

Научная статья

УДК 62-5:004.5

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-13-26

Королев Николай Александрович*, Ковальчук Маргарита Сергеевна,
Малькова Яна Михайловна

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

*E-mail: korolev_na@pers.spmi.ru

**ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ИНДУКТИВНОСТИ ЦЕПИ НАМАГНИЧИВАНИЯ НА
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СО СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ
УПРАВЛЕНИЯ****Информация о статье**

Поступила:

10 июня 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 октября 2024 г.

Принята к печати:

24 октября 2024 г.

Опубликована:

31 октября 2024 г.

Ключевые слова:

автоматизированный электропривод, скалярная система управления, асинхронный двигатель, параметры схемы замещения, индуктивность цепи намагничивания, техническое состояние

Аннотация.

Статья посвящена исследованию автоматизированного электропривода с асинхронным двигателем и скалярной системой управления. Эксплуатационные условия и режимы работы электропривода определяют его фактический срок службы. Износ асинхронного двигателя как ключевого звена электропривода сопряжен с отклонением его параметров от номинальных. Отклонение параметров схемы замещения определяет результирующее изменение характеристик. Параметры схемы замещения определяют точность настройки регуляторов и оптимальных алгоритмов в системе управления электроприводом. В продолжительных режимах эксплуатации исключается возможность автоподстройки регуляторов, для которой требуется остановка или режим холостого хода. Возникновение межвитковых замыканий в обмотке статора электродвигателя приводит к изменению индуктивности цепи намагничивания. Индуктивность цепи намагничивания оказывает наибольшее влияние на энергетические и механические характеристики электропривода. В статье рассматривается влияние значения индуктивности цепи намагничивания асинхронного двигателя на поведение системы управления электроприводом. Моделирование электропривода осуществляется при изменении индуктивности цепи намагничивания в диапазоне $0,7-1,1 \cdot L_m$. Оценка поведения скалярной системы управления, замкнутой по частоте вращения, выполнена по основным энергетическим (коэффициент мощности, КПД) и механическим (частота вращения, электромагнитный момент) характеристикам электропривода.

Для цитирования: Королев Н.А., Ковальчук М.С., Малькова Я.М. Влияние отклонений индуктивности цепи намагничивания на характеристики электропривода со скалярной системой управления // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 4 (174). С. 13-26. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-13-26, EDN: HAZAYN

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России FSRW-2023-0002 «Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов» и стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук СП-2587.2022.1.

Введение

Существующие способы повышения эффективности в работе частотно регулируемых электроприводов промышленных машин и установок основываются на достижении их оптимальных энергетических и механических показателей. Достижение показателей осуществляется за счет внедрения раз-

личных решений в силовой и управляющей частях электроприводов.

В последнее время технологии цифровой трансформации зарекомендовали себя как хороший инструмент в повышении эффективности промышленных объектов за счет усовершенствования алгоритмов в составе систем управления [36], [40], [45]. Применение нейронных сетей [1, 2] и алгоритмов

машинного обучения [3, 4] исключает необходимость в решении задач оптимизации энергетических и механических показателей и обеспечивает требуемое качество регулирования в системах управления электроприводами и типовыми механизмами.

Алгоритмические способы повышения электромеханических показателей асинхронного электропривода

В работе [7] за счет гибридного алгоритма формирования широтно-импульсной модуляции (ШИМ) обеспечивается поддержание коэффициента мощности.

Авторами в исследовании [8] обосновывается применение нового типа контроллера с алгоритмом пространственно-векторной ШИМ в скалярной системе управления. Подобное сочетание алгоритмов управления позволяет достигнуть большее выходное напряжение, обеспечивая при этом номинальные электромеханические характеристики за счет поддержания номинального потокосцепления машины на разных скоростных диапазонах.

Исследовательским коллективом показан эффект от применения разных модуляционных систем управления – синусоидальной ШИМ и пространственной векторной ШИМ. Эффект оценивается с помощью показателей: коэффициента нелинейных искажений (*THD – Total Harmonic Distorsions*) и коэффициента использования напряжения звена постоянного тока (*DC voltage utilization ratio*). Выбор соответствующей модуляционной системы должен осуществляться согласно предъявляемым требованиям к электроприводу с учетом данных показателей [9], [10].

Научные коллективы [11] и [12] представили разработки экспериментального инвертора на основе программируемой пользователем вентильной матрицы (*FGPA – Field Programmable Gate Array-based*), обеспечивающего уменьшение акустического шума и пульсаций момента за счет реализации модуляции и скалярного закона управления.

Ряд научных работ посвящен совершенствованию оптимальных законов управления и поиску простых и эффективных решений на этапах пуска, торможения или продолжительных режимов работы электропривода. Например, в статье [13] предложены алгоритмы оптимизации настроек ПИ-регулятора (*Particle Swarm Optimization u Cuckoo Search Optimization*), использование которых позволяет добиться стабильности по скорости вращения и моменту на валу. Предложен алгоритм [14] оптимизации энергоэффективности для скалярного управления трехфазными асинхронными двигателями за счет вариации соотношения между напряжением и частотой (*U/f*) привода для оптимизации потока воздушного зазора в соответствии с механической нагрузкой, что позволяет в замкнутом контуре снизить потребление электроэнергии на 35,9%, а в разомкнутом на 48,06%. Некоторые решения связаны с обходом резонансных частот вращения при разгоне [15] или со снижением пульсаций при эксплуатации электропривода [16] за счет включения дополнительного контура регулирования тока статора в скалярную систему управления.

Адаптивные алгоритмы систем управления электроприводом активно разрабатываются многими учеными. Основными инструментами являются алгоритмы нечеткой логики (*Fuzzy-Logic-Based-algorithms*) [17], генетические алгоритмы (*Genetic-algorithms*) [18], нейросетевые алгоритмы (*ANN-algorithms*) [19, 20], обеспечивающие настройку коэффициентов регуляторов.

Стоит отметить, что значительная часть ученых проводит исследования автоматизированного электропривода со скалярной системой управления. Выбор системы управления обусловлен ее широким применением [5] в промышленности из-за невысоких требований по точности регулирования, энергетической эффективности для электрических машин малой и средней мощности и экономической целесообразности применения [6].

