

Анализ поведения асинхронного электропривода с замкнутой скалярной системой управления при изменении индуктивности намагничивающего контура

Ю.Л. ЖУКОВСКИЙ ✉, Б.Ю. ВАСИЛЬЕВ, Н.А. КОРОЛЕВ, Я.М. МАЛЬКОВА

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ zhukovskiy_yul@pers.spmi.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Zhukovskiy, Yu.L., Vasilev, B.Y.; Korolev, N.A.; Malkova, Y.M. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit *Indonesian Journal of Science & Technology* 2023, 8(1), 65-78. <https://doi.org/10.17509/ijost.v8i1.51983>

Аннотация: Статья посвящена исследованию автоматизированного электропривода со скалярной замкнутой системой регулирования скорости. Тяжелые условия эксплуатации и режимы работы электропривода определяют реальный срок службы. Износ асинхронного двигателя, как ключевого звена электропривода, был связан с отклонением от номинальных параметров. Отклонение параметров эквивалентной схемы асинхронного двигателя определяло фактор изменения характеристик. Параметры эквивалентной схемы определяли точность настройки регуляторов и оптимальных алгоритмов в системе управления электроприводом. В режимах непрерывной работы исключена возможность автоподстройки регуляторов, требующая остановки или режима холостого хода. Рассмотрено влияние величины взаимной индуктивности контура намагничивания асинхронного двигателя на поведение системы управления электроприводом. Оценка поведения скалярной замкнутой системы управления скоростью производилась по основным энергетическим (коэффициент мощности, КПД) и механическим (скорость, электромагнитный момент) характеристикам электропривода.

Ключевые слова: Автоматический электропривод, Асинхронный двигатель, Параметры эквивалентной схемы, Взаимная индуктивность цепи намагничивания, Скалярная система управления, Техническое состояние.

Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit

Yuriy L. ZHUKOVSKIY ✉, Bogdan Yu. VASILEV, Nikolay A. KOROLEV, Yana M. MALKOVA

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ zhukovskiy_yul@pers.spmi.ru

Abstract: The article was devoted to the study of an automated electric drive with a scalar closed-loop speed control system. Severe duty and operating modes of electric drive determine the actual service life. Wear of the induction motor, as a key link of the electric drive, was associated with deviation from nominal parameters. The deviation of parameters of the induction motor equivalent circuit determined the resultant change of characteristics. The parameters of the equivalent circuit determined the accuracy of the adjustment of regulators and optimal algorithms in the control system of the electric drive. In continuous operation modes the possibility of auto-tuning regulators, which requires stopping or no-load mode, was excluded. The paper considered the influence of the magnetization circuit mutual inductance value of the induction motor on the behavior of the electric drive control system. Evaluation of the behavior of the scalar closed-loop speed control system was performed on the basic energy (power factor, efficiency factor) and mechanical (speed, electromagnetic torque) characteristics of the electric drive.

Keyword: Automatic electric drive, Induction motor, Parameters of equivalent circuit, Magnetization circuit mutual inductance, Scalar control system, Technical condition.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2022 Tim Pengembang Jurnal UPI. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY-SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

1. Введение

Существующие подходы к повышению эффективности работы частотно-регулируемых электроприводов промышленных машин и агрегатов основаны на достижении их оптимальных энергетических и механических параметров. Требуемые показатели достигаются путем реализации различных решений в силовой и управляющей частях электроприводов. В последнее время цифровые технологии зарекомендовали себя как хороший инструмент для повышения эффективности промышленных объектов за счет совершенствования алгоритмов в системах управления (Рунджи и др., 2022; Николаев и др., 2022). Применение нейронных сетей (Эверт и др., 2020; Чжоу и др., 2021) и алгоритмов машинного обучения (Куделина, 2021; Маникандан и Дурайвелу, 2021) избавляет от необходимости решать задачи оптимизации энергетических и механических параметров и обеспечивает требуемое качество регулирования в системах управления электроприводами и типовыми механизмами.

1.1. Алгоритмические подходы к улучшению электромеханических характеристик асинхронного электропривода

Гибридный алгоритм широтно-импульсной модуляции (PWM) обеспечивает стабильный коэффициент мощности. Применение нового типа контроллера с алгоритмом пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (SVPWM) в скалярной системе управления. Такое сочетание алгоритмов управления позволяет достичь более высокого выходного напряжения при обеспечении номинальных электромеханических характеристик за счет поддержания номинального потокосцепления в различных диапазонах скоростей. Авторы (Чжан и Ю, 2007; Хуа, 2003) В.Ф. Чжан, Ю.Х. Ю и Б. Хуа рассмотрели эффективность синусоидальной широтно-импульсной модуляции (SPWM) и пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (SVPWM). Эффект показан на примере различных значений THD и коэффициента использования напряжения постоянного тока. Выбор подходящей системы модуляции должен осуществляться в соответствии с требованиями привода с учетом этих значений. В статьях различных научных коллективов (Султана и др., 2021) представлена разработка экспериментального инвертора на базе FPGA (программируемых вентильных матриц), который обеспечивает снижение акустического шума и пульсаций момента за счет реализации модуляции и скалярного закона управления.

Многие научные работы посвящены совершенствованию оптимальных законов управления и поиску простых и эффективных решений на этапах пуска, торможения или непрерывных режимов работы электропривода. Например, оптимизация методом роя частиц (PSO) и поисковая оптимизация Cuckoo (CSO) были предложены некоторыми исследователями, чтобы оптимизировать энергоэффективность скалярного управления трехфазными асинхронными двигателями путем изменения соотношения напряжения/частоты привода (V/F) для оптимизации расхода воздушного зазора в зависимости от механической нагрузки (Грациола и др., 2022), что привело к снижению энергопотребления на 35,9 % в замкнутом контуре и на 48,06 % в разомкнутом контуре. Многие решения связаны с обходом резонансных частот при ускорении (Яблонски и Борковски, 2022) или уменьшению пульсаций электромагнитного момента (Емельянов и Чуркин, 2014) путем включения дополнительного контура управления током статора в скалярную систему управления.

Адаптивные алгоритмы систем управления электроприводами активно разрабатываются многими учеными. Основными инструментами являются алгоритмы нечеткой логики (Sun et al., 2009), генетические алгоритмы (Устун и Демиртас, 2009) и нейросетевые алгоритмы (ANN-алгоритмы) (Кришнасами и Ашок, 2022), которые обеспечивают настройку коэффициентов регуляторов. Значительная часть ученых проводит исследования автоматизированного электропривода со скалярной системой управления. Выбор данной системы управления обусловлен ее широким применением в промышленности из-за невысоких требований к точности регулирования, энергоэффективности для электрических машин малой и средней мощности, а также экономической целесообразности применения.

