

№ 1 +0
2019 [51]

ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал

ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



8 февраля
День российской науки



В НОМЕРЕ

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ И
ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И
СИСТЕМЫ**

**2 Бутранов А.С., Ерёмин Б.Г.,
Мартынов С.В., Никитенко В.В.**

Регрессионная зависимость поддержания комфортного физиологического состояния военнослужащего, одетого во всепогодный комплект полевого обмундирования с активной системой электрообогрева в условиях низких температур

**7 Мартынов С.В., Ерёмин Б.Г.,
Назаров А.В., Бутранов А.С.**

Экспериментальная оценка теплозащитных функций средств индивидуальной защиты военнослужащего от холода с применением теплового манекена

13 Смирнов В.А., Шуваева О.В.

Прибор для измерения мощности ультрафиолетового излучения

16 Турбал Р.А., Глазов Д.Н.

Использование производных от пеленга на излучатель электромагнитных волн для определения временной задержки между земной и ионосферными волнами

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**18 Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В.,
Зеленевский А.В., Шмырин Е.В.,
Ржаных А.В.**

Оценка качества передачи данных в декаметровых радиоканалах с ионосферной волной

**22 Шиманов С.Н., Франков С.В.,
Дёмочкин Е.А., Рыженков В.А.**

Вероятностная маршрутизация в Mesh-сетях с быстроменяющейся топологией

**27 Шиманов С.Н., Прасолов В.А.,
Бобрус С.Ю., Егоров В.В., Рыженков В.А.**

Модификация протокола доведения сообщений HDL в части приема квитанций по обратному каналу

**32 Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В.,
Зеленевский А.В., Дурнов А.С.,
Наконечный Б.М.**

Математическая модель радиоканала передачи данных ОНЧ-НЧ диапазона

**ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ**

39 Емелин Н.М.

Марковские и полумарковские модели сложных систем: преимущества и недостатки

42 Евсиков А.А., Леонов А.П.

Об использовании системы моделирования VisSim для исследования электропривода, работающего при скалярном управлении в повторно-кратковременном номинальном режиме с частыми пусками и электрическим торможением

**49 Боровиков А.Ю., Новиков К.Б.,
Маслов О.А.**

Описание подхода программной реализации модуля доверенной загрузки операционной системы

**55 Коломбет В.А., Лесных В.Н.,
Елистратов А.В.**

О возможной природе осцилляций, приводящих к универсальной системе утраивающихся периодов

58 Смуров С.В., Масликов А.А., Волков Г.Г.

Идеи и методы генерации запутывания твердотельных спин-кубитов. Квантовая запутанность двух систем

**65 Бугаков И.А., Сорокин А.Д.,
Хомяков А.В.**

Показатели эффективности применения группы беспилотных летательных аппаратов при решении задачи воздушной разведки в условиях противодействия противника

**69 Бугаков А.И., Бугаков И.А.,
Лысенко А.В., Шаров Ю.К.**

О комплексировании видеонаблюдения с датчиками физических величин в системах автоматического распознавания нарушителя на охраняемой территории критически важных объектов

**74 Смирнов Д.В., Коротин А.М.,
Воронов Я.Р.**

Определение в рамках методики построения систем контроля целостности ответственной информации в системах АЛС на базе широкополосного радиоканала механизмов защиты от угроз безопасности

86 Андрух О.Н., Дранников С.Г.

Анализ современных подходов к мониторингу удовлетворенности потребителей качеством образовательной деятельности вуза

**СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И
ФАРМАЦЕВТИКА**

**92 Грачёв В.А., Краснова Ю.В.,
Панов П.Б., Умников Е.В., Казакова Е.Ю.**

Направления модернизации комплектов медицинского имущества для кораблей и судов Военно-морского флота Российской Федерации

**ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ**

**95 Баранчук Н.А., Обычный И.А.,
Шугалей Д.В.**

Педагогические управленческие компетенции как составляющая профессиональной компетентности преподавателя военного вуза

**ТЕХНИЧЕСКОЕ
РЕГУЛИРОВАНИЕ**

99 Смурова А.С.

Анализ причин и предпосылок существования проблем при распределении прав на результаты интеллектуальной деятельности между государственным заказчиком и исполнителем в договорах на НИОКР

**НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ. НАУЧНЫЕ
РЕЦЕНЗИИ. ОТЗЫВЫ**

102 Емелин Н.М.

