

Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Быстров Е.А., Переовщикова Ф.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

## ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОТОТИПА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СПЕЦИАЛЬНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА

В статье рассматриваются вопросы построения математической модели асинхронного электропривода (АЭП) в программной среде моделирования *Matlab/Simulink*, выступающего в качестве прототипа электропривода специального насосного агрегата большой мощности. Модель позволяет проводить расчёт статических и динамических характеристик при различных законах управления автономным инвертором напряжения (АИН). Для проведения процедуры верификации модели создана экспериментальная установка, которая включает: источник питания (ИП), сервоконтроллер (СК), предназначенный для управления частотно-регулируемым электроприводом с поддержкой информационных датчиков обратной связи, включающий в себя преобразователь частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), кабельную линию (КЛ), асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД), инкрементный угловой энкодер (ЭН) для измерения частоты вращения АД, вал которого посредством жесткой муфты соединен с валом генератора постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (ГПТ), резистивную нагрузку. Получены результаты имитационного моделирования при скалярном способе частотного регулирования. В процессе проверки адекватности имитационной модели с экспериментальными данными учитывается нелинейность магнитной цепи АД. Установлено, что предложенная коррекция значений индуктивностей схемы замещения АД позволяет существенно снизить величину расхождения между моделью и экспериментальными данными в различных режимах работы АЭП. Так, например, для половинного значения частоты питающего напряжения среднеквадратичная ошибка между расчетными и экспериментальными данными тока статора и частоты вращения вала АД уменьшается соответственно при пуске – в 3,5 и 1,5 раза, в установившемся режиме – в 4,5 и 1,4 раза.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, сервоконтроллер, скалярный способ частотного регулирования, нелинейность магнитных материалов, интерполяция Лагранжа, имитационное моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Взаимосвязь электромагнитных процессов, механических явлений и технологических факторов обуславливают высокие требования к регулируемым процессам в современных системах автоматизированного электропривода. Кроме того, следует учитывать как воздействия внутренних возмущений, например изменение электромеханических параметров привода, так и внешних возмущений – нестабильность напряжения питающей сети, изменение моментов нагрузки и трения [1, 2].

При проектировании асинхронного электропривода (АЭП) насосных агрегатов ответственного промышленного оборудования актуальным является выполнение определенных требований к вибраакустическим характеристикам, связанных с пульсациями электромагнитного момента двигателя. Эти требования коррелируются с обязательным использованием технических решений в части отказоустойчивости и надежности электрических машин, рассмотренных, например, в [3-5].

Известно также, что при работе асинхронного двигателя (АД) в динамических режимах возникают повышенные токи и напряжения, что приводит к существенным потерям в кабельной линии и возникновению неустойчивых процессов в многомассовой электромеханической системе [6-9].

Кроме того, использование автономного инвертора напряжения (АИН) в качестве силового преобразователя в АЭП предполагает широтно-импульсный способ формирования выходного напряжения инвертора. Данный способ имеет ряд особенностей, которые обу-

словлены неидеальностью силовых ключей и дискретным заданием опорного сигнала, что приводит к искажениям синусоидальной формы выходного напряжения АИН [10, 11]. При этом наличие токов высших гармоник, создающих активные потери мощности, обуславливает перегрев электрооборудования, снижение коэффициента мощности, а также уменьшение электрического и механического КПД асинхронного двигателя [12, 13].

Отличительной особенностью приемо-сдаточных испытаний АЭП специальных технологических установок является сложность проведения тестовых испытаний совместно с механической нагрузкой для отработки эффективных алгоритмов управления, минимизирующих влияние параметрических и внешних возмущений.

Всё вышеперечисленное обосновывает необходимость создания экспериментальной установки АЭП и построение его адекватной математической модели для предварительного исследования не только законов регулирования, но и алгоритмов обработки данных измерительной информации, исследования статических и динамических режимов работы во всем диапазоне изменения механической нагрузки, проведения оценки спектрального состава тока и напряжения.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рассматриваемая в данной работе экспериментальная установка содержит сервоконтроллер СК-ЭТ.380-5,5 производства АО «Томский электротехнический завод» (г. Томск), предназначенный для управления частотно-регулируемым электроприводом с поддержкой информационных датчиков обратной связи (рис. 1).