Асинхронные двигатели до 2 МВт



а

Асинхронные двигатели более 2 МВт



б

Рис. 1. Статистические данные о повреждаемости асинхронных двигателей

Fig. 1. Failures statistical data of induction motors

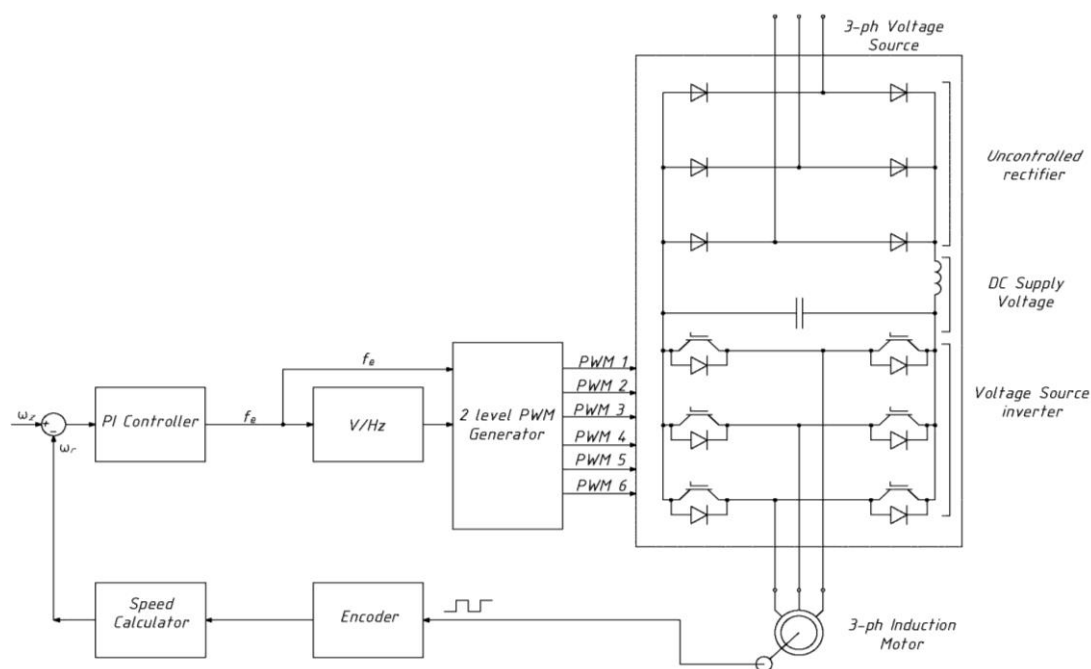


Рис. 2. Структура электропривода со скалярным управлением
 Fig. 2. Structure of the scalar electric drive control system

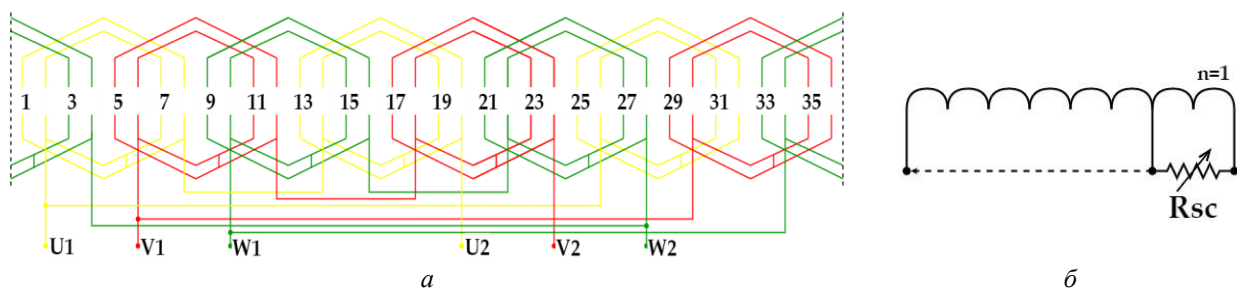


Рис. 3. Обмотка статора асинхронного двигателя АИР 315: а – схема укладки обмоток статора (U1; V1; W1; U1; V1; W1 – начало и концы обмоток фаз); б – схема межвиткового замыкания
 Fig. 3. Induction motor stator AIR 315: а – stator winding layout (U1; V1; W1; U1; V1; W1 – start and ends of phase windings); б – interturn circuit diagram

Асинхронные автоматизированные электроприводы вентиляторных и насосных установок являются распространенными и ответственными потребителями на нефте- и горнодобывающих предприятиях. Для управления вентиляторными механизмами характерно использование скалярной системы управления с соответствующей оптимизацией. В статье предлагается рассмотреть асинхронный автоматизированный электропривод с применением скалярной системы управления для достижения оптимальных энергетических и механических показателей.

Повреждения асинхронных двигателей

Асинхронный двигатель (АД), как одно из ключевых звеньев электропривода, подвержен многофакторному воздействию со стороны преобразователя частоты, исполнительного механизма и окружающей среды [42], [43]. Несмотря на то, что АД с короткозамкнутым ротором является достаточно надежной машиной [21], его эксплуатация сопровождается износом и появлением дефектов под действием указанных факторов.

На начальной стадии дефекты не вызывают аварийных режимов работы и остановку асинхронного

двигателя (АД). Вот некоторые из таких дефектов [22]:

- Повреждения и межвитковые замыкания обмотки статора [23];
- Нарушение целостности пакета активной стали [24];
- Обрыв стержней ротора [25], [26];
- Механические ослабления креплений и муфт.

Статистические данные горных и нефтегазовых предприятий показывают, что именно эти дефекты чаще всего становятся причиной непредвиденного останова асинхронных двигателей (см. Рис. 1) [28, 29].

В области диагностики электроприводов есть ряд исследований, связанных с поддержанием электропривода в работоспособном состоянии. В статье [30], предложен модуль диагностики стержней ротора с использованием анализа спектра тока статора с дополнительным контуром управления снижения тока целых стержней ротора до номинального значения и с минимизацией номинальной мощности. В исследовании [31] описан способ уменьшения сигнала задания в поврежденной фазе

Таблица 1. Номинальные параметры асинхронного двигателя

Table 1. Rated induction motor parameters

P, кВт	U _n , В	n, об/мин	z	J, кг*м ²	η	cosφ	K _M	K _p	K _i
132	380	1450	2	1.5	0.9	0.86	3.0	3.0	3.0

P – номинальная мощность; U_n – номинальное напряжение; n – номинальная скорость вращения cosφ – коэффициент мощности; η – коэффициент полезного действия; K_M – перегрузочная способность; K_p – кратность пускового момента; K_i – кратность пускового тока.

Таблица 2. Уточненные параметры асинхронного двигателя

Table 2. Refined induction motor parameters

L _s Гн	L _r Гн	L _m Гн	R _s Ом	R _r Ом
0.145	0.147	0.140	0.521	0.305

L_s – индуктивность намагничивания статора; L_r – индуктивность намагничивания ротора; L_m – взаимная индуктивность намагничивания; R_s – активное сопротивление статора; R_r – активное сопротивление ротора.

пропорционально асимметрии активных сопротивлений фаз двигателя, что позволяет поддерживать динамические и энергетические характеристики электропривода.

Существующие подходы к повышению эффективности, обеспечению оптимальных динамических и энергетических характеристик [41], [44], а также к поддержанию работоспособности во многом строятся на основе скалярной системы управления электроприводом. Анализ исследований показал актуальность разработки алгоритмов управления системы электропривода с учетом наличия дефектов в асинхронном двигателе [37], [38]. Однако вопросы анализа и разработки алгоритмов, учитывающих изменение индуктивности намагничивания статора при наличии межвиткового замыкания, недостаточно изучены.

Ввиду опасности при создании межвитковых замыканий и риска повреждения лабораторного оборудования было принято решение выполнить моделирование процессов.

Методы

Поведение системы управления электроприводом при межвитковых замыканиях было проанализировано в два этапа с помощью имитационного моделирования в *Matlab Simulink*:

1. Моделирование электропривода без системы управления;
2. Моделирование электропривода со скалярной системой управления.

Общая структура исследуемого автоматизированного электропривода представлена на Рис. 2. АД подключается к сети через преобразователь частоты. Силовая часть преобразователя представлена двухзвенной структурой с неуправляемым шестипульсным выпрямителем и двухуровневым инвертором напряжения. На обмотках статора формируется напряжение за счет алгоритмов синусоидальной ШИМ. В случае моделирования электропривода без системы управления АД подключается к сети напрямую без преобразователя частоты.

Регулирование скорости вращения ротора осуществляется с помощью скалярной системы управления (1):

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

где U – амплитуда напряжения статора, В; f – частота напряжения статора, Гц.

