



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.423.31:621.313.333

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-212-223>

EDN: <https://elibrary.ru/yrfuya>



Уточненная компьютерная модель электромагнитных процессов вспомогательного асинхронного двигателя с автономным инвертором напряжения для электровоза

М. Ю. Пустоветов✉

Судостроительно-судоремонтный завод «РИФ»,
Ростов-на-Дону, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена задача повышения точности компьютерного моделирования электромагнитных процессов вспомогательного асинхронного двигателя электровоза при частотном регулировании от автономного инвертора напряжения. Уточнен расчет мгновенных значений фазного тока двигателя. Обосновано предложение уточняющих изменений в компьютерной модели трехфазного асинхронного двигателя, позволяющих учесть влияние скин-эффекта в обмотках статора и ротора, а также насыщения магнитной цепи от потоков рассеяния на величины индуктивностей рассеяния фаз и через них — на величины мгновенных значений фазных токов. Актуальность предложенной модели связана с необходимостью повышения надежности вспомогательного электропривода электровоза за счет корректного выбора полупроводниковых ключей инвертора электродвигателя.

Материалы и методы. В качестве метода исследования выбрано компьютерное моделирование с применением системы автоматизированного проектирования OrCAD, при этом в исходных данных размещены экспериментальные мгновенные значения фазных напряжений вспомогательного асинхронного двигателя.

Результаты. Представлены и сопоставлены с экспериментальными данными результаты уточненного компьютерного моделирования мгновенных значений переменных для установившегося режима работы двигателя.

Обсуждение и заключение. На основании сравнения экспериментальных и расчетных данных (тока фазы, вращающего момента, частоты вращения вспомогательного асинхронного двигателя электровоза) сделан вывод о целесообразности применения уточненной компьютерной модели для снижения погрешностей расчета электромагнитных процессов электродвигателя. Уточненная компьютерная модель повышает точность расчета мгновенных значений фазных токов двигателя. Выполнены расчеты для установившегося режима работы асинхронного двигателя типа АЖВ250М2РУХЛ2. Показано, что наибольшее влияние на индуктивность рассеяния обмотки статора оказывает скин-эффект.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз переменного тока, вспомогательный асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, индуктивность рассеяния, ток фазы, насыщение магнитной цепи, скин-эффект, компьютерное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пустоветов М. Ю. Уточненная компьютерная модель электромагнитных процессов вспомогательного асинхронного двигателя с автономным инвертором напряжения для электровоза // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 212–223. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-212-223>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.31:621.313.333

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-212-223>

EDN: <https://elibrary.ru/yrfuya>



Adjusted computer model of electromagnetic processes of an auxiliary asynchronous motor with an autonomous voltage inverter for an electric locomotive

Mikhail Yu. Pustovetov✉

RIF Shipyard,
Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The author examines the problem of improving the accuracy of computer simulation of electromagnetic processes of an auxiliary asynchronous motor of an electric locomotive with the frequency adjusted by an autonomous voltage inverter. The calculations of instantaneous motor phase currents were improved. The research justified the proposed adjustments to the computer model of a three-phase asynchronous motor to consider the skin effect in the stator and rotor windings, and the effect of the magnetic circuit saturation from leakage fluxes on the leakage inductance of the phases and, thereby, on the instantaneous phase currents. The model is necessary to enhance the reliability of the auxiliary electric drive of an electric locomotive through the correct selection of semiconductor switches for the electric motor inverter.

Materials and methods. The researcher chose computer simulation using OrCAD as our research method, and the input data include experimental instantaneous phase voltages of the auxiliary asynchronous motor.

Results. The article presents the results of adjusted computer simulations of instantaneous variables for steady-state engine operation and compares them with experimental data.

Discussion and conclusion. The author compared the experimental and calculated data (phase current, torque, rotation speed of the auxiliary asynchronous motor of an electric locomotive) and substantiated the adjusted computer model to reduce errors in the calculation of electromagnetic processes of the electric motor. The adjusted computer model improves the accuracy of calculating the instantaneous phase currents of the motor. The calculations were performed for the steady-state operation of an asynchronous motor of the AZhV250M2RUHL2 type. The results show that the skin effect has the greatest influence on the leakage inductance of the stator winding.