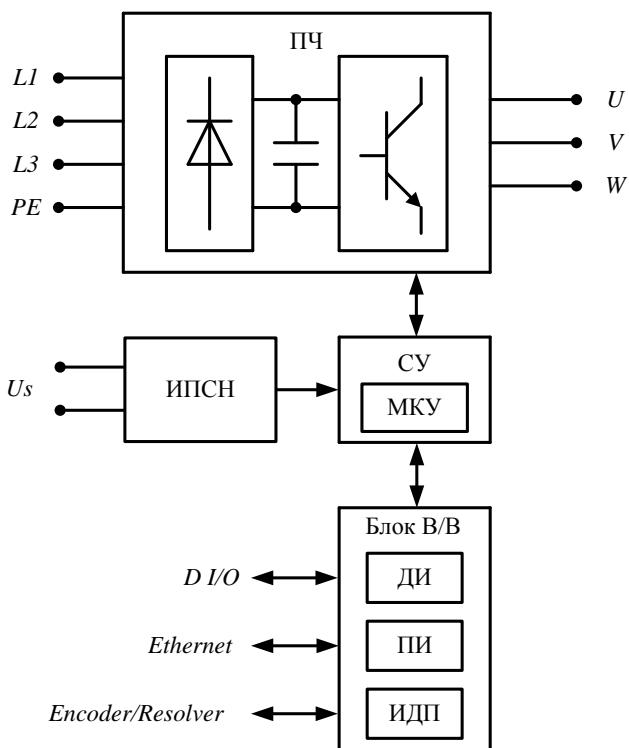


Рис. 1. Структурная схема сервоконтроллера

В состав сервоконтроллера (СК) входит преобразователь частоты (ПЧ), питание которого осуществляется трехфазной сетью 380 В (входные клеммы  $L_1, L_2, L_3, PE$ ), предназначенный для формирования переменного напряжения с требуемой амплитудой и частотой (выходные клеммы  $U, V, W$ ).

Система управления (СУ) представляет собой микропроцессорный контроллер управления (МКУ) и производит управление работой всех узлов сервоконтроллера в соответствии с заложенной программой. СУ производит анализ текущих параметров работы (токов, напряжений), команд местного и дистанционного управления, формирует управляющие воздействия для преобразователя частоты, определяет возникновение аварийных режимов работы сервоконтроллера.

Источник питания собственных нужд (ИПСН) предназначен для преобразования входного напряжения 24 В постоянного тока ( $U_s$ ) в напряжения питания электронных узлов схемы сервоконтроллера.

Блок ввода/вывода предназначен для ввода и обработки входных сигналов, а также формирования выходных сигналов и включает в себя следующие интерфейсы. Дискретный интерфейс (ДИ) предназначен для приема и передачи сигналов состояния управляемого объекта по цифровому интерфейсу входов/выходов D I/O. Интерфейс датчика положения (ИДП) выполняет функцию обработки сигналов с датчиком положения (Encoder/Resolver), расположенного на валу электродвигателя. Последовательный интерфейс (ПИ) обеспечивает связь с внешними устройствами по интерфейсу Ethernet при работе сервоконтроллера в составе системы АСУ, обмен производится по протоколу Modbus TCP/IP.

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

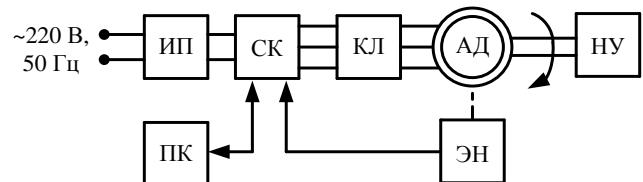


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки

На вход регулируемого источника питания (ИП) постоянного тока ограниченной мощности поступает однофазное напряжение переменного тока. Выходное напряжение постоянного тока ИП подается на вход СК.

Кабельная линия (КЛ) в данной установке имеет сравнительно малую длину и при моделировании рабочих режимов рассматривается как линия с сосредоточенными параметрами. Общая система дифференциальных уравнений, учитывающая влияние кабельной линии в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned} \frac{di_{k-a}(t)}{dt} &= \frac{1}{L_K} (U_{bx_a}(t) - i_{k-a}(t)R_{1K} - U_{sa}(t)); \\ \frac{dU_{sa}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_K} \left( i_{k-a}(t) - \frac{U_k(t)}{R_{2K}} - i_{sa}(t) \right), \\ \frac{di_{k-\beta}(t)}{dt} &= \frac{1}{L_K} (U_{bx_\beta}(t) - i_{k-\beta}(t)R_{1K} - U_{s\beta}(t)); \\ \frac{dU_{s\beta}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_K} \left( i_{k-\beta}(t) - \frac{U_k(t)}{R_{2K}} - i_{s\beta}(t) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $i_{k-a}(t), i_{k-\beta}(t)$  – составляющие тока в кабельной линии;  $L_K$  – индуктивное сопротивление кабельной линии;  $U_{bx_a}(t), U_{bx_\beta}(t)$  – составляющие напряжения на входе кабельной линии;  $U_{sa}(t), U_{s\beta}(t)$  – составляющие напряжения на выходе кабельной линии;  $R_{1K}$  – активное сопротивление кабельной линии;  $C_K$  – емкостное сопротивление кабельной линии;  $U_k(t)$  – падение напряжения на изоляции;  $R_{2K}$  – сопротивление изоляции.

