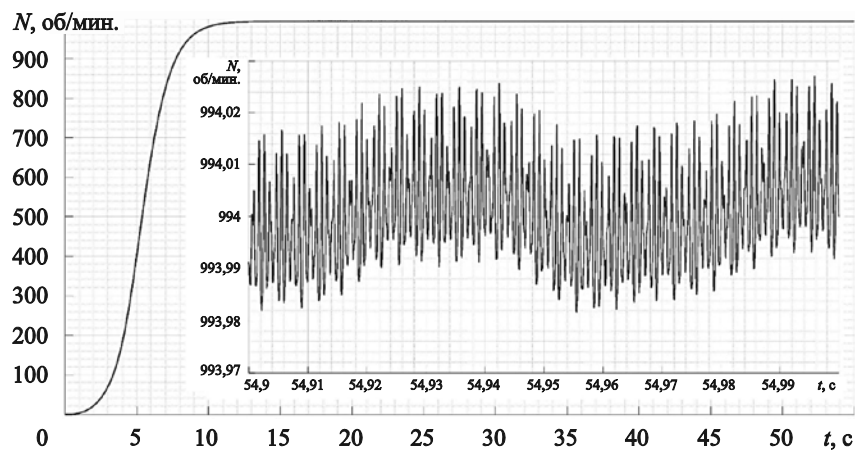
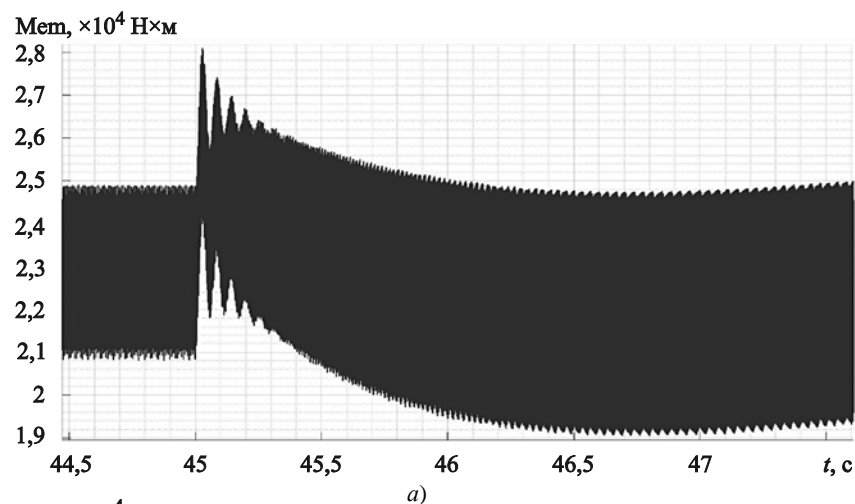
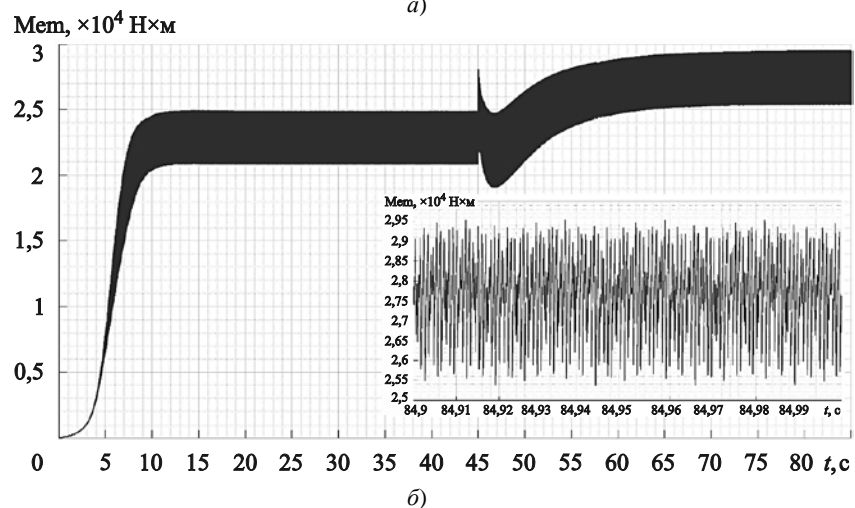


Рис. 10. Частота вращения ротора

Fig. 10. Rotor speed



a)



b)

Рис. 12. Электромагнитный момент: а) скачок момента; б) переходный процесс с выходом на новый установившийся режим

Fig. 12. Electromagnetic moment: a) moment step; b) transient process resulting in a new steady mode

будет разработана система векторного регулирования двигателем, позволяющая минимизировать колебания технических характеристик.