В качестве моделируемого приводного электропривода выбран АД общепромышленного назначения серии АИР 315 с номинальными параметрами (см. Таблица 1).

На основе паспортных данных (Таблица 1) и результатов измерения сопротивлений асинхронного двигателя были рассчитаны уточненные параметры (Таблица 2) схемы замещения [32], [33].

В ходе исследования было проведено моделирование асинхронного электропривода, работающего в неуправляемом и управляемом режимах. Особое внимание уделялось изменению индуктивности намагничивающей цепи L_m. После моделирования были проведены анализ и оценка энергетических и электромеханических показателей системы электропривода.

В процессе исследования изучалось поведение системы при изменении индуктивности цепи намагничивания L_m в диапазоне от 0,7 до 1,1 от номинального значения. Были рассмотрены такие параметры, как частота вращения, электромагнитный момент, токи и потокосцепление в момент пуска АД. Когда система достигала номинальной скорости вращения, на короткое время (при t = 6 с) создавалась нагрузка, равная номинальной. Затем (при t = 7 с) нагрузка увеличивалась до максимального значения в несколько этапов.

Изменение индуктивности намагничивающей цепи в пределах диапазона 0,7–1,1*L_m может быть связано с межвитковыми замыканиями в лобовых частях обмотки статора. В ходе экспериментов межвитковое замыкание было создано в одной из фаз статора электродвигателя (см. Таблицу 3 и Таблицу 4), имеющего схему укладки обмоток, показанную на Рис. 3а. При помощи реостата R_{sc} замыкалось n-ое количество витков по схеме на Рис. 3б, за счет чего создавалось эквивалентное межвитковое замыкание при ограничении фазного тока до допустимых значений [22].

Результаты исследования и обсуждения

Межвитковое замыкание приводит к изменению параметров схемы замещения и, в результате, к изменению L_m.

Моделирование неуправляемого асинхронного электропривода

Этап 1. Прямой пуск асинхронного двигателя.

С заданным шагом отклонения параметра L_m – 10% от номинального значения регистрировались

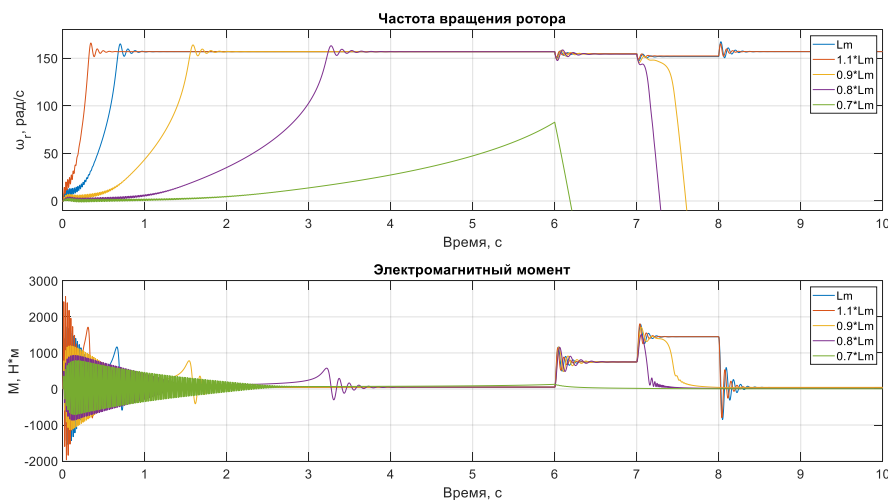


Рис. 4. Скорость вращения ротора и электромагнитный момент
Fig. 4. Rotor speed and electromagnetic torque

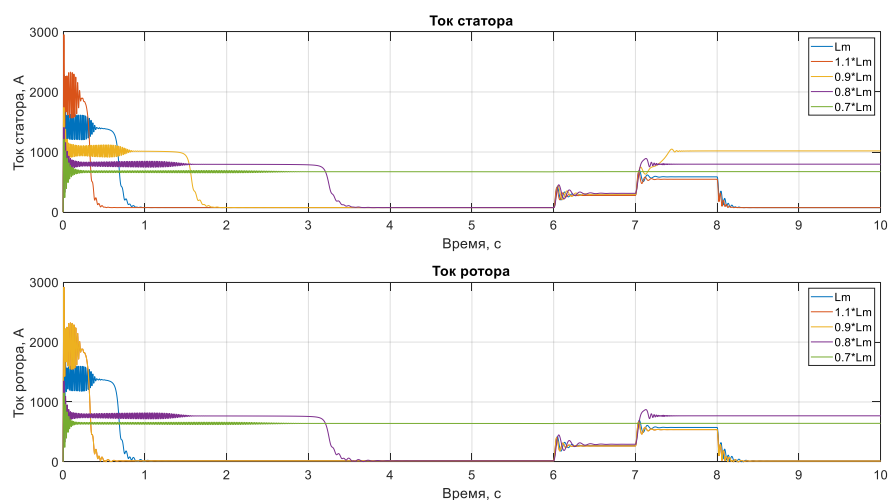


Рис. 5. Токи статора и ротора
Fig. 5. Stator and rotor currents

электрические и механические характеристики (см. Рис. 4) [22]:

1. При увеличении L_m на 10% наблюдается ускорение процесса разгона, что также приводит к увеличению амплитуды пускового электромагнитного момента.

2. Если уменьшить L_m на 10%, то время, необходимое для достижения номинальной скорости, увеличится в два раза. В таких условиях двигатель не сможет создать электромагнитный момент при максимальной нагрузке.

3. Когда L_m уменьшается на 20%, время разгона до номинальной скорости увеличивается примерно в пять раз. Двигатель также не способен создать электромагнитный момент при достижении максимальной нагрузки.

4. Снижение L_m до 30% приводит к тому, что номинальная частота вращения и электромагнитный момент не формируются. Это происходит из-за уменьшения моментобразующего тока статора (см. Рис. 5) и потокоцепления ротора (см. Рис. 6), что, в свою очередь, является следствием ослабления электромагнитного поля в воздушном зазоре.

В качестве основных энергетических характеристик [22] оценивались (см. Таблицу 3):

- коэффициент полезного действия (КПД);
- коэффициент мощности (K_M);
- активная мощность (P);
- реактивная мощность (Q);
- полная мощность (S).

Повышенное значение L_m , связанное с ошибочным определением значения при вводе в эксплуатацию двигателя, приводит к улучшению энергетических характеристик при номинальной и максимальной нагрузке, в частности, к снижению потребляемых мощностей P, Q и S, увеличению КПД и увеличению K_M при максимальной нагрузке (см. Рис. 7).

При возникновении межвиткового замыкания в обмотке статора происходит снижение значения L_m , что отражается в снижении энергетических показателей, а с увеличением нагрузки интенсивность падения показателей только возрастает.

Моделирование управляемого асинхронного электропривода.