Асинхронные автоматизированные электроприводы вентиляторных и насосных установок являются распространенными и надежными потребителями на нефтегазовых и горнодобывающих предприятиях (Докка и др., 2020; Бойков и Пайор, 2022). Для управления вентиляторными механизмами характерно использование скалярной системы управления с соответствующей оптимизацией. В статье предлагается рассмотреть асинхронный автоматизированный электропривод с использованием скалярной системы управления для достижения оптимальных энергетических и механических параметров.

1.2. Износ и дефекты асинхронных двигателей

Асинхронный двигатель (АД), являясь одним из ключевых элементов электропривода, подвержен многофакторному воздействию со стороны преобразователя частоты, рабочего механизма и окружающей среды (Лавренко и Шишлянников, 2021; Болобов и др., 2019). Несмотря на то, что короткозамкнутый АД является достаточно надежной машиной (Марфоли и др., 2021), его эксплуатация сопровождается износом и появлением дефектов под воздействием вышеперечисленных факторов. Дефекты, возникающие на начальном этапе, не приводят к аварийным режимам работы и остановке машины. К таким дефектам можно отнести:

- (i) провалы и межвитковые замыкания обмотки статора (Бенто и др., 2021; Пьетржак и Волькевич, 2021);
- (ii) нарушение целостности пакета активной стали (Островерхов и Наливайко, 2020);
- (iii) поломка стержней ротора (Гарсия-Кальва и др., 2021; Фернандес-Каверо и др., 2021);
- (iv) механическое ослабление крепежа и муфт (Сяо и др., 2022).

Согласно статистическим данным нефтегазовых и горнодобывающих компаний (Котелева и др., 2021), причинами отказов асинхронных двигателей являются дефекты, представленные на рисунке 1.

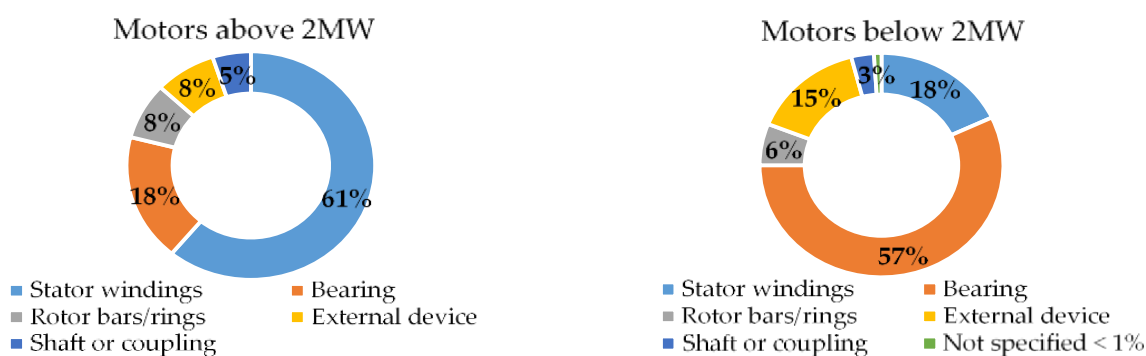


Рис. 1. Статистические данные по отказам асинхронных двигателей

Существующие подходы к повышению КПД, обеспечению оптимальных динамических и энергетических характеристик (Васильева и др., 2021; Савард и др., 2021), а также поддержанию работоспособности в значительной степени основаны на скалярной системе управления электроприводом. Анализ исследований показал актуальность разработки алгоритмов управления системами электропривода с учетом наличия дефектов в АД (Сычев и др., 2022; Ключев и др., 2021). Однако анализу и разработке алгоритмов, учитывающих изменение индуктивности намагничивания статора при наличии межвиткового замыкания, в современной литературе не уделялось должного внимания. Поэтому в данной работе рассматривается гипотеза (идея), которая заключается в том, что при наличии межвиткового замыкания в обмотке статора возникает несимметрия фазных напряжений и отклонение параметров цепи от номинальных значений. Однако наличие этого дефекта не приводит к срабатыванию систем защиты по току и напряжению, так как значения токов и напряжений не выходят за пределы установленных значений (Воронин и Непша, 2020).

При работе в непрерывном режиме S1 и отсутствии перехода в режим холостого хода при межоборотных замыканиях в статоре возникает рассогласование в настройке регулятора, что снижает КПД электропривода, изначально достигнутый в конструкции. Для оценки изменения динамических, механических и энергетических характеристик электропривода при наличии дефекта была построена имитационная модель. Для экспериментального исследования были проведены измерения активного и индуктивного импедансов асинхронного двигателя при межвитковом замыкании в статоре.

На основе этих измерений были рассчитаны параметры эквивалентной схемы. В связи с опасностью создания межоборотных коротких замыканий и возможностью повреждения лабораторного оборудования было принято решение провести моделирование процессов.

2. Методы

Анализ поведения асинхронного электропривода при возникновении межвитковых замыканий проводился на основе имитационного моделирования в Matlab Simulink в два этапа: моделирование электропривода без системы управления; моделирование электропривода со скалярной системой

управления. Общая структура исследуемого автоматизированного электропривода представлена на рисунке 2. АД подключается к источнику питания через преобразователь частоты. Силовая часть преобразователя представлена двухсекционной структурой с неуправляемым 6-пульсным выпрямителем и двухуровневым инвертором напряжения. Управление двигателем осуществляется с помощью скалярной системы управления скоростью с замкнутым контуром. Скалярное управление осуществляется в соответствии с законом (1)

$$U/f = \text{const}, \quad (1)$$

где U – напряжение обмотки статора; f – частота напряжения обмотки статора.

Напряжение на обмотках статора двигателя формируется с помощью синусоидальных алгоритмов PWM. В случае моделирования электропривода без системы управления асинхронный двигатель подключается к источнику питания напрямую без преобразователя частоты. В качестве моделируемого электродвигателя был выбран АД общепромышленного применения серии AIR 315 с номинальными параметрами (табл. 1). По паспортным данным (табл. 1) и измерениям сопротивления АД были рассчитаны заданные параметры эквивалентной схемы (Гридин, 2012). Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 1

Номинальные параметры АД

Мощность P , Вт	Источник напряжения U_n , В	Скорость вращения ротора n , об/мин	Количество пар полюсов z	Момент инерции J , кг·м ²	η	$\cos\varphi$	K_m	K_p	K_i
132000	380	1450	2	1,5	0,9	0,86	3,0	3,0	3,0

Примечание: $\cos\varphi$ – коэффициент мощности; η – коэффициент полезного действия; K_m – отношение пускового момента к крутящему моменту емкости; K_i – коэффициент пускового тока