Качественный прорыв в формировании Перечня рецензируемых изданий

104 СОБЫТИЯ

105 AUTHORS

107 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

**108 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ
СТАТЕЙ**

Научно-технический журнал

**ИЗВЕСТИЯ
Института инженерной физики
№1 (51) 2019**

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК»
по научным специальностям:

- 05.11.16. Информационно-измерительные и управляющие системы
05.12.13. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации
05.13.19. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

**Главный редактор,
председатель редакционного совета
и редакционной коллегии**

Алексей Николаевич Царьков

Президент – Председатель Правления МОУ «ИИФ»,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Редакционный совет

Геннадий Иванович Азаров

главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИИ МО РФ»
заслуженный деятель науки РФ, заслуженный
изобретатель РФ, лауреат Государственной
премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Сергей Владимирович Дворянkin

начальник департамента Государственной
корпорации «РОСТЕХ» ОАО КРЭТ,
доктор технических наук, профессор

Николай Михайлович Емелин

главный научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»,
заслуженный деятель науки и техники РФСР,
доктор технических наук, профессор

Валерий Иванович Николаев

научный референт ОАО «Концерн «Созвездие»,
лауреат Государственной премии СССР,
лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Владимир Георгиевич Редько

заместитель руководителя
Центра опико-нейронных технологий
НИИ системных исследований РАН,
доктор физико-математических наук

Юрий Александрович Романенко

старший научный сотрудник
филиала ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Александр Викторович Синьговский

старший научный сотрудник
Европейского центра ядерных исследований (CERN),
Adjunct Assistant Professor
Университета Миннесоты (США),
кандидат физико-математических наук

Анатолий Васильевич Тодосийчук

главный советник аппарата Комитета ГД ФС РФ
по образованию и науке,
почетный работник науки и техники РФ,
доктор экономических наук, профессор

Александр Павлович Царёв

заведующий кафедрой компьютерных архитектур
и телекоммуникаций Западно-поморского
технологического университета (Польша),
доктор технических наук, профессор

Игорь Анатольевич Шеремет

заместитель директора Российского фонда
фундаментальных исследований по науке,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.31

**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ
МОДЕЛИРОВАНИЯ *VisSim* ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА, РАБОТАЮЩЕГО ПРИ
СКАЛЯРНОМ УПРАВЛЕНИИ В ПОВТОРНО-
КРАТКОВРЕМЕННОМ НОМИНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ
С ЧАСТЫМИ ПУСКАМИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ
ТОРМОЖЕНИЕМ**

**ABOUT USING THE SIMULATION SYSTEM *VisSim*
FOR THE INVESTIGATION OF THE ELECTRIC
DRIVE, WORKING UNDER SCALAR CONTROL IN
REPEATLY-SHORT-TERM NOMINAL MODE WITH
FREQUENT STARTS AND ELECTRIC BRAKING**

Александр Александрович Евсиков
кандидат технических наук
директор филиала «Протвино»
Государственного университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный проезд, д. 9
Тел. +7(4967)31-01-91
E-mail: eaa@uni-protvino.ru

Анатолий Петрович Леонов
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
заместитель директора по учебной и
научной работе филиала «Протвино»
Государственного университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный проезд, д. 9
Тел. +7(4967)31-01-92
E-mail: anatoli.leonov@gmail.com

Аннотация

С использованием системы моделирования *VisSim* для электропривода, работающего при скалярном управлении в режиме *S5*, разработаны: интерактивный алгоритм выбора трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с программой расчета допустимого числа его включений; механодинамическая модель двигателя для определения его механических характеристик.

Ключевые слова: повторно-кратковременный номинальный режим с частыми пусками и электрическим торможением, скалярное управление, трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Summary

With the use of the *VisSim* modeling system, there are designed for an electric drive operating with scalar control in the *S5* mode: interactive algorithm for selecting a three-phase a squirrel-cage asynchronous motor with a program for calculating the permissible number of its inclusions; mechanodynamic model of the motor for determining its mechanical characteristics.

Keywords: repeatedly-short-term nominal mode with frequent starts and electric braking, scalar control, three-phase a squirrel-cage asynchronous motor.

Введение

Повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками и электрическим торможением (режим *S5*) широко используется в приводах металлорежущих станков, прокатных станов, вспомогательных механизмов и другого оборудования, когда по условиям технологического процесса возникает необходимость в большой частоте включений двигателей (до 600 и более включений в час) [10].

Режим *S5* представляет собой последовательность одинаковых рабочих циклов электродвигателя продолжительностью $t_{\text{ц}}$ (рисунки 1).

Исследование привода выполним для наиболее распространенного случая с постоянным моментом сопротивления нагрузки $M_c \approx \text{const}$. Каждый из рабочих циклов состоит из следующих периодов [1, 8]:

1. Пуск (при продолжительности t_n и моменте двигателя $M_{\text{дв}} = M_n$, где пусковой момент $M_n = M_c + J \cdot d\omega_n / dt$; M_c, J, ω_n – приведенные к валу двигателя соответственно моменты сопротивления и инерции электромеханической части привода, угловая скорость нагрузки).