Напряжение, поступающее на обмотку статора АД типа 4AMA71B8У3, формируется сервоконтроллером с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Данный метод ШИМ используется в подавляющем большинстве современных ПЧ благодаря снижению динамических потерь за счет меньшего количества коммутаций ключей АИН за период, а также максимального использования запаса напряжения звена постоянного тока без искажения формы выходного тока.

Управление режимом работы ПЧ осуществляется путем подачи сигналов управления, поступающих с автоматизированного рабочего места оператора SCADA-системы, которое представляет собой персональный компьютер (ПК) с предустановленным лицензионным программным обеспечением *TetzBIOS*.

Для измерения частоты вращения вала АД используется инкрементный угловой энкодер ЛИР-158А (ЭН).

Нагрузочное устройство (НУ) представляет собой

генератор постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (ГПТ) типа ДПУ-127-450-1-57-Д43, работающий на активную нагрузку, вал которого посредством жесткой муфты соединен с валом АД.

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

При построении систем управления асинхронными электроприводами используется, в основном, математическое описание АД. Для анализа динамики АД целесообразно использовать неподвижную систему координат, наиболее адекватно соответствующую процессам в реальном двигателе [14]. Система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{di_{sa}}{dt} = \frac{1}{L_e(f)} \times \\ \times (U_{sa} - R_e i_{sa} + A_r(f) K_r \psi_{ra} + \omega_r K_r Z_p \psi_{r\beta}); \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{L_e(f)} \times \\ \times (U_{s\beta} - R_e i_{s\beta} + A_r(f) K_r \psi_{r\beta} - \omega_r K_r Z_p \psi_{ra}); \\ \frac{d\psi_{ra}}{dt} = K_r R_r i_{sa} - A_r(f) \psi_{ra} - \omega_r Z_p \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = K_r R_r i_{s\beta} - A_r(f) \psi_{r\beta} + \omega_r Z_p \psi_{ra}; \\ M_s = \frac{3}{2} Z_p K_r (i_{s\beta} \psi_{ra} - i_{sa} \psi_{r\beta}); \\ J_\Sigma \frac{d\omega_r}{dt} = M_s - M_c, \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_{sa}$  – составляющая напряжения статора по оси  $\alpha$ ;  $U_{s\beta}$  – составляющая напряжения статора по оси  $\beta$ ;  $i_{sa}$ ,  $i_{s\beta}$  – составляющие тока статора;  $\psi_{ra}$ ,  $\psi_{r\beta}$  – составляющие потокосцепления ротора;  $M_s$  – электромагнитный момент двигателя;  $M_c$  – момент статического

сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя;  $J_\Sigma$  – момент инерции двигателя;  $Z_p$  – число пар полюсов;  $\omega_r$  – угловая скорость вращения двигателя;  $L_e(f) = L_s(f) - L_m^2(f) / L_r(f)$ ,  $R_e = R_s + R_r K_r^2$ ,  $A_r(f) = R_r / L_r(f)$ ,  $K_r = L_m(f) / L_r(f)$  – коэффициенты, учитывающие параметры АД;  $R_s$  – активное сопротивление обмотки статора;  $R_r$  – приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора;  $L_m(f) = K_x(f) L_{m0}$  – полная индуктивность контура намагничивания;  $L_{m0}$  – расчетное значение полной индуктивности контура намагничивания по паспортным данным;  $L_r(f) = K_x(f) L_{r0}$  – полная индуктивность обмотки ротора;  $L_{r0}$  – расчетное значение полной индуктивности обмотки ротора по паспортным данным;  $L_s(f) = K_x(f) L_{s0}$  – полная индуктивность обмотки статора;  $L_{s0}$  – расчетное значение полной индуктивности обмотки статора по паспортным данным;  $K_x(f)$  – корректирующий коэффициент, учитывающий нелинейность кривой намагничивания магнитных элементов АД в функции частоты питающего напряжения.

Данная система уравнений позволяет получить структурную схему имитационной модели (рис. 3).

На основе исходных и экспериментальных данных реальной установки в программной среде моделирования *Matlab/Simulink* разработана имитационная модель (рис. 4), позволяющая с достаточной точностью моделировать основные режимы работы АЭП при различных законах управления АИН [15].

Блок «Система управления» (рис. 5) содержит:

– задатчик интенсивности, который формирует кривую и темп разгона двигателя;

– преобразователь частота-напряжение, который формирует требуемую зависимость скалярного управления между частотой и напряжением преобразователя, то есть устанавливает принятый способ частотного регулирования;

– координатный преобразователь, формирующий из постоянных сигналов типа частота/напряжение переменный сигнал управления.