Временная развертка на рис. 10 показывает, что ошибка поддержания номинальных оборотов – 0,0027 %, время разгона ротора до номинала – 33 с.

Установившиеся значения величин, а именно действующие значения токов статора при номинальной нагрузке, электромагнитного момента и оборотов двигателя соответствуют паспортным данным в полной мере.

Моделирование переходных процессов при резком росте нагрузки

Modeling of transient processes at load surge

После выхода двигателя на установившийся режим работы в блоке вентиляторной нагрузки (Load Block) в момент времени 45 с подается ступенчатое воздействие, реализующее резкий рост нагрузки на 20 % от номинала. На рис. 11–13 показана реакция системы управления в виде переходных процессов токов статора, электромагнитного момента, частоты вращения вала соответственно. Также на рисунках представлены временные развертки физических характеристик в момент подачи нагрузки и в новом установившемся режиме.

На рис. 11 (см. вклейку) показан скачок токов в момент подачи нагрузки (*a*) и их монотонное нарастание (*b*). Работа интегральных регуляторов обеспечивает плавность реакции системы управления на возмущающее воздействие. Действующее значение тока увеличилось в 1,1893 раза. Резкий рост токов обусловлен падением противодействующей электродвижущей силы, создаваемой вращением ротора.

На рис. 12 наблюдаются резкий скачок (*a*) и плавное нарастание электромагнитного момента после подачи нагрузки (*b*). Установившееся значение момента превышает номинальное в 1,2 раза.

На рис. 13 (см. вклейку) показано, что в момент подачи нагрузки обороты двигателя проседают до 887 об/мин, но спустя некоторое время поднимаются до нового установившегося режима. Падение скорости по сравнению с номинальным режимом – 0,0191 %.

Заключение

Conclusion

В ходе исследования разработана виртуальная двухконтурная замкнутая система скалярного управления

шестифазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Алгоритм регулирования позволяет синхронизировать два независимо работающих друг от друга инвертора. Полученные графики переходных процессов показывают применимость разработанной системы в судовой электротехнике (гребной электропривод), промышленности и других отраслях.

Список использованной литературы

1. *Шляпцев К.М.* Математическая модель шестифазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором // XIII Научно-практическая конференция с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых : сборник материалов : [В 3 т.]. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. Т. 2. С. 104–108.
2. *Усольцев А.А.* Электрические машины : учебное пособие. Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013. 415, [3] с.
3. *Shlyaptsev K.M.* Transient processes of a six-phase induction motor with a double squirrel cage rotor in the Simintech simulation environment // Proceedings of 2025 Conference of young researchers in electrical and electronic engineering (EIcon 2025). St. Petersburg, 2025. P. 833–835.
4. *Герман-Галкин С.Г.* Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. Санкт-Петербург : Корона-Век, 2008. 367 с.
5. *Волков Н.И., Миловзоров В.П.* Электромашинные устройства автоматики : учебник. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Высшая школа, 1986. 334, [1] с.
6. *Калачев Ю.Н., Самохвалов Д.В.* SimInTech. Основы регулируемого электропривода. (Антиучебник). Москва : ДМК-Пресс, 2023. 236 с.

References

1. *Shlyaptsev K.M.* Mathematical model of a six-phase squirrel cage motor // XIII Science and Practice Conference with international participation “Science of Presence and Future” for undergraduates, postgraduates and young scientists: proceedings: [3 vol.]. St. Petersburg : Izd-vo ETU “LETI”, 2025. Vol. 2. P. 104–108 (*in Russian*).
2. *Usoltsev A.A.* Electrical machines : Teaching aid. St. Petersburg : ITMO University, 2013. 415, [3] p. (*in Russian*).
3. *Shlyaptsev K.M.* Transient processes of a six-phase induction motor with a double squirrel cage rotor in the Simintech simulation environment // Proceedings of 2025 Conference of young researchers in electrical and electronic engineering (EIcon 2025). St. Petersburg, 2025. P. 833–835.
4. *German-Galkin S.G.* Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems. St. Petersburg : Korona-Vek, 2008. 367 p. (*in Russian*).

5. *Volkov N.I., Milovzorov V.P.* Electric machines in automatics : text book. 2^{ed}, revised and complemented. Moscow : Vysshaya Shkola, 1986. 334, [1] p. (*in Russian*).
6. *Kalachev Yu.N., Samokhvalov D.V.* Fundamentals of controlled electric drives (Anti-textbook). Moscow: DMK-Press, 2023. 236 p. (*in Russian*).

Сведения об авторе

Шляпцев Кирилл Михайлович, инженер 2-й категории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. E-mail: k-s-vologd@yandex.ru.

About the author

Kirill M. Shlyaptsev, 2nd Category Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: k-s-vologd@yandex.ru.