KEYWORDS: AC electric locomotive, auxiliary asynchronous motor, variable frequency electric drive, leakage inductance, phase current, magnetic circuit saturation, skin effect, computer simulation

FOR CITATION: Pustovetov M. Yu. Adjusted computer model of electromagnetic processes of an auxiliary asynchronous motor with an autonomous voltage inverter for an electric locomotive. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):212-223. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-212-223>.

Введение. Асинхронные двигатели (АД) благодаря простоте своей конструкции, отработанной технологии изготовления и надежности в эксплуатации являются, пожалуй, самыми распространенными в мире электрическими машинами [1]. Частотно-регулируемый электропривод (ЧРЭП) с трехфазными АД применяется на электроподвижном составе как в качестве тягового [2], так и вспомогательного [3, 4]. Ввиду относительной простоты механизмов вспомогательного электропривода и небольшого диапазона регулирования рабочих частот вращения двигателя для вспомогательных механизмов на борту электровозов получил распространение ЧРЭП со скалярным регулированием частоты вращения на базе АД с двухуровневым автономным инвертором напряжения (АИН) [4–6]. Например, в составе преобразователя собственных нужд ПСН-169 на борту электровоза переменного тока типа ЭП200 АИН является нагрузкой активного корректора коэффициента мощности [6, 7].

Для анализа режимов работы АД в составе электроприводов принято использовать компьютерное моделирование [1, 8–10]. Эта информационная технология позволяет сократить время на разработку изделий, рассмотреть множество различных вариантов, распознать неудачные технические решения и выбрать приемлемые способы их исправления.

Замечено, что при моделировании процессов в АД в составе ЧРЭП имеются некоторые несоответствия между мгновенными значениями экспериментальной кривой тока и рассчитанной. Это видно, например, из иллюстраций, приведенных в [9, 11], для полученной в результате эксперимента и расчетной кривых тока фазы вспомогательного трехфазного АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 для привода вентилятора. Это двухполюсная электрическая машина с питанием от АИН, номинальной мощностью 110 кВт, с литой короткозамкнутой обмоткой ротора из алюминия, всыпной обмоткой статора из медного провода круглого сечения. Параметры и характеристики этого АД даны в [9]. По сравнению со значениями тока, полученными в результате компьютерного моделирования, экспериментальный ток быстрее нарастает и спадает при коммутациях фазного напряжения, а также имеет несколько большую амплитуду. Вероятной причиной этого является неучет в математических и компьютерных моделях АД [9–11] насыщения магнитной цепи по путям рассеяния, т. е. отличные от фактических значения индуктивностей рассеяния статора и ротора. Аналогичные выводы можно сделать из сравнения полученных в результате эксперимента и компьютерного моделирования кривых тока фазы АД, представленных в работах [12] и [13]. Впрочем, аналогичная разница в поведении токов при питании от АИН присуща также существенно более сложным математическим

моделям АД [14], что видно из графиков тока тягового АД НТА-1200, представленных на рис. 2.18 в работе [14, с. 70]. При использовании результатов моделирования для выбора полупроводниковых приборов АИН по току рекомендовано умножить амплитуду тока, полученного в результате моделирования, на коэффициент, равный 1,30–1,35 [9–11].

Расчетная кривая тока фазы может быть получена с использованием метода гармонического анализа на основе Т-образной схемы замещения фазы АД (рис. 1 [11]).

Метод подробно описан в [2, 15, 16]. В [17] метод уточнен: внесено исправление в расчет электромагнитного момента. Особенностью метода гармонического анализа является то, что действие эффекта вытеснения тока на активные сопротивления и индуктивности схемы замещения учитывается для каждой временной гармоники посредством выражений, описанных в [18]. Насыщение магнитной цепи от основного потока задается постоянным значением коэффициента насыщения. Насыщение магнитной цепи потоками рассеяния не учитывается. Недостатком метода гармонического анализа является его применимость лишь к установившимся режимам работы АД. Причем величина скольжения ротора s задается как одно из исходных данных расчета, оставаясь далее неизменной, не претерпевая никаких колебаний (не предусмотрено решение уравнения движения ротора), что, строго говоря, является идеализированным подходом для большинства режимов работы АД при питании от АИН.