Таблица 2

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя

L_s , Гн	L_r , Гн	L_m , Гн	R_s , Ом	R_r , Ом
0,1453	0,1473	0,1400	0,5212	0,3051

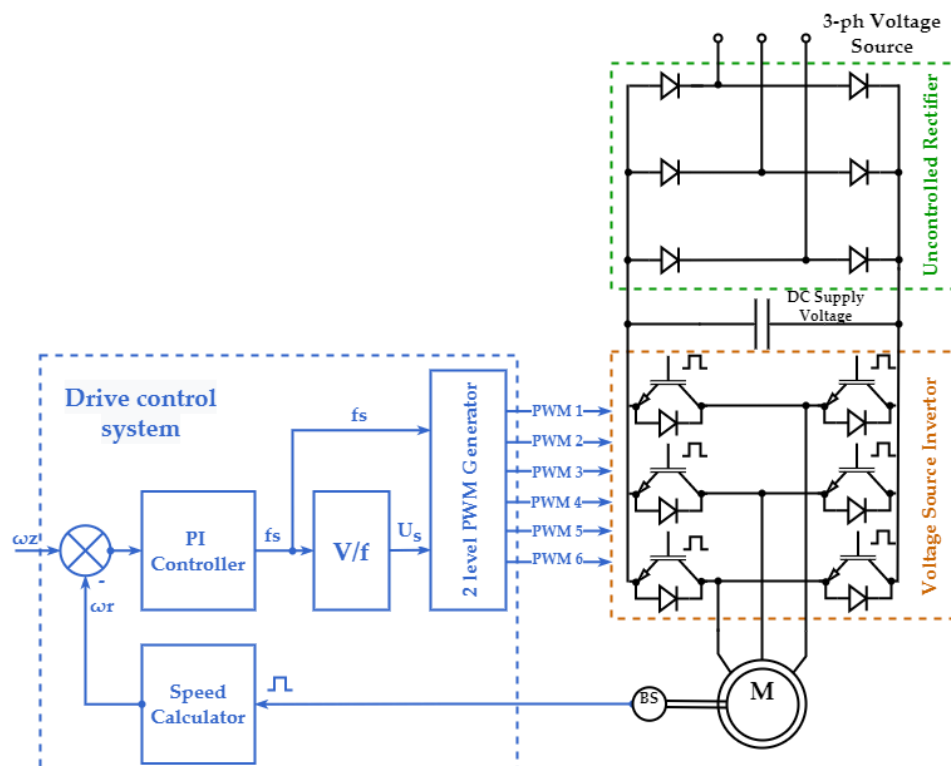


Рис. 2. Структура скалярной системы управления электроприводом, замкнутой по скорости

Математическое описание АД в неподвижной системе координат $\alpha\beta$ представлено системой уравнений (2), включающей уравнения электромагнитного равновесия, уравнения связей токов с потокосцеплениями, а также уравнения электромагнитного момента и движения (Васильев, 2019):

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} &= U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha} \\
 \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} &= U_{s\beta} - R_s I_{s\beta} \\
 \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} &= -R_s I_{s\alpha} - \omega_r \Psi_{r\beta} \\
 \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} &= -R_s I_{s\beta} + \omega_r \Psi_{r\alpha} \\
 I_{s\alpha} &= \frac{1}{\sigma L_s} \Psi_{s\alpha} - \frac{k_r}{\sigma L_s} \Psi_{r\alpha} \\
 I_{s\beta} &= \frac{1}{\sigma L_s} \Psi_{s\beta} - \frac{k_r}{\sigma L_s} \Psi_{r\beta} \\
 I_{r\alpha} &= -\frac{k_r}{\sigma L_r} \Psi_{s\alpha} + \frac{1}{\sigma L_r} \Psi_{r\alpha} \\
 I_{r\beta} &= -\frac{k_r}{\sigma L_r} \Psi_{s\beta} + \frac{1}{\sigma L_r} \Psi_{r\beta} \\
 M &= 1.5zL_m(I_{r\alpha}I_{s\beta} - I_{r\beta}I_{s\alpha}) \\
 \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{M-M_c}{J}
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$, $\Psi_{r\alpha}$ и $\Psi_{r\beta}$ – проекции векторов потокосцепления статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, Вб; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$, $U_{r\alpha}$ и $U_{r\beta}$ – проекции вектора напряжения статора и ротора на оси системы координат оси $\alpha\beta$, В; $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$, $I_{r\alpha}$, $I_{r\beta}$ – проекции вектора тока статора и ротора на оси системы координат $\alpha\beta$, А; R_s и R_r – активные сопротивления статора и ротора, Ом; ω_r – частота вращения ротора, (рад/с); σ – коэффициент диссипации, о.е.; $k_s = L_m/L_s$ – коэффициент диссипации статора, о.е.; $k_r = L_m/L_r$ – коэффициент диссипации ротора, о.е.

Проведено моделирование неуправляемого и управляемого асинхронного электропривода при изменении взаимной индуктивности L_m контура намагничивания. Далее проведена оценка энергетических и электромеханических параметров.

3. Результаты и обсуждение

Исследовалось поведение системы электропривода при изменении L_m в диапазоне от 0,7 до 1,1 от номинального значения с оценкой скорости, электромагнитного момента, токов и потокосцепления в АД, начиная с выхода на номинальную скорость, последующего кратковременного увеличения номинальной нагрузки (в момент времени $t = 6$ с) и последующего увеличения максимальной нагрузки (в момент времени $t = 7$ с) в несколько этапов.

Изменение взаимной индуктивности контура намагничивания в диапазоне 0,7-1,1 Лм связано с межвитковыми токами короткого замыкания в лобовых частях обмотки статора (Скамейкин и др., 2022; Педра и др., 2018). В ходе экспериментов межвитковый ток короткого замыкания создавался в одной из фаз статора электродвигателя (табл. 3 и 4), имеющего схему укладки обмоток, показанную на рис. 3а. С помощью реостата R_{sc} замыкался n -й ряд витков в схеме (рис. 3б), за счет чего создавался эквивалентный межвитковый ток короткого замыкания при ограничении фазного тока допустимыми значениями.

Таблица 3

Энергетические параметры АД при изменении L_m

Параметр	Нагрузка	L_m Гн				
		1.1	1	0.9	0.8	0.7
Коэффициент эффективности	номинальный	0,9565	0,9109	0,8068	0,6249	0,40
	максимальный	0,9565	0,9083	0,7234	0,5000	0,20
Коэффициент мощности	номинальный	0,75	0,8453	0,9031	0,8808	0,80
	максимальный	0,9565	0,8646	0,8265	0,8000	0,78
P Вт	номинальный	130700	145100	162800	207000	x*
	максимальный	203200	227500	260500	586400	x*
Q VAр	номинальный	60110	67160	77380	111300	x*
	максимальный	107700	132200	177500	574400	x*
S VA	номинальный	143800	159900	180200	235000	x*
	максимальный	230000	263100	315200	598400	x*

x* показатели невозможно измерить.