Поступила / Received: 22.09.25
Принята в печать / Accepted: 25.02.26
© Шляпцев К.М., 2026

Рис. 6. Токи статора
Fig. 6. Stator currents

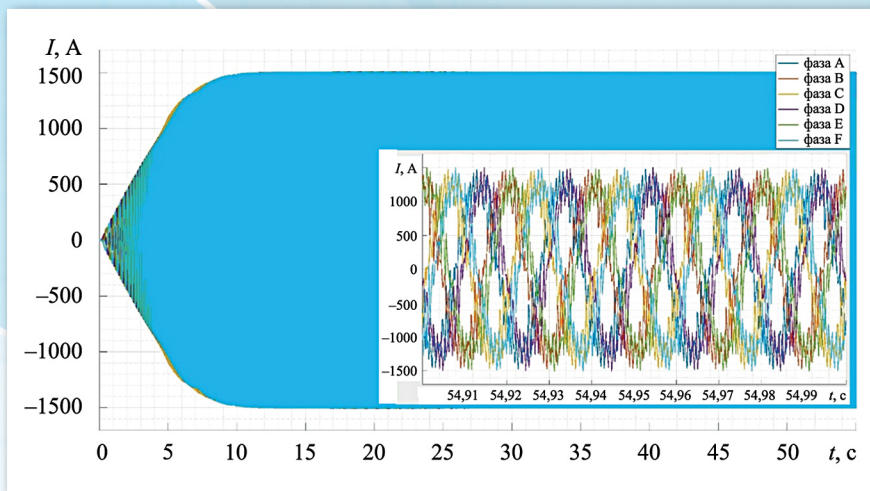


Рис. 7. Частоты питания статора
Fig. 7. Stator supply frequencies

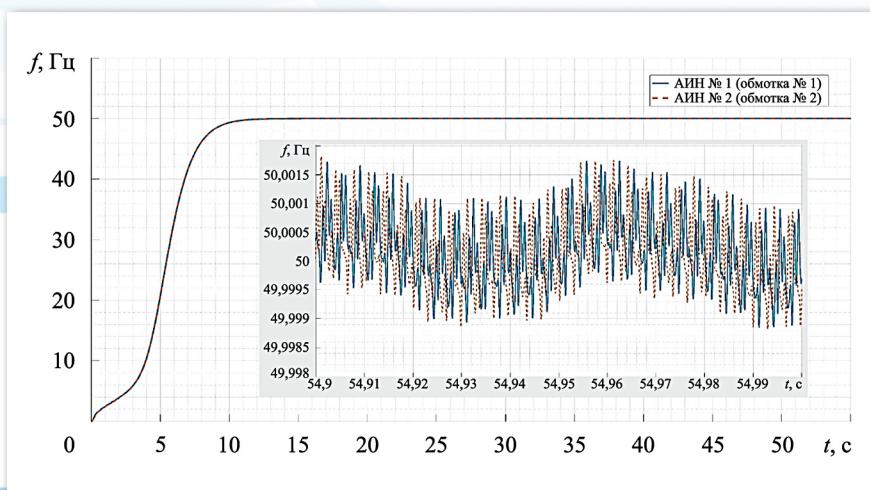
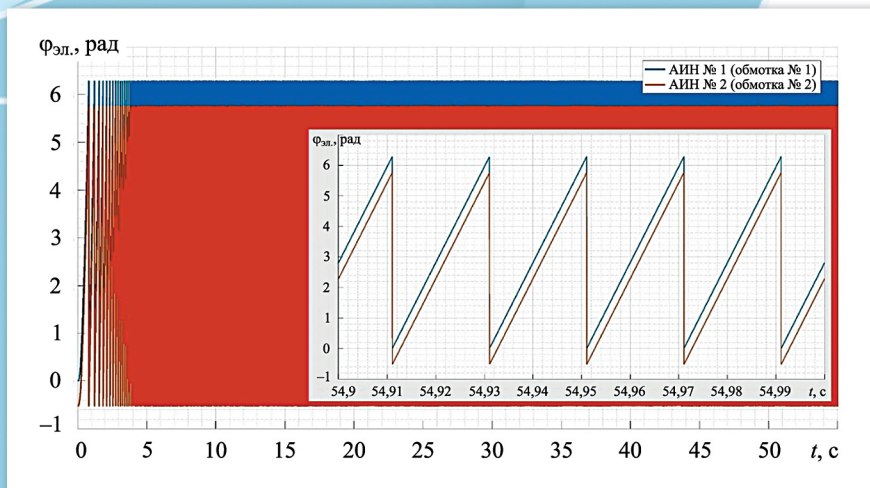