На втором этапе моделирования питание двигателя осуществлялось от полупроводникового преобразователя частоты со структурой, изображенной

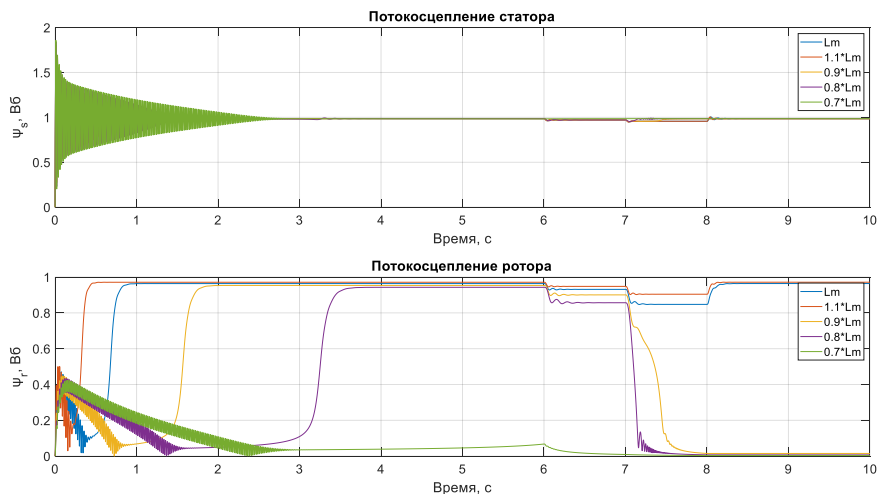
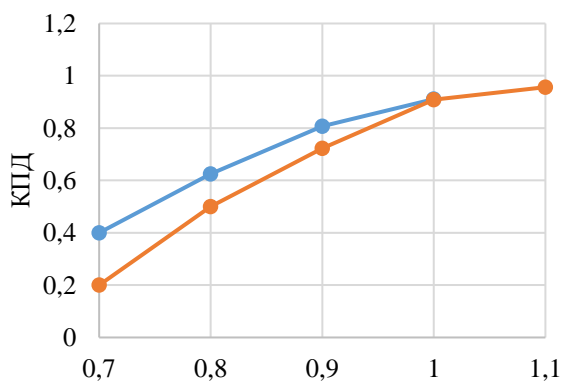


Рис. 6. Потокоцепление статора и ротора
Fig. 6. Stator and rotor flux linkage

Таблица 3. Показатели энергоэффективности асинхронного двигателя при изменении L_m
Table 3. Energy efficiency parameters of induction motor at change of L_m

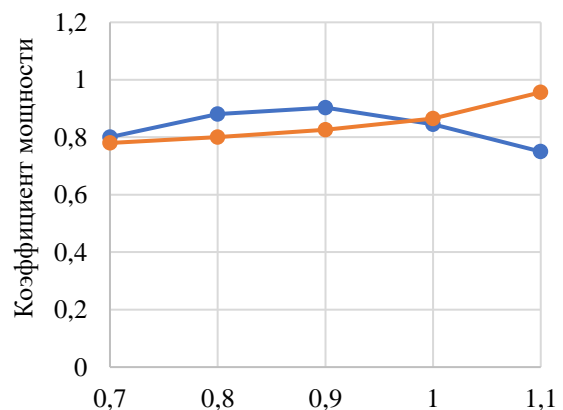
Параметры	Нагрузка	L_m Гн				
		1,1	1	0,9	0,8	0,70
КПД	номинальная	0,95	0,91	0,80	0,62	0,40
	максимальная	0,95	0,90	0,72	0,50	0,20
Км	номинальная	0,75	0,84	0,90	0,88	0,80
	максимальная	0,95	0,86	0,82	0,8	0,78
P, Вт	номинальная	130700,0	145100,0	162800,0	207000,0	x*
	максимальная	203200,0	227500,0	260500,0	586400,0	x*
Q, ВАр	номинальная	60110,0	67160,0	77380,0	111300,0	x*
	максимальная	107700,0	132200,0	177500,0	574400,0	x*
S, ВА	номинальная	143800,0	159900,0	180200,0	235000,0	x*
	максимальная	230000,0	263100,0	315200,0	598400,0	x*

x* – измерение показателей невозможно произвести, так как формирование электромагнитных и механических характеристик электродвигателем невозможно



Индуктивность намагничивания - L_m Гн

а



Индуктивность намагничивания - L_m Гн

б

Рис. 7. Энергетические характеристики асинхронного двигателя при изменении L_m
Fig. 7. Energy characteristics of induction motor at change of L_m

на Рис. 2. В системе применялась скалярная обратная связь по частоте вращения ротора, реализованная с помощью датчика скорости [34, 35].

Аналогично первому этапу моделирования, индуктивность L_m изменялась с шагом примерно 10%.