2. Работа в установившемся режиме с постоянной нагрузкой (при продолжительности $t_{\text{уст}}$,

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$\omega_n = \omega_{уст}$ и $M_{до} = M_{уст} = M_c$.

3. Электрическое торможение (при продолжительности t_m и моменте двигателя $M_m = M_c - J \cdot d\omega/dt$).

4. Пауза продолжительностью t_o , за время которой скорость ω_n уменьшается до нуля, а температура двигателя $\theta_{до}$ уменьшается до величины $\theta_{мин} > \theta_{ок}$, где $\theta_{ок}$ – температура окружающей среды.

Продолжительность включения двигателя

$$ПВ = [(t_n + t_{уст} + t_m) / t_c] \cdot 100\%.$$

В соответствии с ГОСТ183 нормированные значения ПВ=15;25;40;60%.

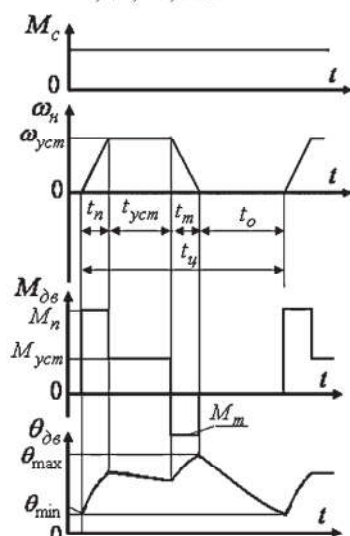


Рис. 1. Временные диаграммы работы электропривода в режиме S5

Продолжительность цикла t_c недостаточна для достижения теплового равновесия. Среднее превышение температуры двигателя $\tau_{cp} = \theta_{max} - \theta_{ок}$ достигается при большом числе рабочих циклов.

Под допустимой частотой $h_{дон}$ будем понимать такое число включений в час, при котором двигатель полностью используется по нагреву, то есть среднее превышение температуры двигателя $\tau_{cp} = \tau_{дон}$, где $\tau_{дон}$ – допустимый (нормативный) перегрев двигателя, определяемый классом его изоляции [9].

В современном автоматизированном производстве широко используются электроприводы на базе трехфазных асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым (кз) ротором при их скалярном управлении от преобразователей частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока [2, 4, 9].

Целью работы является разработка в системе математического моделирования *VisSim* [3, 7]:

1. Интерактивного алгоритма выбора трехфазного АД с кз ротором для режима S5 с программой расчета $h_{дон}$.

2. Механодинамической модели АД при скалярном управлении.

1. Разработка интерактивного алгоритма выбора типа трехфазного АД с кз ротором для режима S5

Для использования в режиме S5 рекомендуются *специальные двигатели переменного тока*, предназначенные для работы в повторно-кратковременном режиме S3 [6, 8]. Особенности этих двигателей: пониженная величина момента инерции ротора; большой пусковой момент при сравнительно небольших пусковых токах; повышенная перегрузочная способность.

При отсутствии значительных нагрузок возможно применение в режиме S5 АД общепромышленного назначения для продолжительного режима работы S1. Однако использование таких двигателей в режиме S5 приводит к снижению надежности электропривода и его энергетических показателей. Это объясняется тем, что по сравнению со специальными двигателями АД для продолжительного режима имеют меньшие значения перегрузочной способности и пускового момента, больший момент инерции ротора, меньший диаметр вала и меньший ресурс подшипников [6, 8].

В режиме S5 существенное влияние на перегрев двигателя оказывают переходные режимы, связанные с его частыми пусками и электрическим торможением, в переходных режимах значения токов в обмотках трехфазных АД с кз ротором превышают номинальные в 5–7 раз [6].

1.1. Выбор АД с использованием системы моделирования *VisSim*

Выбор АД для режима S5 затрудняется тем, что точная нагрузочная диаграмма для этого режима (рисунок 1) предварительно не может быть рассчитана, так как потери в переходных режимах могут быть точно определены только с учетом момента инерции ротора двигателя. Поэтому сначала выполняется предварительный выбор АД, а затем по уточненной нагрузочной диаграмме – окончательный выбор.

Интерактивный алгоритм выбора типа АД в системе моделирования *VisSim* представлен на рисунке 2.

На этапе предварительного выбора АД в блок исходных данных пользователь заносит заданные в нагрузочной диаграмме параметры электропривода: $M_c, J, \omega_n, \omega_{уст}, t_n, t_{уст}, t_m, t_c$.