Рис. 8. Фазы статора
Fig. 8. Stator phases



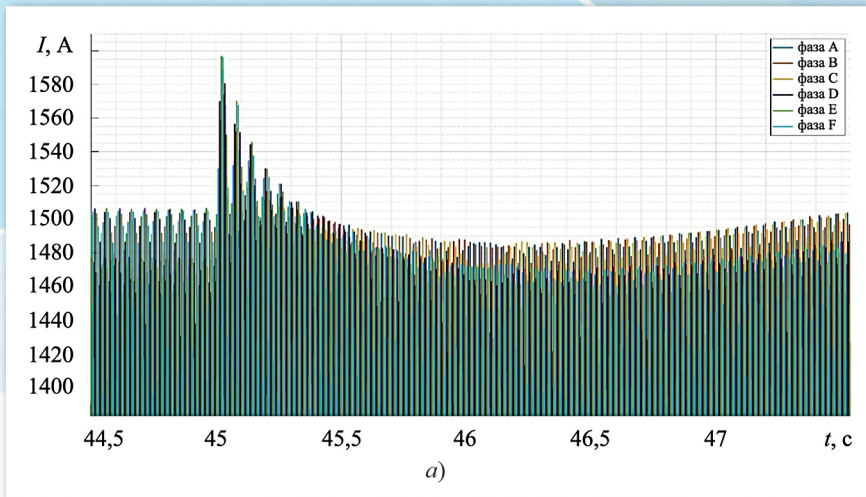


Рис. 11. Токи статора:
 а) скачок токов;
 б) переходный процесс с выходом на новый установившийся режим

Fig. 11. Stator currents:
 a) current step;
 b) transient process resulting in a new steady mode

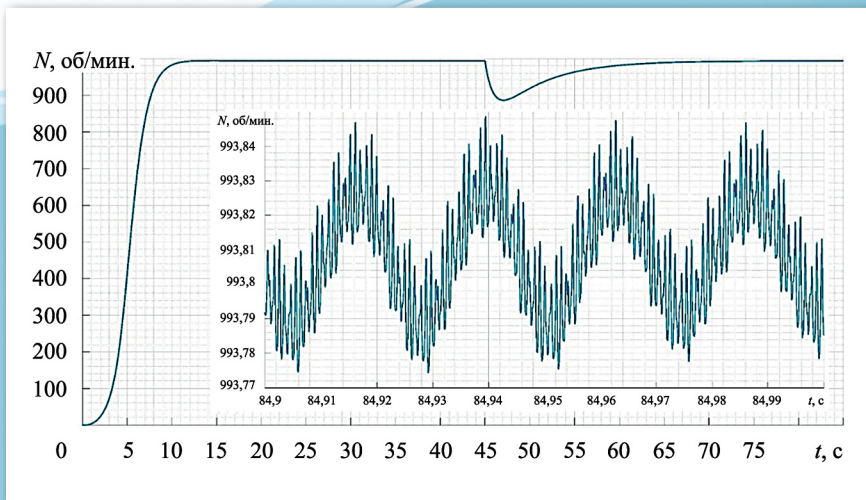
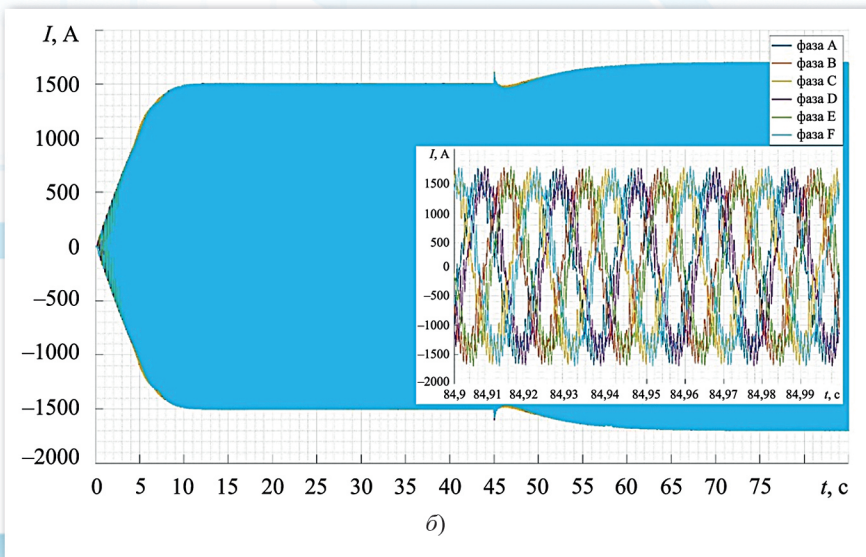


Рис. 13. Частота вращения ротора

Fig. 13. Rotor speed