Таблица 4

Энергетические параметры электропривода при изменении L_m

Параметр	Нагрузка	L_m Н				
		1,1	1	0,9	0,8	0,7
Коэффициент эффективности	номинальный	x*	0,922	0,819	0,640	0,395
	максимальный	x*	0,873	0,763	0,528	0,200
Коэффициент мощности	номинальный	x*	0,908	0,908	0,899	0,815
	максимальный	x*	0,891	0,875	0,766	0,233
P W	номинальный	x*	137400	154000	194800	300400
	максимальный	x*	213000	241000	326300	658500
Q VAр	номинальный	x*	63130	70770	94650	213400
	максимальный	x*	108100	133000	280800	661200
S VA	номинальный	x*	151200	169500	216600	368500
	максимальный	x*	238900	275300	431100	679900

x* показатели невозможно измерить

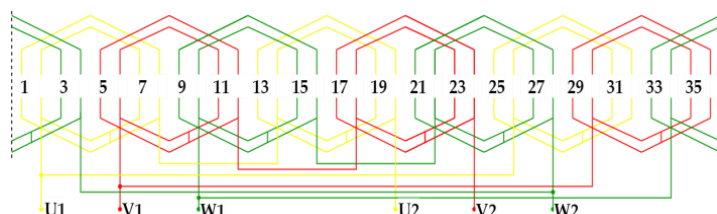


Рис. 3. Статор АД AIR 315: а – схема укладки обмоток статора (U1; V1; W1; U1; V1; W1 – начало и конец фазных обмоток); б – схема межвиткового замыкания

Ток межвиткового замыкания приводит к изменению параметров эквивалентной схемы и, как следствие, к изменению L_m .

3.1. Моделирование асинхронного электропривода без системы управления

На первом этапе было проведено моделирование АД по формуле (2) без управления при питании от синусоидального напряжения промышленной частоты 50 Гц. При плавном изменении L_m с шагом ~10 % фиксировались электромагнитные и механические характеристики электропривода (рис. 4):

- Рост L_m на 10 % увеличивает скорость разгона, что сопровождается увеличением амплитуды пускового электромагнитного момента.
- Уменьшение L_m на 10 % приводит к удвоению времени разгона до номинальной скорости, при этом двигатель не может сформировать электромагнитный момент при максимальной нагрузке.
- Уменьшение L_m на 20 % приводит к увеличению времени разгона до номинальной скорости в ~5 раз, при этом двигатель не может сформировать электромагнитный момент под нагрузкой.

- (iv) Уменьшение L_m до 30 % не обеспечивает формирование номинальной скорости и электромагнитного момента из-за снижения тока момента статора (рис. 5) и потокосцепления ротора (рис. 6) в результате ослабления электромагнитного поля в воздушном зазоре.