Затем пользователь запускает программу расчета требуемой мощности двигателя $P_{мп}$, значение которой вычисляется без учета момента инерции ротора АД в следующем порядке [8]:

1. Расчет пускового момента M_n на участке разгона (рисунок 1)

$$M_n = J \omega_{уст} / t_n + M_c \quad (1)$$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

2. Расчет тормозного момента M_m на участке торможения (рис.1)

$$M_m = M_c - J \cdot \omega_{уст} / t_m \quad (2)$$

3. Определение эквивалентного момента нагрузки $M_{эки}$

$$M_{эки} = \sqrt{\frac{M_n^2 t_n + M_c^2 t_{уст} + M_m^2 t_m}{t_n + t_{уст} + t_m}} \quad (3)$$

4. Расчет эквивалентной мощности двигателя

$$P_{эки} = M_{эки} \cdot \omega_{уст} \quad \text{или} \quad P_{эки} = 0.105 M_{эки} \cdot n_{уст} \quad (4)$$

5. Определение относительной продолжительности рабочего периода

$$PB_p = [(t_n + t_{уст} + t_m) / t_p] \cdot 100\% \quad (5)$$

6. Вычисление требуемой мощности $P_{мп}$ с учетом коэффициента запаса $k_3 = 1.1 \div 1.3$ при $PB_p = 40\%$

$$P_{мп} = k_3 \cdot P_{эки} \cdot \sqrt{PB_p / 40} \quad (6)$$

Если допустимо применение в режиме S5 двигателей общепромышленного назначения для продолжительного режима работы S1, то ориентировочное значение требуемой мощности двигателя $P_{мп}$ выбирается из условия

$$P_{мп} = k_3 \cdot P_{эки} \cdot \sqrt{PB_p / 40}$$

Значение $P_{мп}$ выводится на экран монитора и пользователь выбирает трехфазный АД с кз ротором, имеющий номинальную мощность $P_{ном} \geq P_{мп}$ и номинальную частоту вращения $n_{ном} \geq n_{уст}$.

Параметры выбранного двигателя заносятся пользователем в блок исходных данных программы его окончательного выбора.

По команде пользователя с учетом величины момента инерции ротора $J_{дв}$ определяются [8]:

- среднее значение момента двигателя при пуске

$$M_{н ср} = (J + J_{дв}) \cdot \omega_{уст} / t_n + M_c \quad (7)$$

- среднее значение момента двигателя при торможении

$$M_{м ср} = M_c - (J + J_{дв}) \cdot \omega_{уст} / t_m \quad (8)$$

- уточненные значения эквивалентного момента

$$M_{эки ум} = \sqrt{\frac{M_{н ср}^2 t_n + M_c^2 t_{уст} + M_{м ср}^2 t_m}{t_n + t_{уст} + t_m}} \quad (9)$$

и эквивалентной мощности

$$P_{эки ум} = M_{эки ум} \cdot \omega_{уст} \quad \text{или} \quad P_{эки ум} = 0.105 M_{эки ум} \cdot n_{уст} \quad (10)$$

Уточненное значение требуемой мощности двигателя

$$P_{мп ум} = P_{эки ум} \cdot \sqrt{PB_p / 40} \quad (11)$$

Для предварительно выбираемого АД проверяется выполнение условия

$$P_{ном} \geq P_{мп ум} \quad (12)$$

Если условие (12) не соблюдается, то выводится соответствующее сообщение и пользователю предлагается: выбрать более мощный двигатель; занести его параметры в блок исходных данных программы окончательного выбора двигателя; дать команду на выполнение этой программы.

Если условие (12) выполняется, то осуществляются проверки правильности выбора АД:

1. По условиям пуска

$$0.8 M_{н ад} \geq M_c \quad (13)$$

где $M_{н ад}$ – справочное значение пускового момента двигателя

2. На перегрузочную способность при работе на максимальную нагрузку

$$0.8 M_{кр} \geq M_{н ср} \quad (14)$$

Проверка осуществляется для наихудшего случая, когда напряжение питания обмотки статора имеет наименьшую разрешенную величину, равную 0.9 от номинальной ($0.9 U_{ном}$). Учитывая, что момент АД пропорционален квадрату питающего напряжения [5], в выражения (13) и (14) вводится множитель 0.8. Если хотя бы одно из условий (13) или (14) не выполняется, то выводится сообщение и предлагается осуществить выбор нового двигателя. Если условия (13) и (14) выполнены, то производится расчет $h_{дон}$.

1.2. Определение допустимого числа включений двигателя при частотном управлении

При установившейся температуре двигателя рассеиваемая в окружающую среду энергия равна выделяемым в двигателе потерям энергии за цикл. Потери энергии за цикл включают в себя потери энергии в переходных режимах пуска t_n , торможения t_m и в установившемся режиме $t_{уст}$.