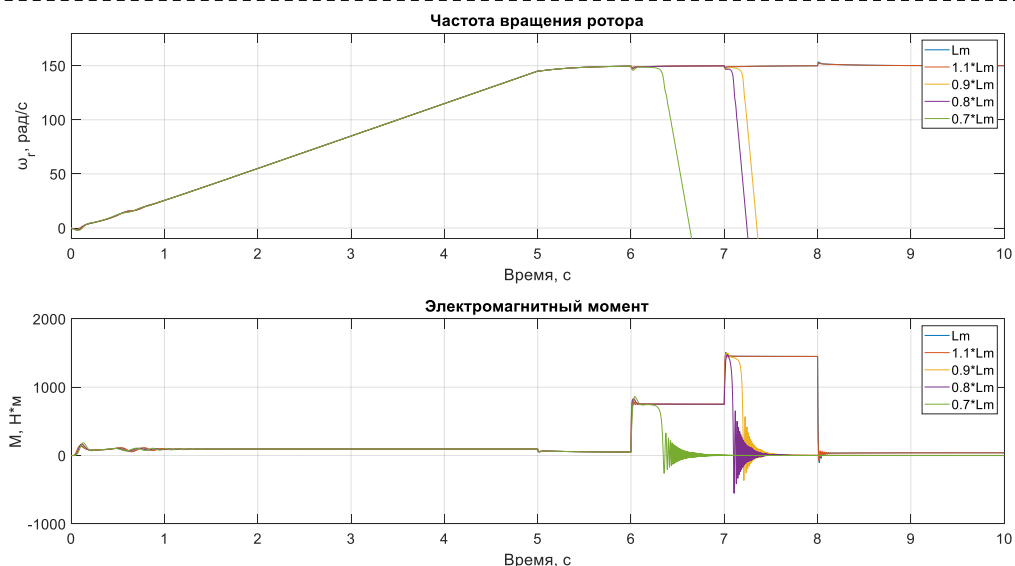


Рис. 8. Частота вращения и момент
Fig. 8. Speed and torque

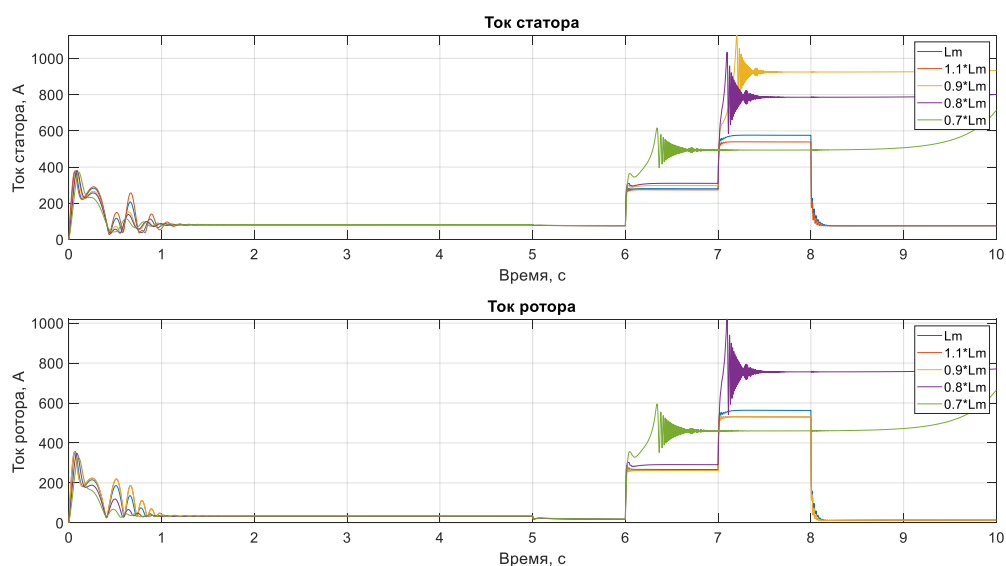


Рис. 9. Ток статора и ротора
Fig. 9. Stator and rotor current

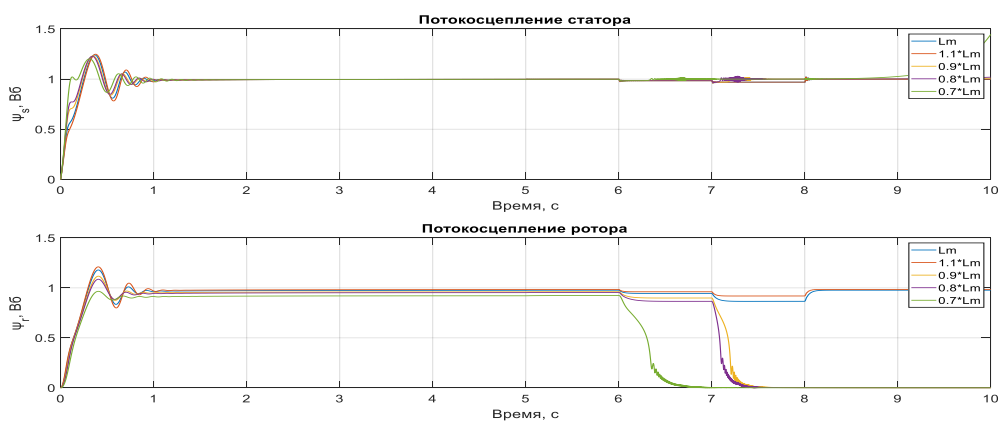


Рис. 10. Потокоцепление статора и ротора
Fig. 10. Stator and rotor flux linkage

Это привело к изменениям электромагнитных и механических характеристик электропривода:

1. Благодаря замкнутому контуру и оптимальной настройке регулятора обеспечивается под-

держания темпа разгона электродвигателя во всем диапазоне изменения L_m (Рис. 8).

2. При уровне L_m до 20% от номинального электродвигатель не формирует электромагнитный момент при максимальной нагрузке из-за нарастающей ошибки и отсутствия контура регулирования тока статора.

3. Уменьшение L_m до 30% не позволяет создать номинальный электромагнитный момент из-за снижения тока статора (Рис. 9) и потягивания ротора (Рис. 10). Это происходит в результате ослабления электромагнитного поля в воздушном зазоре.

Анализ энергетических характеристик электропривода со скалярной системой управления при питании асинхронного двигателя от автономного инвертора напряжения демонстрирует динамику, схожую с первым этапом, в части снижения энергетических характеристик (см. Таблицу 4 и Рис. 11). Однако стоит отметить, что при увеличении нагрузки и уменьшении L_m КПД и K_M имеют более крутое падение по сравнению с нерегулируемым электроприводом.

Выводы

Проведенные имитационные эксперименты подтвердили предположение о влиянии наличия и степени дефекта в виде короткого замыкания между витками обмотки статора на характеристики работы электропривода и устойчивость системы управления. Предложенный авторами подход позволяет оценить динамические, энергетические и механические свойства до проведения экспериментальных исследований при наличии коротких замыканий.

Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего изучения работы электропривода с другими видами систем управления и различными уровнями дефектов. Следует отметить несколько ключевых моментов:

1. Авторы предлагают метод сопоставления систем управления при возникновении дефектов или неисправностей. Этот метод позволяет не только оценить энергетические и механические характеристики электропривода, но и определить допустимые условия для выполнения требуемых функций, таких как поддержание частоты вращения и

Таблица 4. Показатели энергоэффективности асинхронного двигателя при изменении L_m
Table 4. Energy efficiency parameters of induction motor at change of L_m

Параметр	Нагрузка	L_m Гн				
		1,1	1	0,9	0,8	0,7
КПД	номинальная	x*	0,92	0,81	0,64	0,39
	максимальная	x*	0,87	0,76	0,52	0,20
K_M	номинальная	x*	0,90	0,90	0,89	0,81
	максимальная	x*	0,89	0,87	0,76	0,23
P, Вт	номинальная	x*	137400,0	154000,0	194800,0	300400,0
	максимальная	x*	213000,0	241000,0	326300,0	658500,0
Q, ВАр	номинальная	x*	63130,0	70770,0	94650,0	213400,0
	максимальная	x*	108100,0	133000,0	280800,0	661200,0
S, ВА	номинальная	x*	151200,0	169500,0	216600,0	368500,0
	максимальная	x*	238900,0	275300,0	431100,0	679900,0

x* – измерение показателей невозможно произвести

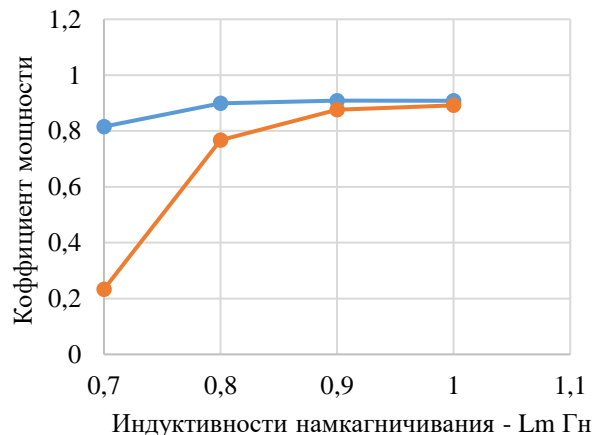
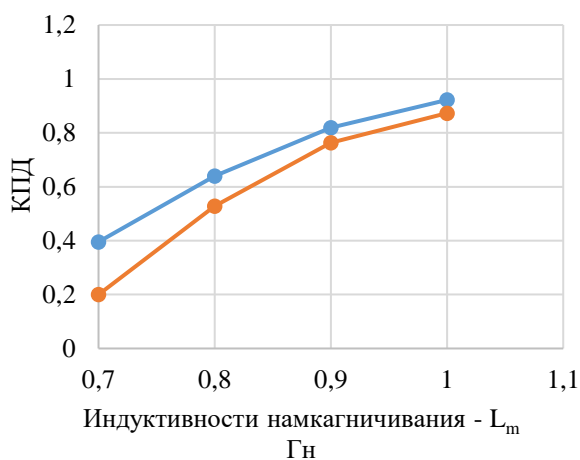


Рис. 11. Энергетические характеристики электропривода при изменении L_m
Fig. 11. Energy characteristics of induction motor at change of L_m

образование магнитного момента.

2. Сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования позволяет изучить работу в неблагоприятных условиях, например, при коротком замыкании в статоре. Это позволяет моделировать изменения скорости ротора, магнитного момента, токов и потоков статора и ротора в динамике и оценить воздействие на систему управления и электропривод.

3. При работе электропривода с дефектами, такими как короткое замыкание в обмотке статора, что влияет на индуктивность намагничивания, наблюдается ухудшение механических и энергетических свойств. При этом токи и напряжения не превышают допустимых значений.