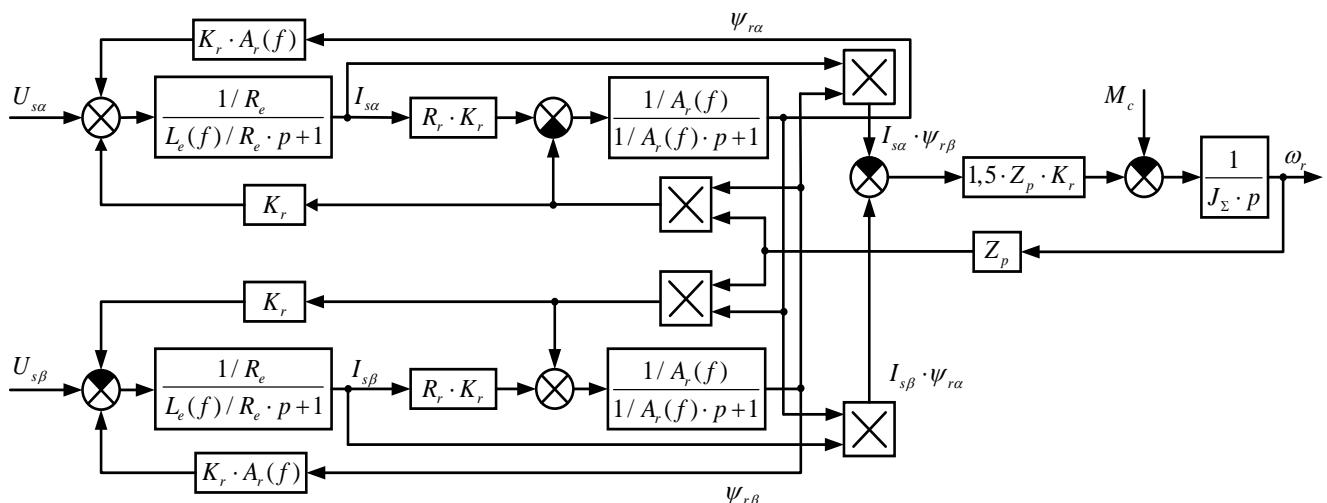


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели АД в неподвижной системе координат  $\alpha$ - $\beta$

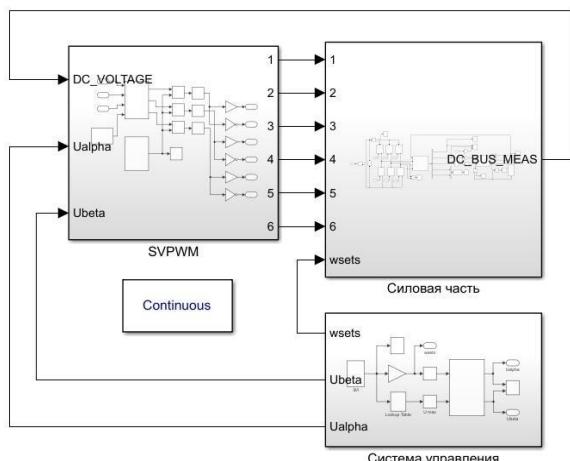


Рис. 4. Имитационная модель электропривода в программной среде моделирования Matlab/Simulink

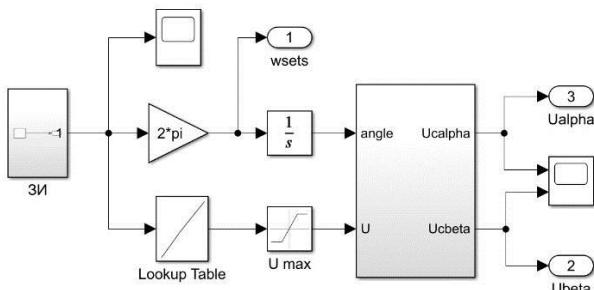


Рис. 5. Блок «Система управления»

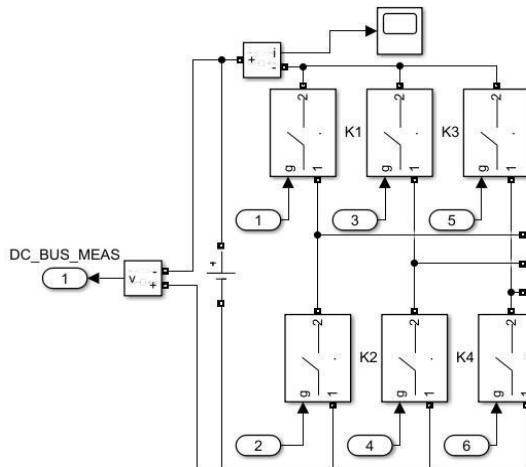


Рис. 7. Блок «Силовая часть»

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 8 и 9 представлены результаты моделирования работы экспериментальной установки при пуске и работе в установившемся режиме для  $f_n$  и  $0,5f_n$  соответственно. Для оценки адекватности математической модели приведены данные, полученные с экспериментальной установки при аналогичных режимах работы. Значения рассогласований, лежащих в малой окрестности их абсолютного минимума, можно получить варьированием коэффициента  $K_x(f)$  системы уравнений (2) [17].