По критерию значений потерь мощности и энергии частотный способ регулирования скорости АД относится к экономичному, характеризующемуся малыми потерями [5].

Для выбранного АД допустимое число включений в час [10]

$$h_{дон} \approx 3600 \cdot \frac{(\Delta P_{ном} - \Delta P) \cdot \varepsilon + \beta \Delta P_{ном} (1 - \varepsilon)}{\Delta W_n + \Delta W_m} \quad (15)$$

Величину $h_{дон}$ определяют следующие параметры:

1. Номинальные потери мощности

$$\Delta P_{ном} [Вт] = \frac{P_{ном} (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}} \quad (16)$$

где $\eta_{ном}$ – номинальный КПД АД.

2. Потери мощности ΔP в двигателе в установившемся режиме. Они подразделяются на постоянные K и переменные V потери

$$\Delta P [Вт] = K + V \quad (17)$$

Под постоянными потерями K подразумеваются потери в стали магнитопровода, механические потери от трения в подшипниках и вентиляционные потери. Поскольку они изменяются незначительно, то принимаем их неизменными и равными разности между номинальными постоянными и переменными потерями [9].

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$K[Bm] = \Delta P_{ном} - V_{ном} = \Delta P_{ном} - M_{ном} \omega_0 s_{ном} \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (18)$$

где $M_{ном}$ – номинальный момент двигателя;
 $\omega_0 = 2\pi f/p$ – угловая скорость холостого хода (f – частота напряжения питания, p – число пар полюсов АД);

$s_{ном}$ – номинальное скольжение; активное фазное сопротивление обмотки статора.

$$R_1[Ом] = [(3U_{1ф}^2 / 2\omega_0 M_{кр})^2 - X_{к.з.}^2] / (3U_{1ф}^2 / \omega_0 M_{кр}) \quad (19)$$

$$X_{к.з.} = U_{1ф} / I_{1ном} \cos \varphi_{ном} (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) \quad (20)$$

где $U_{1ф} = 220$ В;

$I_{1ном}$ – номинальный ток в обмотке статора;

$\varphi_{ном}$ – номинальный угол сдвига по фазе между током и напряжением в обмотке статора;

$\lambda_m = M_{кр} / M_{ном}$ – кратность максимального момента.

Приведенное к обмотке статора фазное сопротивление обмотки ротора

$$R_2' = M_{ном} \omega_0 s_{ном} / 3I_{1ном}^2 \cos^2 \varphi_{ном} \quad (21)$$

Полные переменные потери в установившемся режиме [10]

$$V = M_c \omega_0 s \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (22)$$

Поскольку при частотном управлении величина скольжения s постоянна и не зависит от скорости ω_0 скалярное управление энергетически эффективно, в том числе, при регулировании на малых оборотах.

3. Относительная продолжительность включения $\varepsilon = (t_n + t_{ycm} + t_m) / (t_n + t_{ycm} + t_m + t_o)$ (23)

4. β – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения двигателей с самовентиляцией при уменьшении частоты вращения [8].

5. Полные потери энергии в переходных режимах.

На практике при частотном управлении реализуется плавное изменение частоты и амплитуды управляющего напряжения с помощью ПЧ, что существенно сокращает потери энергии в переходных процессах. В общем случае расчет потерь энергии в системе «ПЧ–АД» требует решения сложных нелинейных дифференциальных уравнений. При разработке программы расчета $h_{дон}$ остановимся на часто встречающемся на практике случае, когда выполняются два условия [5]:

● линейное изменение скорости холостого хода

$$\omega_0 = \omega_{нач} \pm \varepsilon t,$$

где ε – темп изменения ω_0 (при пуске $\varepsilon = \omega_{ycm} / t_n$, при торможении $\varepsilon = \omega_{ycm} / t_m$);

● $t_n \gg T_m$ и $t_m \gg T_m$, где электромеханическая постоянная времени $T_m = J \omega_0 / M_n$.

Тогда полные потери энергии ΔW_n при пуске

$$\Delta W_n = \Delta W_K + \Delta W_V = K \cdot t_n + \left[\frac{J \omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \cdot (1 - s^2) \cdot \frac{M_{ncp}}{M_{ncp} - M_c} \right] \cdot 2 \frac{T_m}{t_n} \quad (24)$$

где скорость ω_0 определяется при частоте управляющего напряжения, обеспечивающего скорость $\omega_n = \omega_{ycm}$.