4. Ухудшение механических и энергетических свойств электропривода связано с постепенным нарушением настроек регуляторов в зависимости от степени дефекта. Для устранения этого нарушения требуется перенастройка регуляторов, которая не может быть выполнена без остановки или на холостом ходу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aazmi M. A. [et al.] A review on VFD control and energy management system of induction motor for electric vehicle // 2021 IEEE 19th Student Conference on Research and Development (SCORED). IEEE, 2021. Pp. 36–41. DOI: 10.1109/SCORED53546.2021.9652673.
2. ABB Ability™ Digital Powertrain. Condition Monitoring for rotating equipment. Available online: <https://search.abb.com/library/> (дата обращения 05.10.2022).
3. Bento F. [et al.] 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. 2021. V. 15. № 1. Pp. 51–62. DOI: 10.1049/elp2.12008.
4. Boikov A., Payor V. The present issues of control automation for levitation metal melting // Symmetry. 2022. V. 14. № 10. Pp. 1968.
5. Bolobov V. I. [et al.] Service life extension for rock cutters by increasing wear resistance of holders by thermomechanical treatment // Gornyi Zhurnal. 2019. V. 5. Pp. 67–71.
6. Dokka Z. [et al.] Problems of oil refining industry development in Russia // International Journal of Engineering Research and Technology. 2020. V. 13. № 2. Pp. 267–270.
7. Емельянов А. П., Чуркин Б. А. Скалярное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем по активной составляющей тока статора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 3. С. 85–90.
8. Ewert P., Kowalski C. T., Orłowska-Kowalska T. Low-cost monitoring and diagnosis system for rolling bearing faults of the induction motor based on neural network approach // Electronics. 2020. V. 9. № 9. P. 1334. DOI: 10.3390/electronics9091334.
9. Fernandez-Cavero V., García-Escudero L. A., Pons-Llinares J., Fernández-Temprano M. A., Duque-Perez O., Morinigo-Sotelo D. Diagnosis of broken rotor bars during the startup of inverter-fed induction motors using the dragon transform and functional ANOVA // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 9. P. 3769. DOI: 10.3390/app11093769.
10. Garcia-Calva T. A., Morinigo-Sotelo D., Fernandez-Cavero V., Garcia-Perez A., Romero-Troncoso R. D. J. Early detection of broken rotor bars in inverter-fed induction motors using speed analysis of startup transients // Energies. 2021. V. 14. № 5. P. 1469. DOI: 10.3390/en14051469.
11. Graciola C. L., Goedtel A., Angélico B. A., Castoldi M. F., Costa, B. L. G. Energy efficiency optimization strategy for scalar control of three-phase induction motors // Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2022. V. 33. № 3. Pp. 1032–1043. DOI: 10.1007/s40313-021-00876-w.
12. Гридин В. М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. 2012. Т. 5. С. 40–44.
13. Hua B. [et al.] Comparison of three PWM strategies-SPWM, SVPWM & one-cycle control // The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. IEEE, 2003. V. 2. Pp. 1313–1316. DOI: 10.1109/PEDS.2003.1283169.
14. Jabłoński M., Borkowski P. Correction mechanism for balancing driving torques in an opencast mining stacker with an induction motor and converter drive system // Energies. 2022. V. 15. № 4. P. 1282. DOI: 10.3390/en15041282.
15. Keskin B., Eminoğlu İ. Optimally tuned PI controller design for V/f control of induction motor // 2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). IEEE, 2022. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/HORA55278.2022.9800005.
16. Ключев Р. В. [и др.] Анализ потерь электроэнергии в системе электроснабжения обогатительной фабрики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 10. С. 7–16.
17. Копылов И. П. Проектирование электрических машин М. : Общество с ограниченной ответственностью «Издательство ЮРАЙТ», 2019.
18. Koteleva N. I. [et al.] Identification of the technical condition of induction motor groups by the total energy flow // Energies. 2021. V. 14. № 20. P. 6677. DOI: 10.3390/en14206677.
19. Krishnasamy B., Ashok K. Assessment of harmonic mitigation in v/f drive of induction motor using an ann-based hybrid power filter for a wheat flour mill // Processes. 2022. V. 10. № 6. P. 1191. DOI: 10.3390/pr10061191.
20. Kudelina K. [et al.] Trends and challenges in intelligent condition monitoring of electrical machines using machine learning // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 6. P. 2761. DOI: 10.3390/app11062761.
21. Kumar A. [et al.] Hybrid Space Vector PWM Fed Induction Motor Drive Control / A. Kumar, S. Masodi, J. Peter, S. Athikkal // 2021 Fourth International Conference on Electrical, Computer and Com-

- munication Technologies (ICECCT). IEEE, 2021. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICECCT52121.2021.9616740.
22. Zhukovskiy Y. 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 and Technology*. 2023. V. 8. № 1. Pp. 65–78.
23. Manikandan S., Duraivelu K. 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*. 2021. V. 235. № 2. Pp. 629–642. DOI: 10.1177/0954408920971976.
24. Marfoli A. [et al.] Squirrel cage induction motor: A design-based comparison between aluminium and copper cages // *IEEE Open Journal of Industry Applications*. 2021. V. 2. Pp. 110–120. DOI: 10.1109/OJIA.2021.3073820.
25. Melnykov V. The correction of the operation modes for frequency-controlled induction motor with scalar control under stator windings damage appearance // *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. IEEE, 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598710.
26. Menghal P. M., Jaya Laxmi A. Artificial Intelligence-Based Real-Time Control of Induction Motor Using dSPACE Controller // *International Conference on Automation, Signal Processing, Instrumentation and Control*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2020. Pp. 801–815. DOI: 10.1007/978-981-15-8221-9_75.
27. Nikolaev A. V. [et al.] Application of the cybernetic approach to price-dependent demand response for underground mining enterprise electricity consumption // *Journal of Mining Institute*. 2023. № 261. Pp. 403–414. DOI: 10.31897/PMI.2022.33.
28. Niu Y. [et al.] Effects of digitalization on energy efficiency: Evidence from Zhejiang Province in China // *Frontiers in Energy Research*. 2022. V. 10. P. 847339. DOI: 10.3389/fenrg.2022.847339.
29. Ostroverkhov V. V., Nalivaiko N. V. Condition Assessment and Diagnostics of Asynchronous Electric Motors Using Signature Analysis of Consumed Current // *Russian Electrical Engineering*. 2020. V. 91. № 11. Pp. 714–723. DOI: 10.3103/S1068371220110097.
30. Pedra J. On the determination of induction motor parameters from manufacturer data for electromagnetic transient programs // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2008. V. 23. № 4. Pp. 1709–1718. DOI: 10.1109/TPWRS.2008.2002293.
31. Pietrzak P., Wolkiewicz M. On-line detection and classification of PMSM stator winding faults based on stator current symmetrical components analysis and the KNN algorithm // *Electronics*. 2021. V. 10. № 15. P. 1786. DOI: 10.3390/electronics10151786.
32. Пиляев С. Н. [и др.] Повышение энергоэффективности технологических установок на основе скалярного управления асинхронным электроприводом // *Тенденции развития технических средств и технологий в АПК*. 2021. С. 127–132.
33. Richardson M. T. [et al.] Microcontroller based space vector pulse width modulation speed control of three-phase induction motor // *SoutheastCon 2021*. IEEE, 2021. Pp. 1–6.
34. Rouabah B. [et al.] Adaptive data-driven fault-tolerant control strategy for optimal power extraction in presence of broken rotor bars in wind turbine // *ISA transactions*. 2022. V. 130. C. 92–103. DOI: 10.1016/j.isatra.2022.04.008.
35. Runji J. M. [et al.] User requirements analysis on augmented reality-based maintenance in manufacturing // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2022. V. 22. № 5. P. 050901. DOI: 10.1115/1.4053410.
36. Savard C. [et al.] Accessible battery model with aging dependency / C. Savard E. Iakovleva, D. Ivanchenko, A. Rassõlkin // *Energies*. 2021. V. 14. № 12. P. 3493. DOI: 10.3390/en14123493.
37. Skamyin A. [et al.] An assessment of the share contributions of distortion sources for various load parameters // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022. V. 13. № 2. Pp. 950–959. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp950-959.
38. Sultana B. [et al.] Design of a FPGA-based inverter drive for hf injection based sensorless control // *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, 2021. V. 1. Pp. 178–183. DOI: 10.1109/ICIT46573.2021.9453641.
39. Sun X. D. [et al.] 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*. 2009. V. 56. № 8. Pp. 3161–3168. DOI: 10.1109/TIE.2009.2021679.
40. Sychev Y. A. [et al.] Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022. V. 13. № 3. P. 1625. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634.
41. Ustun S. V., Demirtas M. Modeling and control of V/f controlled induction motor using genetic-ANFIS algorithm // *Energy conversion and management*. 2009. V. 50. № 3. Pp. 786–791. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.09.032.
42. Vasilev B. Analysis and improvement of the efficiency of frequency converters with pulse width modulation // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2019. V. 9. № 4. Pp. 2314. DOI: 10.11591/ijece.v9i4.pp2314-2320.
43. Vasilyeva N. V. [et al.] Automated digitization of radial charts // *Journal of Mining Institute*. 2021. V. 247. Pp. 82–87. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.9.
44. Voronin V. A., Nepsha F. S. Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system // *Journal of Mining Institute*. 2020. V. 246. Pp. 633–639. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5.
45. Waleed U. [et al.] An efficient FPGA based scalar V/f control mechanism of three phase induction motor for electric vehicles // *2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. IEEE, 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/AUPEC52110.2021.9597831.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Королев Николай Александрович, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, (199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2), к.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0583-9695>, e-mail: korolev_na@pers.spmi.ru