В таблице приведены данные по относительной погрешности частоты вращения и тока статора, полученных по выражениям (2) при различных значениях частоты питающего напряжения. Анализ полученных данных подтверждает адекватность представленной модели.

Блок «SVPWM», в котором реализован метод про странственно-векторной ШИМ, генерирует модулирующие напряжения (рис. 6) [10,11].

Механическая и электрическая части электропривода представлены в блоке «Силовая часть» (рис. 7). Параметры схемы замещения АД определены по каталожным данным [16].

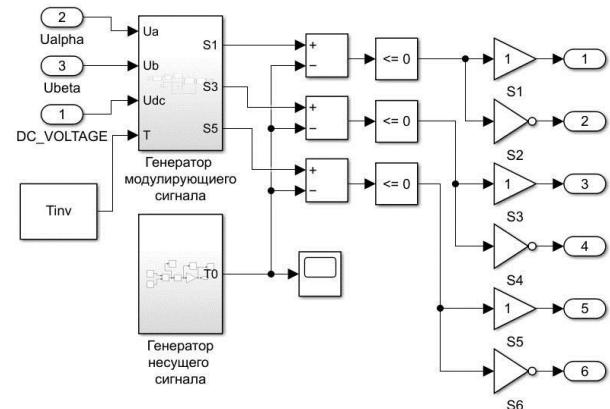


Рис. 6. Блок «SVPWM»

Значение ошибок  $\varepsilon$  вычислялось как среднее арифметическое от поэлементного относительного рассогласования экспериментального и модельного массива данных скорости и модуля обобщенного вектора тока статора:

$$\varepsilon_{\omega} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{|\omega_j \text{эксп} - \omega_j \text{модель}|}{\omega_j \text{эксп}} \cdot 100%; \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|I_i \text{эксп} - I_i \text{модель}|}{I_i \text{эксп}} \cdot 100%, \quad (4)$$

где  $N$  – количество значений массива скорости;  $\omega_j \text{эксп}$  – значение частоты вращения, полученное с экспериментального стенда;  $\omega_j \text{модель}$  – значение частоты

вращения, полученное в процессе моделирования системы;  $M$  – количество значений массива тока;  $I_{i\text{эксп}} = \sqrt{i_{a\text{эксп}}^2 + i_{b\text{эксп}}^2 + i_{c\text{эксп}}^2}$ ;  $i_{a\text{эксп}}, i_{b\text{эксп}}, i_{c\text{эксп}}$  – мгновенные значения токов, полученные с экспериментального стенда;  $i_{a\text{модель}}, i_{b\text{модель}}, i_{c\text{модель}}$  – мгновенные значения токов, полученные в процессе моделирования системы;  $I_{i\text{модель}} = \sqrt{i_{a\text{модель}}^2 + i_{b\text{модель}}^2 + i_{c\text{модель}}^2}$ .

В ходе минимизации вышеописанных ошибок были получены значения  $K_x$  для всех частот из исследуемого набора (рис. 10).