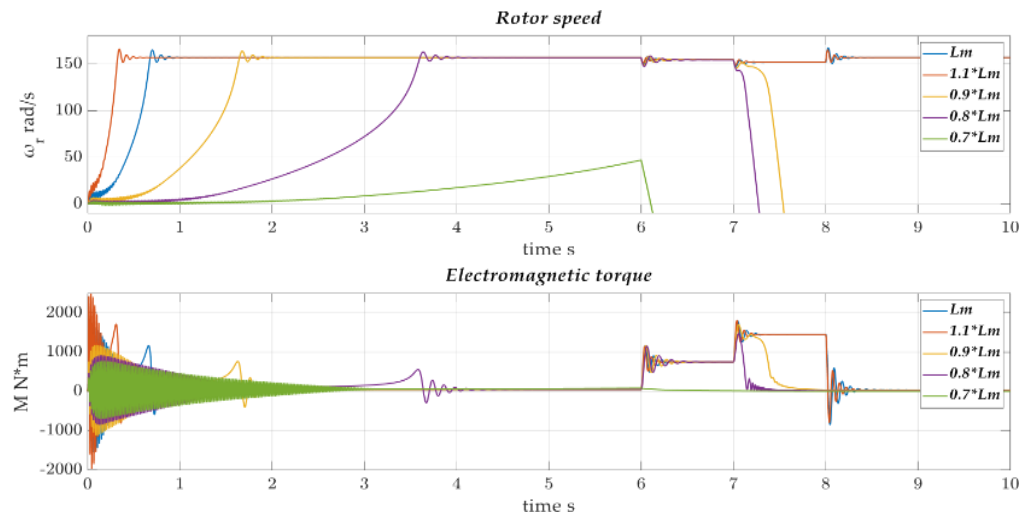


Рис. 4. Скорость вращения ротора и электромагнитный момент

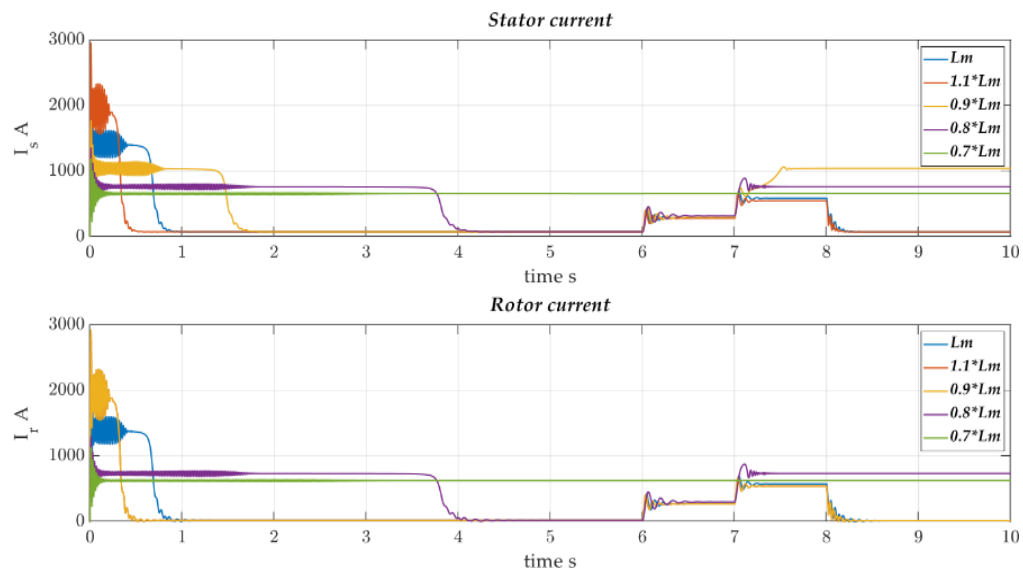


Рис. 5. Токи статора и ротора

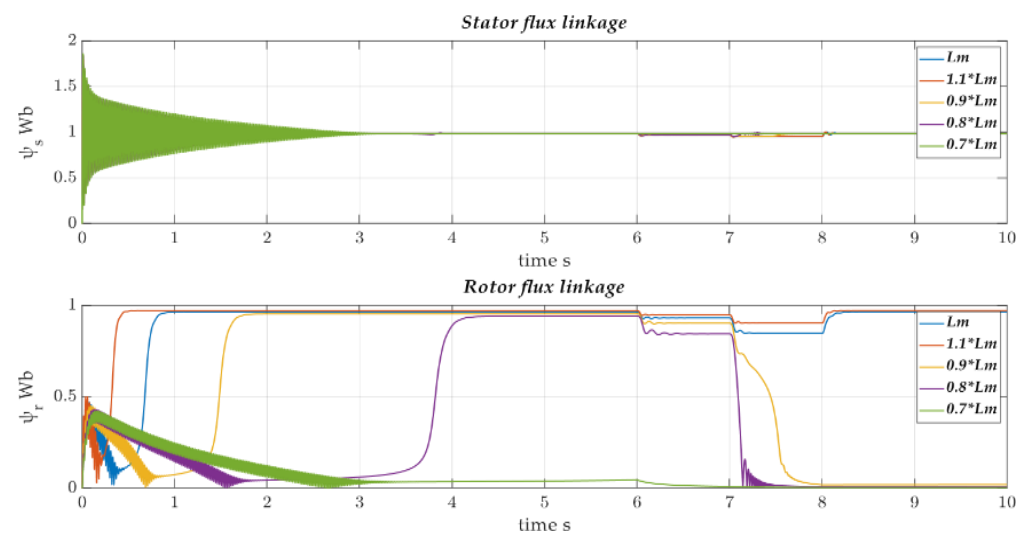


Рис. 6. Связь потоков статора и ротора

Энергетические характеристики нерегулируемого электропривода оценивались с учетом коэффициента полезного действия (КПД), коэффициента мощности (КМ), потребляемых активной (P), реактивной (Q) и суммарной (S) мощностей (табл. 3).

Повышенное значение L_m , связанное с ошибочным определением значения при вводе параметров в эксплуатацию, приводит к улучшению энергетических показателей при номинальной и максимальной нагрузке, в частности к снижению потребляемой мощности P, Q, S; увеличению коэффициента полезного действия, увеличению коэффициента мощности при максимальной нагрузке (рис. 7). Увеличение значения L_m происходит при неправильном определении этого параметра на этапе ввода двигателя в эксплуатацию. Это приводит к улучшению энергетических характеристик при номинальной и максимальной нагрузке, в частности, к снижению потребляемой мощности P, Q и S, повышению КПД и увеличению коэффициента мощности при максимальной нагрузке. При возникновении тока межвиткового замыкания в обмотке статора значение L_m уменьшается, что приводит к ухудшению энергетических характеристик. С увеличением нагрузки ухудшение энергетических характеристик происходит быстрее (рис. 7).

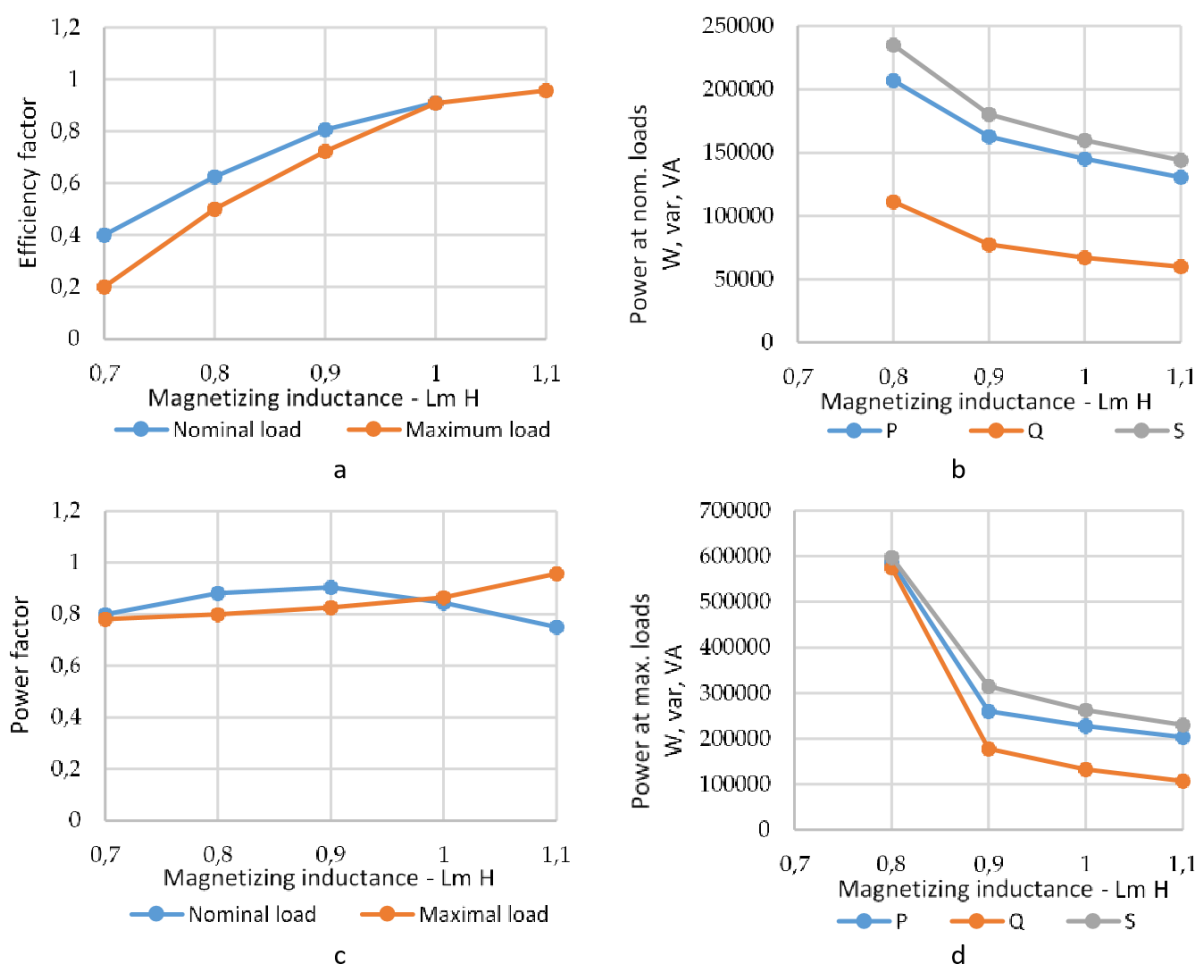


Рис. 7. Энергетические характеристики электропривода при изменении L_m

3.2. Моделирование асинхронного электропривода со скалярной системой управления

На втором этапе моделирования питание двигателя осуществлялось от преобразователя частоты, структура которого показана на рис. 2, со скалярной замкнутой системой управления скоростью, использующей датчик скорости. Аналогично, изменения L_m с шагом $\sim 10\%$, как и на первом этапе моделирования, привели к изменениям в электромагнитных и механических характеристиках электропривода:

- (i) Скорость разгона двигателя сохраняется во всем диапазоне изменения L_m благодаря замкнутому контуру и оптимальной настройке регулятора (рис. 8).