Полные потери энергии ΔW_m при торможении

$$\Delta W_m = K \cdot t_m + \left[\frac{J \omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \cdot (1 - s^2) \cdot \frac{M_{mcp}}{M_{mcp} + M_c} \right] \cdot 2 \frac{T_m}{t_m} \quad (25)$$

2. Разработка механодинамической модели трехфазного АД с кз ротором при скалярном управлении

Исходные требования к разрабатываемой модели:

1. Структура модели должна быть достаточно простой, чтобы при ее использовании не возникали трудности в восприятии смысла моделируемого процесса.

2. Используемые при моделировании параметры двигателя должны быть доступны для пользователя, в том числе, в отечественных справочниках.

Механодинамическая модель трехфазного АД с кз ротором состоит из трех submodule (рисунк 3). В submodule 1 заносятся исходные параметры АД и механической части привода. Расчет промежуточных параметров, необходимых для построения механической характеристики двигателя

$$n[\text{об/мин}] = f(M_{об}[Hm]),$$

выполняется в submodule 2. Значения вращающего момента $M_{об}$ и частоты вращения n вала АД рассчитываются в submodule 3. Для расчета $M_{об}$ используем модифицированную под скалярное управление формулу Клосса [11].

$$M_{об} = 2M_{кр} \cdot (U/U_{ном})^2 \cdot (f/f_{ном}) / [(s/s_{кр})^2 + (s_{кр}/s)^2] \quad (26)$$

где U , $U_{ном}$ – соответственно текущее и номинальные значения напряжения на обмотке статора при регулировании угловой скорости АД; f , $f_{ном}$ – соответственно текущее и номинальные значения частоты напряжения на обмотке статора;

s – скольжение, соответствующее текущему значению $M_{об}$;

$s_{кр}$ – скольжение, соответствующее критическому моменту $M_{кр}$.

По рассчитанному значению $M_{об}$, заданной величине M_c и знаку скорости вращения вычисляются величина вращающего момента $M_{вр}$, ускорение ε ротора двигателя и частота вращения n (рисунк 3).

С использованием данной модели получены механические характеристики АД типа АИР90Л4 (рисунк 4).