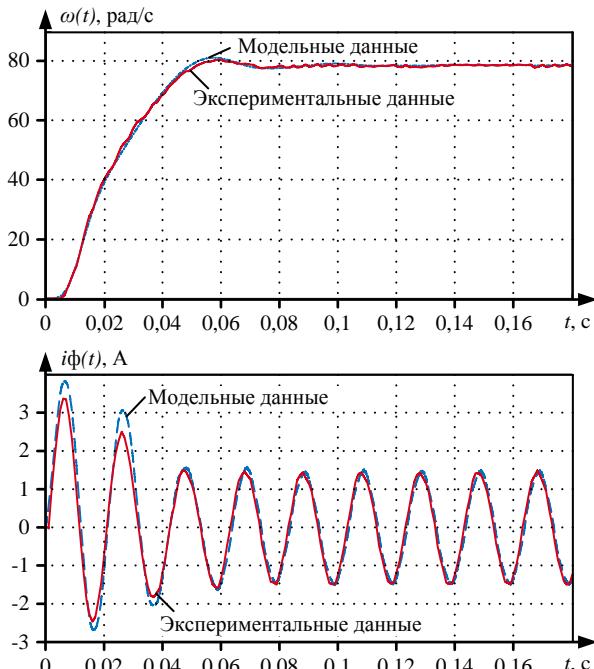


Рис. 8. Частота вращения вала и фазный ток статора АД при  $f_n$

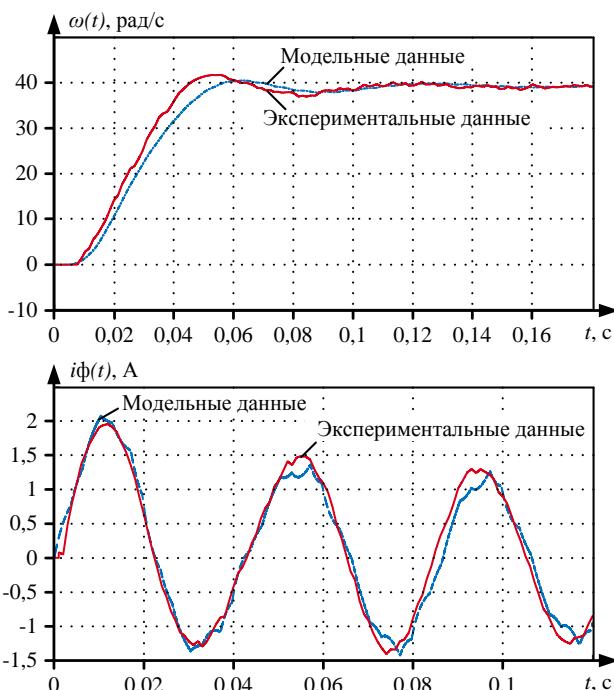


Рис. 9. Частота вращения вала и фазный ток статора АД при  $0,5f_n$

### Относительная погрешность данных эксперимента и модели

Значение частоты питающего напряжения	Ошибка $\varepsilon$ с коррекцией значений индуктивности, %		Ошибка $\varepsilon$ без коррекции значений индуктивности, %	
	$\varepsilon_i$	$\varepsilon_\omega$	$\varepsilon_i$	$\varepsilon_\omega$
Пуск				
$f_n$	19,78	5,17	12,91	26,85
$5f_n/6$	18,35	12,63	15,12	9,27
$2f_n/3$	23,46	19,48	113,3	20,03
$f_n/2$	15,79	20,49	58,24	29,61
$f_n/3$	21,78	24,46	100,6	17,35
Установившийся режим работы				
$f_n$	3,75	0,43	29,65	1,15
$5f_n/6$	4,16	1,44	14,26	1,49
$2f_n/3$	9,72	2,88	47,09	2,10
$f_n/2$	8,57	0,81	38,85	1,15
$f_n/3$	6,35	1,61	117,8	1,64

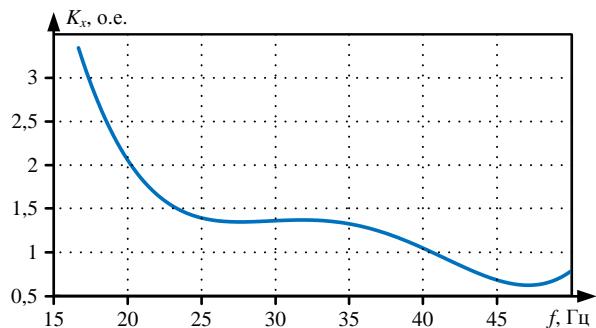


Рис. 10. Зависимость корректирующего коэффициента индуктивностей электромагнитной системы АД от частоты питающего напряжений

В свою очередь, для получения непрерывной зависимости предлагается полученные узлы интерполировать многочленом Лагранжа, достоинства и применимость которого рассмотрена в статье [18]. Явный вид кривой задается как

$$K_x(f) = \sum_{j=1}^{n=5} K_{x_j} \left( \prod_{m=1, m \neq j}^{n=5} \frac{f - f_m}{f_j - f_m} \right), \quad (5)$$

где  $K_x = (3,3333; 1,3793; 1,3333; 0,8696; 0,7143)$ ,  $f = (16,67; 25; 33,33; 41,667; 50)$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена методика получения математической модели асинхронного двигателя, параметры которой перенастраиваются в зависимости от частоты питающего напряжения.

В результате проведенных исследований разработана имитационная модель АЭП в программной среде моделирования *Matlab/Simulink*, позволяющая проводить расчёт основных режимов работы электропривода, включая динамические, при различных законах управления АИН. Проведена проверка адекватности данной имитационной модели путем сравнения с экспериментальными данными.