- (ii) При снижении L_m до 20 % электродвигатель не может генерировать электромагнитный момент при максимальной нагрузке из-за растущего рассогласования в настройках регулятора и отсутствия контура управления током статора.
- (iii) Уменьшение L_m до 30 % не обеспечивает формирование номинального электромагнитного момента из-за снижения тока статора (рис. 9) и потокоцепления ротора (рис. 10) в результате ослабления электромагнитного поля в воздушном зазоре. Анализ энергетических характеристик управляемого электропривода имеет сходство с динамикой снижения энергетических характеристик на первом этапе моделирования (таблица 4 и рисунок 11). Однако коэффициент полезного действия и коэффициент мощности имеют крутопадающую характеристику при увеличении нагрузки и уменьшении L_m по сравнению с неуправляемым электроприводом. Потребляемая мощность (рис. 11b и рис. 11d) характеризуется более плавным нарастанием в большем диапазоне L_m .

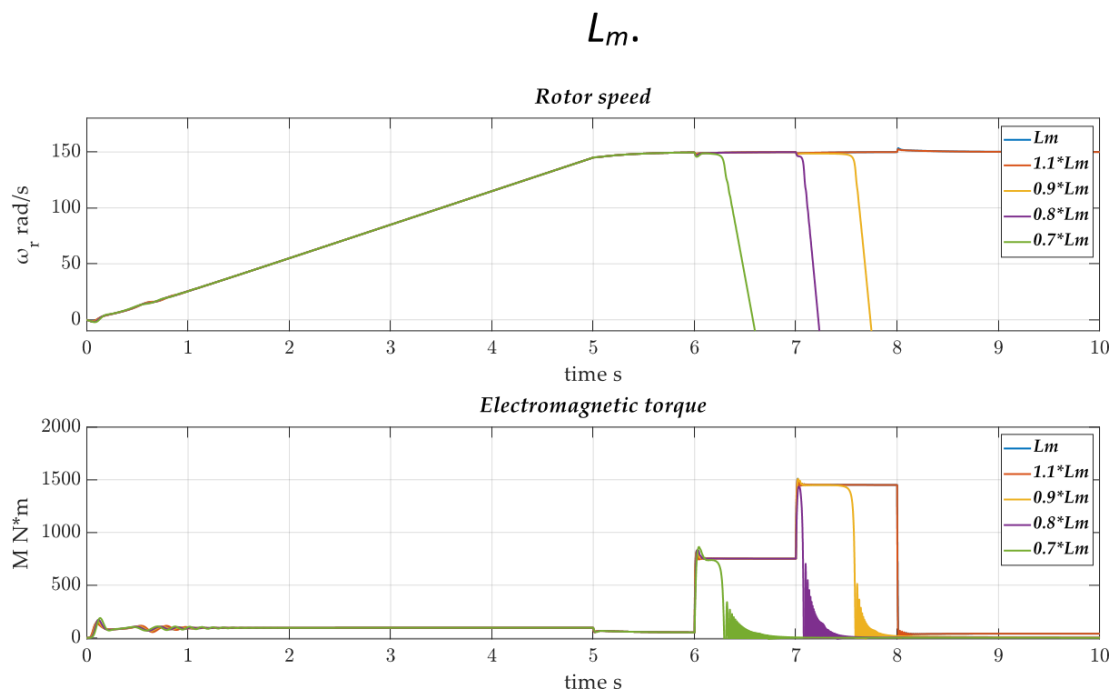


Рис. 8. Скорость вращения ротора и электромагнитный момент

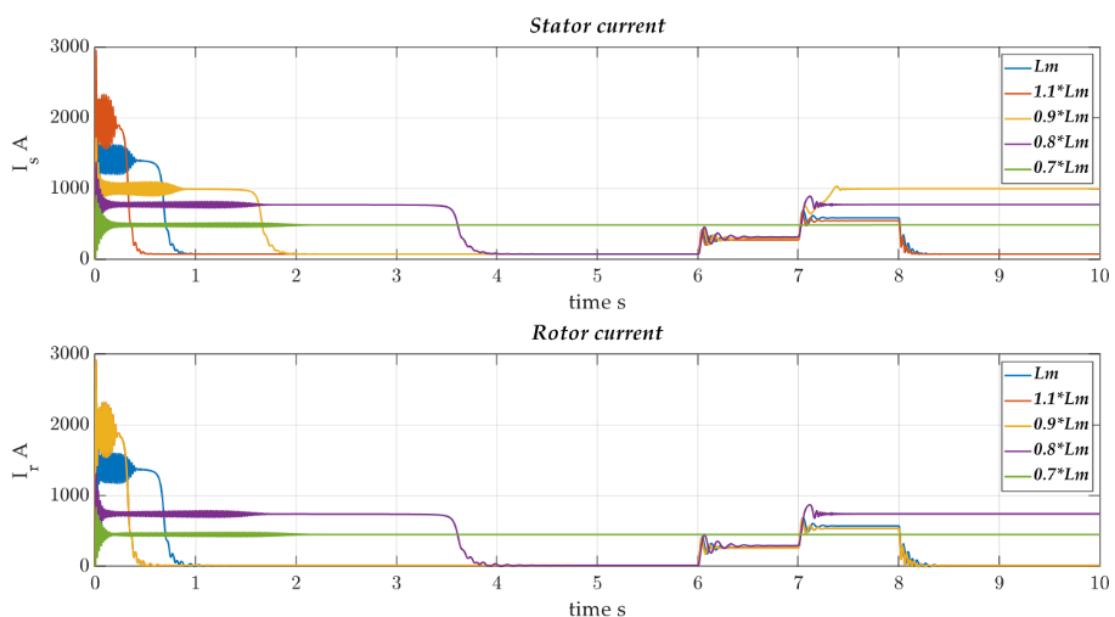


Рис. 9. Токи статора и ротора

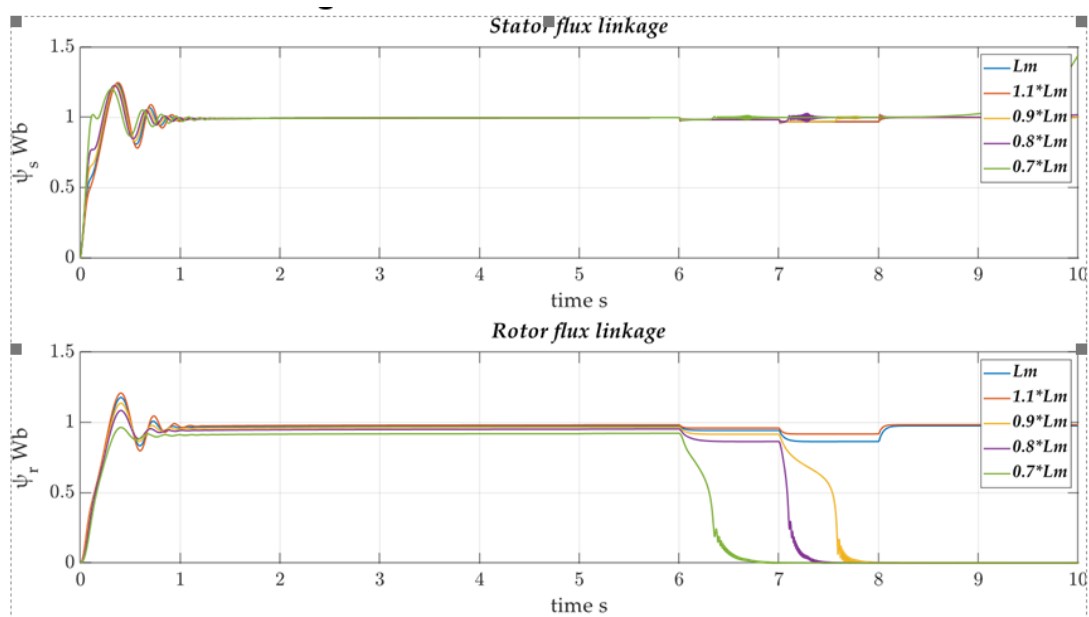
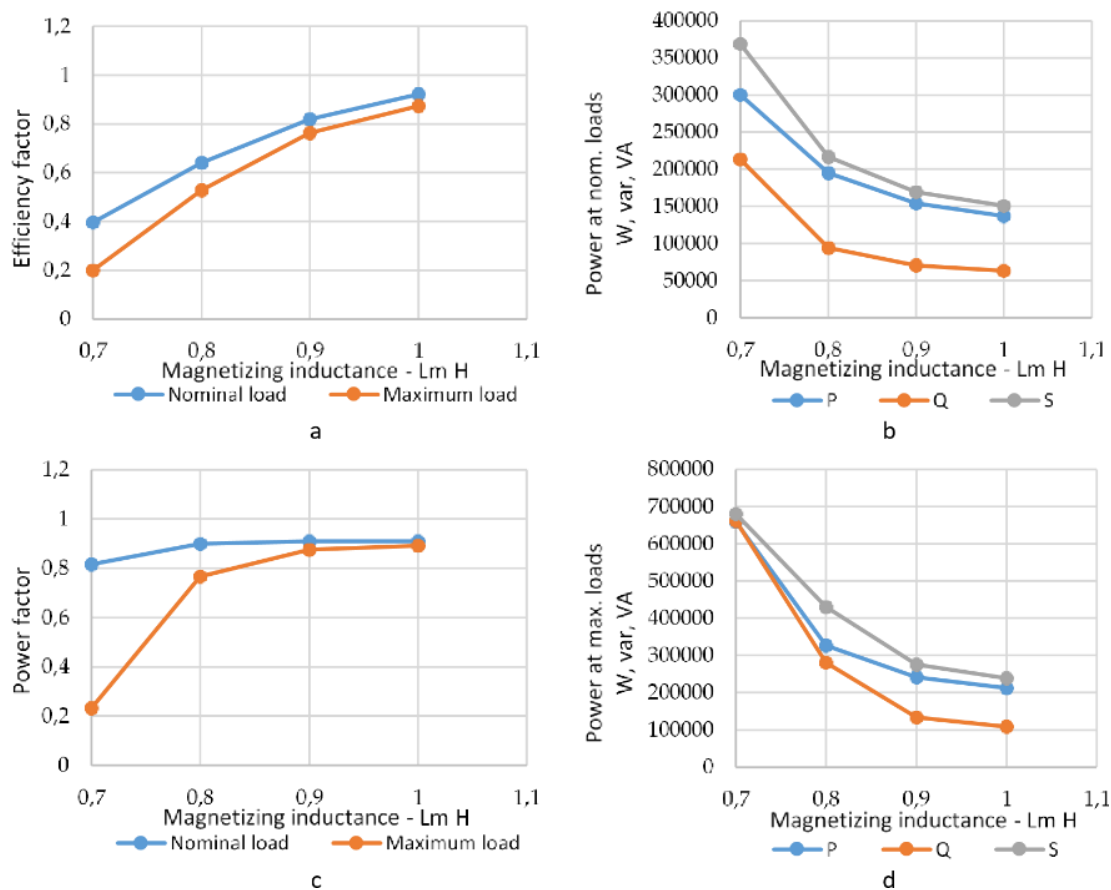


Рис. 10. Связь потоков статора и ротора

Рис. 11. Энергетические характеристики электропривода при изменении L_m

4. Выводы

Согласно полученным результатам, имитационное моделирование подтвердило гипотезу о влиянии наличия и уровня дефекта в виде межвиткового короткого тока статора на характеристики режимов работы электропривода и устойчивость системы управления. Представленный авторами подход позволяет оценить динамические, силовые и механические характеристики при наличии межвитковых замыканий до проведения экспериментальных исследований. Результаты