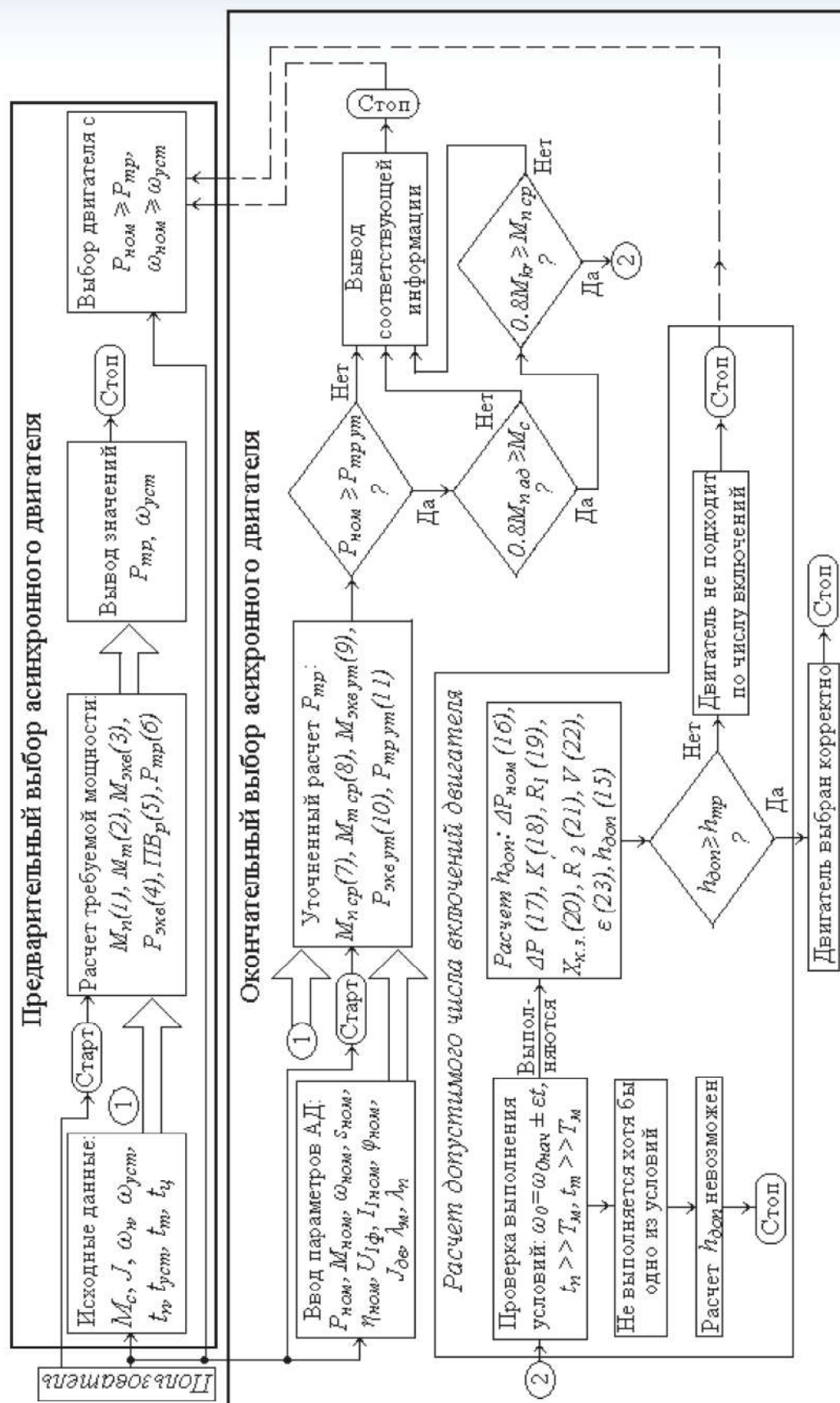


Рис. 2. Интерактивный алгоритм выбора АД для режима S5
(в скобках приведены номера формул в тексте, используемых для расчетов)

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

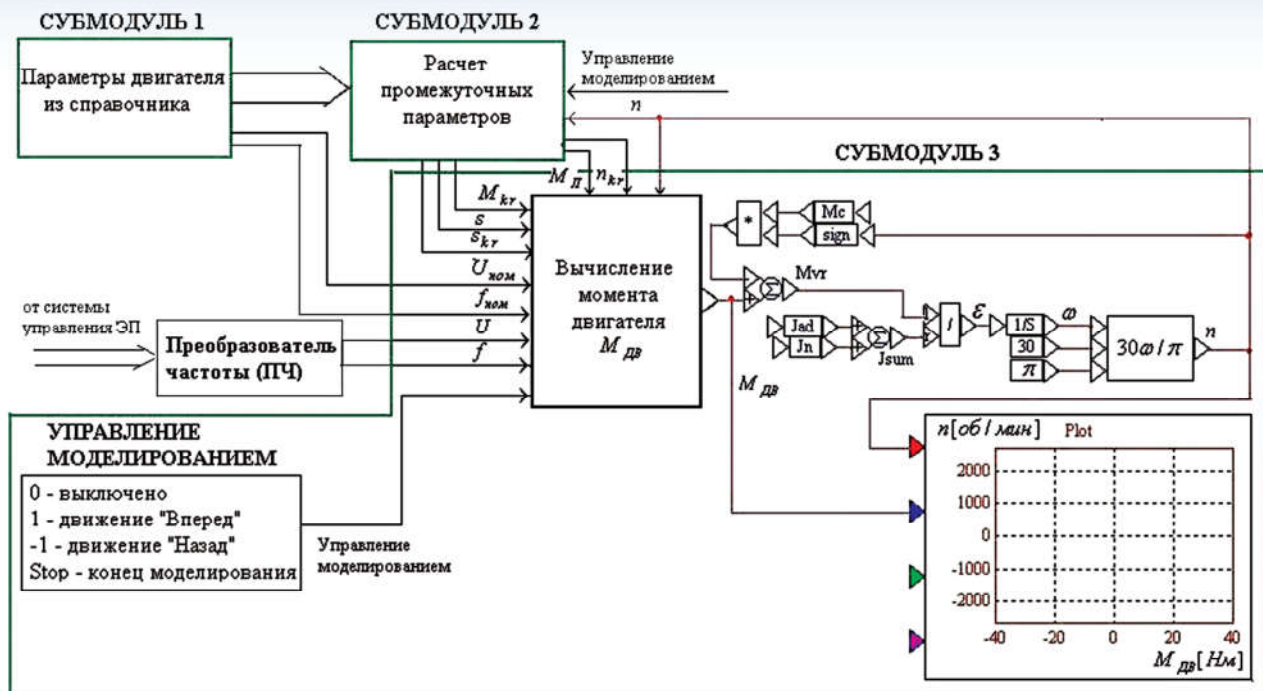


Рис. 3. Механодинамическая модель трехфазного АД с кз ротором при скалярном управлении

Расчет значений $M_{дв}$ по формуле Клосса хорошо соответствует экспериментальным характеристикам двигателя на рабочем участке (рисунок 4). При пуске $n \leq n_{кр}$ ($n_{кр}$ – частота вращения ротора, соответствующая $M_{кр}$) получаем заниженные значения пускового момента $M_{пдв}$ двигателя. Поэтому при расчетах на участке пуска используем специально подобранную формулу, обеспечивающую прохождение графика через точки, соответствующие номинальным значениям пускового $M_{пном}$ и максимального $M_{крном}$ моментов двигателя при $f=f_{ном}$.