Ковальчук Маргарита Сергеевна, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, (199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2), к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3813-8019>, e-mail: kovalchuk_ms@pers.spmi.ru

Малькова Яна Михайловна, аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, (199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7834-0799>, e-mail: malkovayana1998@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Королев Николай Александрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, сбор и анализ данных.

Ковальчук Маргарита Сергеевна – концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Малькова Яна Михайловна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-13-26

Nikolay A. Korolev*, **Margarita S. Kovalchuk**, **Yana M. Malkova**

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

*E-mail: korolev_na@pers.spmi.ru

INFLUENCE OF MAGNETIZING CIRCUIT INDUCTANCE DEVIATIONS ON CHARACTERISTICS OF ELECTRIC DRIVE WITH SCALAR CONTROL SYSTEM



Article info

Received:

10 June 2024

Accepted for publication:

15 October 2024

Accepted:

24 October 2024

Published:

31 October 2024

Keywords: automated electric drive, scalar control system, induction motor, substitution circuit parameters, magnetizing circuit induct-

Abstract.

The article is devoted to the study of automated electric drive with induction motor and scalar control system. Operating conditions and modes of operation of the electric drive determine its actual service life. Wear of induction motor as a key link of electric drive is associated with deviation of its parameters from nominal. The deviation of the substitution circuit parameters determines the resulting change in characteristics. The parameters of the substitution circuit determine the accuracy of adjusting the regulators and optimal algorithms in the electric drive control system. In continuous operation modes, the possibility of autotuning of regulators, which requires stopping or idling mode, is excluded. Occurrence of interturn faults in the stator winding of the electric motor leads to a change in the inductance of the magnetizing circuit. The inductance of the magnetizing circuit has the greatest influence on the energy and mechanical characteristics of the electric drive. The paper considers the influence of the magnetizing circuit inductance value of the induction motor on the behavior of the electric drive control system. Modeling of the electric drive is carried out at change of the magnetizing circuit inductance in the range of 0.7-1.1 Lm. The behavior of the scalar control system closed by speed is evaluated by the main energy (power factor, efficiency) and mechanical (speed, electromagnetic torque) characteristics of the electric drive.

For citation: Korolev N.A., Kovalchuk M.S., Malkova Ya.M. Influence of magnetizing circuit inductance deviations on characteristics of electric drive with scalar control system. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 4(174):13-26 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-4-13-26, EDN: HAZAYN

Gratitude.

The research was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation FSRW-2023-0002 "Fundamental interdisciplinary research of the Earth's interior and the processes of integrated development of geo-resources" and the scholarship of the President of the Russian Federation for young scientists - candidates of sciences SP-2587.2022.1.

REFERENCES

1. Aazmi M.A. [et al.] A review on VFD control and energy management system of induction motor for electric vehicle. *2021 IEEE 19th Student Conference on Research and Development (SCOReD)*. IEEE, 2021. Pp. 36–41. DOI: 10.1109/SCOReD53546.2021.9652673.
2. ABB Ability™ Digital Powertrain. Condition Monitoring for rotating equipment. Available online: <https://search.abb.com/library/> (date of access 05.10.2022).
3. Bento F. [et al.] 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*. 2021; 15(1):51–62. DOI: 10.1049/elp2.12008.
4. Boikov A., Payor V. The present issues of control automation for levitation metal melting. *Symmetry*. 2022; 14(10):1968.
5. Bolobov V.I. [et al.] Service life extension for rock cutters by increasing wear resistance of holders by thermomechanical treatment. *Gornyi Zhurnal*. 2019; 5:67–71.
6. Dokka Z. [et al.] Problems of oil refining industry development in Russia. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020; 13(2):267–270.
7. Emel'yanov A.P., Churkin B.A. Skalyarnoe upravlenie asinhronnym korotkozamknutym dvigatelem po aktivnoy sostavlyayushchej toka statora. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2014; 14(3):85–90.
8. Ewert P. [et al.] Low-cost monitoring and diagnosis system for rolling bearing faults of the induction motor based on neural network approach. *Electronics*. 2020; 9(9):1334. DOI: 10.3390/electronics9091334.
9. Fernandez-Cavero V., García-Escudero L.A., Pons-Llinares J., Fernández-Temprano M.A., Duque-Perez O., Morinigo-Sotelo D. Diagnosis of broken rotor bars during the startup of inverter-fed induction motors using the dragon transform and functional ANOVA. *Applied Sciences*. 2021; 11(9):3769. DOI: 10.3390/app11093769.
10. Garcia-Calva T.A., Morinigo-Sotelo D., Fernandez-Cavero V., Garcia-Perez A., Romero-Troncoso R.D.J. Early detection of broken rotor bars in inverter-fed induction motors using speed analysis of startup transients. *Energies*. 2021; 14(5):1469. DOI: 10.3390/en14051469.
11. Graciola C.L., Goedtel A., Angélico B.A., Castoldi M.F., Costa B.L.G. Energy efficiency optimization strategy for scalar control of three-phase induction motors. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2022; 33(3):1032–1043. DOI: 10.1007/s40313-021-00876-w.
12. Gridin V.M. Raschet parametrov skhemy zameshcheniya asinhronnyh dvigatelej po katalognym dannym. *Elektrichestvo*. 2012; 5:40–44.
13. Hua B. [et al.] Comparison of three PWM strategies-SPWM, SVPWM & one-cycle control. *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. PEDS 2003. IEEE. 2003; 2:1313–1316. DOI: 10.1109/PEDS.2003.1283169
14. Jabłoński M., Borkowski P. Correction mechanism for balancing driving torques in an opencast mining stacker with an induction motor and converter drive system. *Energies*. 2022; 15(4):1282. DOI: 10.3390/en15041282.
15. Keskin B., Eminoğlu İ. Optimally tuned PI controller design for V/f control of induction motor. *2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. IEEE, 2022. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/HORA55278.2022.9800005.
16. Klyuev R.V. [et al.] Analiz poter' elektroenergiiv sisteme elektrosnabzheniya obogatitel'noj fabрики. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2021; 332(10):7–16.
17. Kopylov I.P. Proektirovanie elektricheskikh mashin. M: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «Izdatel'stvo YURAJT»; 2019.
18. Koteleva N.I. [et al.] Identification of the technical condition of induction motor groups by the total energy flow. *Energies*. 2021; 14(20):6677. DOI: 10.3390/en14206677.
19. Krishnasamy B., Ashok K. Assessment of harmonic mitigation in v/f drive of induction motor using an ann-based hybrid power filter for a wheat flour mill. *Processes*. 2022; 10(6):1191. DOI: 10.3390/pr10061191.
20. Kudelina K. [et al.] Trends and challenges in intelligent condition monitoring of electrical machines using machine learning. *Applied Sciences*. 2021; 11(6):2761. DOI: 10.3390/app11062761.
21. Kumar A. [et al.] Hybrid Space Vector PWM Fed Induction Motor Drive Control. *2021 Fourth In-*