исследования могут быть применены в дальнейшей работе по моделированию электропривода, как с другими системами управления, так и с различными типами и уровнями дефектов. В то же время стоит обратить внимание на ряд моментов.

- (i) Описанный авторами подход позволяет сравнивать систему управления в условиях дефектов или неисправностей, что позволяет не только оценить энергетические и механические характеристики электропривода, но и определить допустимые условия выполнения требуемых функций (поддержание скорости вращения, формирование электромагнитного момента).
- (ii) Объединение экспериментальных данных и результатов моделирования позволяет проводить исследования в условиях небезопасной работы оборудования при межвитковых коротких токах в статоре, что позволяет моделировать процессы изменения скорости вращения ротора, электромагнитного момента, токов и потокосцеплений статора и ротора в динамике, а также оценивать результаты воздействия на скалярную систему управления и электропривод.
- (iii) При работе электропривода с дефектами, на примере межвиткового короткого тока в обмотке статора, выраженного косвенно в изменении индуктивности намагничивания, наблюдается ухудшение механических и энергетических характеристик, при этом токи и напряжения не превышают допустимых значений.
- (iv) Предполагаем, что ухудшение механических и энергетических характеристик электропривода заключается в нарастающем рассогласовании настроечных параметров регуляторов по величине дефекта. Это требует их перенастройки, которую в режимах непрерывной работы (без остановок и холостого хода) выполнить невозможно.