При скалярном управлении АД получаем двух зонное регулирование (рисунок 4):

1. При $f \leq f_{ном}$ и $Uf=const$ обеспечивается постоянная (номинальная) перегрузочная способность привода $M_{кр}=const$.
2. При частотах $f > f_{ном}$ и $U=U_{ном}$ соотношение $Uf=const$ не выполняется. В результате с увеличением f значения $M_{кр}$ и $M_{пном}$ уменьшаются, а величина частоты вращения n увеличивается. Регулирование скорости АД ведется с нагрузкой типа «постоянная мощность» при $P=P_{ном}$.

Выводы

1. В системе моделирования *VisSim* реализован удобный для пользователя интерактивный алгоритм выбора типа АД для режима S5.
2. Программа расчета $h_{дон}$ разработана для скалярного управления АД.
3. Предлагаемая модель АД (рисунок 3) учи-

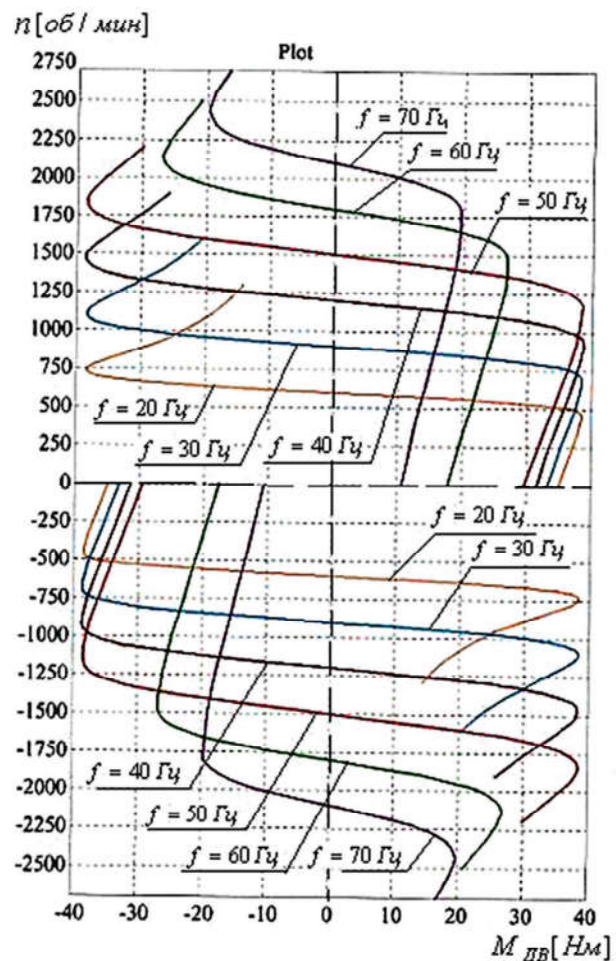


Рис. 4. Механические характеристики АД типа AIP90L4 при скалярном управлении

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

тывает механическую инерционность электропривода, пренебрегая существенно меньшей электромагнитной инерционностью. Она применима при скалярном управлении АД. С ее использованием могут быть исследованы режимы пуска АД (I и III квадранты на *рисунке 4*), рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть (II и IV квадранты на *рисунке 4*), а также влияния нагрузки (величин J и M_c) на динамику электропривода.

Литература

1. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 576 с.
2. Высокоточные приводы, сервоприводы и системы ЧПУ Siemens. Электрон. дан. – Режим доступа: http://tekhar.com/Programma/Siemens/Privod_tech/Preobrazovateli/Servo/index_servo.htm
3. Дьяконов В.П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 384 с.
4. Евсиков А.А., Коковин В.А., Леонов А.П. Системы управления оборудованием в автоматизированном производстве: Учебное пособие. Дубна: Гос. ун-т «Дубна», 2018. 139 с.
5. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: Учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2003. 224 с.
6. Кацман М.М. Электрический привод. М.: ИЦ «Академия», 2011, 384 с.
7. Клиначев Н.В. Моделирование систем в программе VisSim: Справочная система. Offline версия 1.0. Челябинск, 2001. 212 файлов.
8. Леонов А.П. Выбор исполнительных двигателей для электрических приводов производственных механизмов. Учебное пособие. М.: Прометей, 2013. 139 с.
9. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 416 с.
10. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. 6-е изд., доп. и перераб. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
11. <http://model.exponenta.ru>