ternational Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). IEEE. 2021. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICECCT52121.2021.9616740.

22. Zhukovskiy Y.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 and Technology*. 2023; 8(1):65–78.

23. Manikandan S., Duraivelu K. 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*. 2021; 235(2):629–642. DOI: 10.1177/0954408920971976.

24. Marfoli A. [et al.] Squirrel cage induction motor: A design-based comparison between aluminium and copper cages. *IEEE Open Journal of Industry Applications*. 2021; 2:110–120. DOI: 10.1109/OJIA.2021.3073820.

25. Melnykov V. The correction of the operation modes for frequency-controlled induction motor with scalar control under stator windings damage appearance. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. IEEE. 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598710.

26. Menghal P.M., Jaya Laxmi A. Artificial Intelligence-Based Real-Time Control of Induction Motor Using dSPACE Controller. *International Conference on Automation, Signal Processing, Instrumentation and Control*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2020. Pp. 801–815. DOI: 10.1007/978-981-15-8221-9_75.

27. Nikolaev A.V. [et al.] Application of the cybernetic approach to price-dependent demand response for underground mining enterprise electricity consumption. *Journal of Mining Institute*. 2023; 261:403–414. DOI: 10.31897/PMI.2022.33.

28. Niu Y. [et al.] Effects of digitalization on energy efficiency: Evidence from Zhejiang Province in China. *Frontiers in Energy Research*. 2022; 10:847339. DOI: 10.3389/fenrg.2022.847339.

29. Ostroverkhov V.V., Nalivaiko N.V. Condition Assessment and Diagnostics of Asynchronous Electric Motors Using Signature Analysis of Consumed Current. *Russian Electrical Engineering*. 2020; 91(11):714–723. DOI: 10.3103/S1068371220110097.

30. Pedra J. On the determination of induction motor parameters from manufacturer data for electromagnetic transient programs. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2008; 23(4):1709–1718. DOI: 10.1109/TPWRS.2008.2002293.

31. Pietrzak P., Wolkiewicz M. On-line detection and classification of PMSM stator winding faults based on stator current symmetrical components analysis and the KNN algorithm. *Electronics*. 2021; 10(15):1786. DOI: 10.3390/electronics10151786.

32. Pilyaev S.N. [et al.] Povyshenie energoeffektivnosti tekhnologicheskikh ustanovok na osnove skalyarnogo upravleniya asinhronnym elektroprivodom. *Tendencii razvitiya tekhnicheskikh sredstv i tekhnologij v APK*. 2021. Pp. 127–132.

33. Richardson M.T. [et al.] Microcontroller based space vector pulse width modulation speed control of three-phase induction motor. *SoutheastCon 2021*. IEEE. 2021. Pp. 1–6.

34. Rouabah B. [et al.] Adaptive data-driven fault-tolerant control strategy for optimal power extraction in presence of broken rotor bars in wind turbine. *ISA transactions*. 2022; 130:92–103. DOI: 10.1016/j.isatra.2022.04.008.

35. Runji J.M. [et al.] User requirements analysis on augmented reality-based maintenance in manufacturing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2022; 22(5):050901. DOI: 10.1115/1.4053410.

36. Savard C. [et al.] Accessible battery model with aging dependency. *Energies*. 2021; 14(12):3493. DOI: 10.3390/en14123493.

37. Skamyin A. [et al.] An assessment of the share contributions of distortion sources for various load parameters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022; 13(2):950–959. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp950-959.

38. Sultana B. [et al.] Design of a FPGA-based inverter drive for hf injection based sensorless control. *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE. 2021. V. 1. Pp. 178–183. DOI: 10.1109/ICIT46573.2021.9453641.

39. Sun X.D. [et al.] 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*. 2009; 56(8):3161–3168. DOI: 10.1109/TIE.2009.2021679.

40. Sychev Y.A. [et al.] Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022; 13(3):1625. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634.

41. Ustun S.V. Modeling and control of V/f controlled induction motor using genetic-ANFIS algorithm. *Energy conversion and management*. 2009; 50(3):786–791. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.09.032.

42. Vasilev B. Analysis and improvement of the efficiency of frequency converters with pulse width modulation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2019; 9(4): 2314. DOI: 10.11591/ijece.v9i4.pp2314-2320.

43. Vasilyeva N.V. [et al.] Automated digitization of radial charts. *Journal of Mining Institute*. 2021; 247:82–87. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.9.

44. Voronin V.A., Nepsha F.S. Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system. *Journal of Mining Institute*. 2020; 246:633–639. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5.

45. Waleed U. [et al.] An efficient FPGA based scalar V/f control mechanism of three phase induction motor for electric vehicles. *2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. IEEE. 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/AUPEC52110.2021.9597831.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Nikolay A. Korolev, associate professor, Educational research center for digital technologies, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, (199106, Russia, St. Petersburg, 21 Line of Vasilyevsky Island, 2), PhD, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0583-9695>, e-mail: korolev_na@pers.spmi.ru

Margarita S. Kovalchuk, associate professor, Department of Electrical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, (199106, Russia, St. Petersburg, 21 Line of Vasilyevsky Island, 2), PhD, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3813-8019>, e-mail: kovalchuk_ms@pers.spmi.ru

Yana M. Malkova, postgraduate student, Department of Electrical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, (199106, Russia, St. Petersburg, 21 Line of Vasilyevsky Island, 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7834-0799>, e-mail: malkovayana1998@gmail.com

Contribution of the authors:

Nikolay A. Korolev – formulation of the research problem, scientific management, conceptualization of the study, data collection and analysis.

Margarita S. Kovalchuk – conceptualization of the study, conclusions, writing the text.

Yana M. Malkova – review of relevant literature, collection and analysis of data, review of relevant literature,

Authors have read and approved the final manuscript.