5. Комментарий авторов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в связи с публикацией данной статьи. Авторы подтвердили, что статья не содержит плагиата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bento, F., Adouni, A., Muxiri, A.C., Fonseca, D.S., and Marques Cardoso, A.J. (2021). On the risk of failure to prevent induction motors permanent damage, due to the short available time-to-diagnosis of inter-turn short-circuit faults. *IET Electric Power Applications*, 15(1), 51-62.
2. Boikov, A., and Payor, V. (2022). The present issues of control automation for levitation metal melting. *Symmetry*, 14(10), 1968.
3. Bolobov, V.I., Chupin, S.A., Bochkov, V.S., and Mishin, I.I. (2019). Service life extension for rock cutters by increasing wear resistance of holders by thermomechanical treatment. *Journal of Mining Institute*, 5, 67-71.
4. Dokka, Z., Liubov, N., and Filatova, I. (2020). Problems of oil refining industry development in Russia. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13(2), 267-270.
5. Emelianov, A.P., and Churkin, B.A. (2014). Scalar control of squirrel-cage induction motor with stator active current. *Bulletin of the South Ural State University, Series "Power Engineering"*, 14(3), 85-90.
6. Ewert, P., Kowalski, C.T., and Orłowska-Kowalska, T. (2020). Low-cost monitoring and diagnosis system for rolling bearing faults of the induction motor based on neural network approach. *Electronics*, 9(9), 1334.
7. Fernandez-Cavero, V., Garcia-Escudero, L.A., Pons-Llinares, J., Fernández-Temprano, M.A., Duque-Perez, O., and Morinigo-Sotelo, D. (2021). Diagnosis of broken rotor bars during the startup of inverter-fed induction motors using the dragon transform and functional ANOVA. *Applied Sciences*, 11(9), 3769.
8. Garcia-Calva, T.A., Morinigo-Sotelo, D., Fernandez-Cavero, V., Garcia-Perez, A., and Romero-Troncoso, R.D.J. (2021). Early detection of broken rotor bars in inverter-fed induction motors using speed analysis of startup transients. *Energies*, 14(5), 1469.
9. Graciola, C.L., Goedtel, A., Angélico, B.A., Castoldi, M.F., and Costa, B.L.G. (2022). Energy efficiency optimization strategy for scalar control of three-phase induction motors. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 33(3), 1032-1043.
10. Gridin, V.M. (2012). Calculation of parameters of the asynchronous motor equivalent circuit according to catalogue data. *Electricity*, 5, 40-44.
11. Hua, B., Zhengming, Z., Shuo, M., Jianzheng, L., and Xiaoying, S. (2003). Comparison of three PWM strategies-SPWM, SVPWM and one-cycle control. *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003*, 2, 1313-1316.
12. Jabłoński, M., and Borkowski, P. (2022). Correction mechanism for balancing driving torques in an opencast mining stacker with an induction motor and converter drive system. *Energies*, 15(4), 1282.
13. Klyuev, R.V., Golik, V.I., Bosikov, I.I., and Gavrina, O.A. (2021). Analysis of electric power loss in the power supply system of the concentrating factory. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332(10), 7-16.
14. Koteleva, N.I., Korolev, N.A., and Zhukovskiy, Y.L. (2021). Identification of the technical condition of induction motor groups by the total energy flow. *Energies*, 14(20), 6677.

15. Krishnasamy, B., and Ashok, K. (2022). Assessment of harmonic mitigation in v/f drive of induction motor using an ann-based hybrid power filter for a wheat flour mill. *Processes*, 10(6), 1191.
16. Kudelina, K., Vaimann, T., Asad, B., Rassõlkin, A., Kallaste, A., and Demidova, G. (2021). Trends and challenges in intelligent condition monitoring of electrical machines using machine learning. *Applied Sciences*, 11(6), 2761.
17. Lavrenko, S.A., and Shishlyannikov, D.I. (2021). Performance evaluation of heading-and-winning machines in the conditions of potash mines. *Applied Sciences*, 11(8), 3444.
18. Manikandan, S., and Duraivelu, K. (2021). Fault diagnosis of various rotating equipment using machine learning approaches—A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 235(2), 629-642.
19. Marfoli, A., Di Nardo, M., Degano, M., Gerada, C., and Jara, W. (2021). Squirrel cage induction motor: A design-based comparison between aluminium and copper cages. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2, 110-120.
20. Nikolaev, A.V., Vöth, S., and Kychkin, A.V. (2022). Application of the cybernetic approach to price-dependent demand response for underground mining enterprise electricity consumption. *Journal of Mining Institute*, 000, 1-10.
21. Ostroverkhov, V.V., and Nalivaiko, N.V. (2020). Condition assessment and diagnostics of asynchronous electric motors using signature analysis of consumed current. *Russian Electrical Engineering*, 91(11), 714-723.
22. Pedra, J. (2008). On the determination of induction motor parameters from manufacturer data for electromagnetic transient programs. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(4), 1709-1718.
23. Pietrzak, P., and Wolkiewicz, M. (2021). On-line detection and classification of PMSM stator winding faults based on stator current symmetrical components analysis and the KNN algorithm. *Electronics*, 10(15), 1786.
24. Runji, J.M., Lee, Y.J., and Chu, C.H. (2022). User requirements analysis on augmented reality-based maintenance in manufacturing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 22(5), 050901.
25. Savard, C., Iakovleva, E., Ivanchenko, D., and Rassõlkin, A. (2021). Accessible battery model with aging dependency. *Energies*, 14(12), 3493.
26. Skamyin, A., Shklyarskiy, Y., Dobush, I., Dobush, V., Sutikno, T., and Jopri, M. H. (2022). An assessment of the share contributions of distortion sources for various load parameters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 13(2), 950-959.
27. Sultana, B., Scicluna, K., Attard, J., Seguna, C., and Scerri, J. (2021). Design of a FPGA-based inverter drive for hf injection based sensorless control. *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1, 178-183.
28. Sun, X.D., Koh, K.H., Yu, B.G., and Matsui, M. (2009). Fuzzy-logic-based V/f control of an induction motor for a DC grid power-leveling system using flywheel energy storage equipment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(8), 3161-3168.
29. Sychev, Y.A., Aladin M.E., and Serikov, V.A. (2022). Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 13(2), 1625-1634.
30. Ustun, S.V., and Demirtas, M. (2009). Modeling and control of V/f controlled induction motor using genetic-ANFIS algorithm. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 786-791.
31. Vasilev, B. (2019). Analysis and improvement of the efficiency of frequency converters with pulse width modulation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(4), 2314.
32. Vasilyeva, N.V., Boikov, A.V., Erokhina, O.O., and Trifonov, A.Y. (2021) Automated digitization of radial charts. *Journal of Mining Institute*, 247, 82-87.
33. Voronin, V.A., and Nepsha, F.S. (2020). Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system. *Journal of Mining Institute*, 246, 633-639.
34. Xiao, L., Xu, Y., Sun, X., Xu, H., and Zhang, L. (2022). Experimental investigation on the effect of misalignment on the wear failure for spline couplings. *Engineering Failure Analysis*, 131, 105755.
35. Zhang, W.F., and Yu, Y.H. (2007). Comparison of three SVPWM strategies. *Journal of Electronic Science and Technology*, 5(3), 283-287.
36. Zhou, X., Mao, S., and Li, M. (2021). A novel anti-noise fault diagnosis approach for rolling bearings based on convolutional neural network fusing frequency domain feature matching algorithm. *Sensors*, 21(16), 5532.