В процессе исследований установлено, что предложенная коррекция значений индуктивностей схемы

замещения АД позволяет существенно снизить величину расхождения между моделью и экспериментальными данными в различных режимах работы двигателя. В большей степени это проявляется на частотах питающего напряжения в окрестности половины от номинального значения. Так, например, для  $0,5f_n$  токовая и частотная ошибка в момент пуска снизилась, соответственно в 3,5 и 1,5 раз, в установившемся режиме - в 4,5 и 1,4 раза.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
2. Лазарев Г.Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок // Силовая электроника. 2007. № 3. С. 41-48.
3. Гаврилов Д.П., Барабанов В.Г. Разработка и исследование системы управления насосной установкой // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2017. Т. 17. № 2. С. 11-19. doi: 10.14529/engin170202.
4. Груздев К.П., Панин В.В. Применение частотно-регулируемого привода как способ повышения энергосбережения // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: матер. междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: Воронежский ГАУ, 2018. С. 66-69.
5. Зайцев Д.Ю., Пикалов А.А., Прибылова Н.В. Энергосберегающие режимы работы асинхронных электродвигателей // Инновационные технологии и технические средства для АПК: матер. междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. Воронеж: Воронежский ГАУ, 2017. С. 222-225.
6. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
7. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Электротехника. 2005. №5. С. 56-61.
8. Егоров А.В., Ершов М.С. Экспериментальное исследование устойчивости асинхронных частотно-регулируемых приводов при кратковременных провалах напряжения //
9. Промышленная энергетика. 2018. № 4. С. 9-12.
10. Шандарова Е.Б., Букреев В.Г., Быстров Е.А. Имитационное моделирование асинхронного электропривода насоса погружного технологического оборудования // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 13-18. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18.
11. Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Е. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения // Электричество. 2008. № 7. С. 23-31.
12. Плотников Ю.В., Уймин Ю.С. Особенности реализации векторной ШИМ для микропроцессоров TMS320 // Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 232-236.
13. Богданов А.А., Быстров Е.А. Анализ влияния алгоритмов и режимов работы трехфазного инвертора на спектральный состав выходных токов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2021. С. 210-214.
14. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров. М.: Изд-во Юрайт, 2015. 667 с.
15. Control system with sinusoidal PWM three-phase inverter with a frequency scalar control of induction motor / Y.N. Dementyev, N.V. Kojaian, A.D. Bragin, L.S. Udot // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015. Pp. 1-6. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147008.
16. Удут Л.С., Чернышев А.Ю., Гусев Н.В. Разработка и моделирование асинхронных электроприводов со скалярным управлением // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 3. С. 43-49.
17. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной научно-технической конференции. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. С. 269-272.
18. Дудкин А.Н., Ким В.С. Электротехническое материаловедение: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2017. 199 с.
19. Определение параметров ПИ-регулятора системы управления сложным технологическим объектом в режиме реального времени / В.В. Нгуен, А.А. Шилин, В.Г. Букреев, Ф.В. Перевоцников // Доклады ТУСУР. 2021. Т. 24. №2. С. 56-63. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-2-56-63

Поступила в редакцию 14 марта 2022 г.

**INFORMATION IN ENGLISH****VERIFICATION OF INDUCTION MOTOR DRIVE PROTOTYPE MODEL FOR SPECIAL PUMPING UNIT**

Victor G. Bukreev

D.Sc. (Engineering), Professor, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, shandarovaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>

Elena B. Shandarova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, shandarovaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>

Evgeniy A. Bystrov

Postgraduate Student, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, bystrov-evgen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1829-6845>

Filipp V. Perevoshchikov

Undergraduate Student, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, fvp2@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7932-2744>

The article is devoted to creation of induction motor drive (IMD) mathematical model in the Matlab/Simulink simulation environment, which serves as a prototype of the electric drive for a special high-power pumping unit. The model makes it possible to calculate static and dynamic characteristics at different control laws of voltage source inverter (VSI). To verify the model, the experimental setup was created, which includes a power source (PS), a servocontroller (SC) designed to control a frequency-controlled electric drive with support of information feedback sensors, which includes a frequency converter (FC) with the method of pulse-width modulation (PWM), cable line (CL), a low power squirrel cage induction motor (IM), rotary incremental encoder (EN) to measure the speed of IM, whose shaft is connected to the shaft of DC generator with permanent magnetic excitation (DCG) through a rigid coupling, resistive load. Simulation results were obtained for the scalar method of frequency control. In the process of adequate simulation model validation with experimental data, the nonlinearity of the motor magnetic circuit is taken into account. It was found that the proposed correction of the motor equivalent circuit inductances allows us to significantly reduce the value of difference between the model and the experimental data in different modes of motor operation. Thus, for example, for a half value of the supply voltage frequency, the mean square error between the calculated and experimental data for stator current and motor speed decreased by 3.5 and 1.5 times, respectively, at starting and 4.5 and 1.4 times in steady-state mode.

**Keywords:** induction motor drive, servocontroller, scalar control on speed drive, nonlinearity of magnetic materials, Lagrange polynomial, simulation modeling.

#### REFERENCES

- Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovaniye elektroprivodov peremennogotoka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2000. 654 p. (In Russian)
- Lazarev G.B. Frequency-regulated electric drive of pump and fan systems. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2007, no. 3, pp. 41–48. (In Russian)
- Gavrilov D.P., Barabanov V.G. Development and research of the control system for the pumping unit. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of the SUSU. Series "Mechanical engineering industry"], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 11–19. doi: 10.14529/engin170202 (In Russian)
- Gruzdev K.P., Panin V.V. Application of frequency-controlled drive as a way to increase power efficiency. *Energoeffektivnost i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve* [International scientific and practical conference "Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society"]. Voronezh, VSAU Publ., 2018, pp. 66–69. (In Russian)
- Zaytsev D.Yu., Pikalov A.A., Pribylova N.V. Energy-saving operation modes of asynchronous electric motors. *Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya APK* [International scientific and practical conference of young scientists and specialists "Innovative technologies and technical means for the agro-industrial complex"]. Voronezh, VSAU Publ., 2017, pp. 222–225. (In Russian)
- Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, MPEI Publ., 2015. 373 p. (In Russian)
- Vinogradov A.B. Consideration of steel losses, saturation and surface effects in modeling dynamic processes in frequency-controlled induction motor drive. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2005, no. 5, pp. 56–61. (In Russian)
- Egorov A.V., Ershov M.S. Experimental study of the stability of frequency-regulated induction motor drives under short-term voltage drops. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2018, no. 4, pp. 9–12. (In Russian)
- Shandarova E.B., Bukreev V.G., Bystron E.A. Simulation modeling of induction motor drive of a submersible technological equipment pump. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 13–18. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18 (In Russian)
- Obukhov S.G., Chaplygin E.E., Kondratiev D.E. Pulse width modulation in three-phase voltage inverters. *Elektrичество* [Electricity], 2008, no. 7, pp. 23–31. (In Russian)
- Plotnikov Yu.V., Uymin Yu.S. Features of vector PWM implementation for TMS320 microprocessors. *Trudy tretey nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh Uralskogo energeticheskogo instituta* [Proceedings of the Third Scientific and Technical Conference of Young Scientists of the Ural Power Engineering Institute] Ekaterinburg, URFU Publ., 2018, pp. 232–236. (In Russian)
- Bogdanov A. A., Bystron E. A. Analysis of the influence of algorithms and operating modes of a three-phase inverter on the spectral composition of output currents. *Sbornik nauchnykh trudov "Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva"* [Materials of scientific papers "Electronic and electromechanical systems and devices"]. Tomsk, TSU Publ., 2021, pp. 210–214. (In Russian)
- Zinoviev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurayt Publ., 2015. 667 p. (In Russian)
- Dementyev Y.N., Kojain N.V., Bragin A.D., Udot L.S. Control system with sinusoidal PWM three-phase inverter with a frequency scalar control of induction motor. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. Pp. 1–6. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147008
- Udot L.S., Chernyshev A.Yu., Gusev N.V. Development and modeling of induction motor drives with scalar control. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2015, no. 3, pp. 43–49. (In Russian)
- Chernyshev A.Yu., Chernyshev I.A. Determination of parameters of induction motor circuit according to catalog data. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli jenergii* [International Scientific and Technical Conference " Electromechanical power converters"]. Tomsk, TPU Publ., 2007, pp. 269–272. (In Russian)
- Dudkin A.N., Kim V.S. *Elektrotekhnicheskoe materialovedenie: uchebnoe posobie* [Electrotechnical Materials Science]. St. Petersburg, Lanbook Publ., 2017. 199 p. (In Russian)
- Nguyen V.V., Shilin A.A., Bukreev V.G., Perevoshchikov F.V., Bryantsev A.A. Synthesis of regulators of the drying plant control system based on statistical data. *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], 2021, vol. 24, no. 2, pp. 56–63. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-2-56-63 (In Russian)

Верификация модели прототипа асинхронного электропривода специального насосного агрегата / В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова, Е.А. Быстров, Ф.В. Переcоиков // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 25-31. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-25-31](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-25-31)

Bukreev V.G., Shandarova E.B., Bystron E.A., Perevoshchikov F.V. Verification of Induction Motor Drive Prototype Model for Special Pumping Unit. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 25–31. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-25-31](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-25-31)