В таблице представлены данные расчета режима работы мотор-вентилятора на базе АД типа АЖВ250М2РУХЛ2, питаемого от АИН при частоте основной гармоники тока статора $f_1 = 48,4$ Гц, полученные разными методами, в сопоставлении с экспериментальными данными (указаны в строке 1). Среднее квадратическое отклонение (СКО) от полученной в результате эксперимента кривой составило 9,91 %. Все значения СКО в таблице нормированы к наибольшему мгновенному значению тока, полученному в эксперименте, за рассматриваемый промежуток времени. Для всех вариантов моделирования и расчета учтено насыщение магнитной системы основным магнитным потоком; при моделировании на основе уравнений, данных в [9], не учтено влияние скин-эффекта на активные сопротивления обмоток; на фазы модели АД подаются кривые напряжения, полученные экспериментальным путем.

Цель работы — предложить уточняющие изменения в компьютерной модели трехфазного АД для повышения точности математического описания электромагнитных процессов при питании от АИН. Изменения модели продиктованы необходимостью

Таблица

Сравнительные характеристики режима работы мотор-вентилятора на базе АД АЖВ250М2РУХЛ2, питаемого от АИН, полученные разными методами

Table

Comparative characteristics of the operating mode of a blower-motor based on asynchronous motor AZhV250M2RUHL2 powered by an autonomous voltage inverter obtained by different methods

№ п/п	Характеристика анализируемого режима	Частота 1-й гармоники питающего напряжения, Гц	Действующее значение 1-й гармоники тока статора, А	Погрешность расчета, %	Среднее значение частоты вращения, об/мин	Погрешность расчета, %	Среднее значение вращающего момента, Н·м	Погрешность расчета, %	Максимальное расчетное значение электромагнитного момента, Н·м	Минимальное расчетное значение электромагнитного момента, Н·м	Коэффициент пульсаций электромагнитного момента, %	СКО расчетной кривой фазы от экспериментальной, %
1	Эксперимент	48,4	235,7		2869,5		360,0					
2	Моделирование ^{I)}	48,4	242,3	2,796	2868,6	−0,031	346,7	−3,683	449,8	261,9	27,1	9,58
3	Моделирование ^{II)}	48,4	242,8	2,992	2868,7	−0,028	346,8	−3,663	448,7	264,1	26,6	10,14
4	Моделирование ^{III)}	48,4	236,1	0,180	2872,6	0,108	350,1	−2,756	476,5	232,4	34,9	8,09
5	Моделирование ^{IV)}	48,4	232,4	−1,390	2872,6	0,108	350,1	−2,756	476,5	232,4	34,9	8,13
6	Моделирование ^{V)}	48,4	225,9	−4,186	2875,1	0,195	349,0	−3,050	466,8	246,8	31,5	9,45
7	Моделирование ^{VI)}	48,4	237,6	0,785	2871,3	0,063	348,1	−3,304	460,8	251,4	30,1	8,18
8	Моделирование ^{VII)}	48,4	242,2	2,741	2868,7	0,028	347,2	−3,546	452,8	259,8	27,8	9,21
9	Моделирование ^{VIII)}	48,4	237,3	0,688	2871,3	0,063	347,7	−3,415	460,0	247,5	30,5	8,04
10	Расчет по методу гармонического анализа ^{IX)}	48,4	245,0	3,946	2845,9	0,822	365,0	1,389	441,0	302,0	19,0	9,91

Примечания:

- I) Без учета влияния на индуктивности рассеяния статора и ротора скин-эффекта и насыщения магнитной цепи.
 II) Отличается от (I) учетом влияния на индуктивности рассеяния статора и ротора насыщения магнитной цепи.
 III) С учетом влияния на индуктивность рассеяния только статора: 1) насыщения магнитной цепи; 2) скин-эффекта в функции частоты тока статора $f_1^{-0,16}$.
 IV) Отличается от (III) учетом влияния на индуктивность рассеяния статора скин-эффекта в функции частоты тока статора $f_1^{-0,5}$.
 V) С учетом влияния на индуктивности рассеяния: 1) насыщения магнитной цепи; 2) скин-эффекта в функции частоты тока (для статора $f_1^{-0,16}$ и для ротора $f_2 = (sf_1)^{-0,16}$).
 VI) Отличается от (V) отсутствием влияния на индуктивность рассеяния ротора насыщения магнитной цепи.
 VII) С учетом влияния на индуктивности рассеяния статора и ротора насыщения магнитной цепи (отсутствует для ротора до величины тока $1,2\sqrt{2}I_{ном}$).
 VIII) Отличается от (VII) учетом влияния на индуктивности рассеяния скин-эффекта в функции частоты тока в обмотке.
 IX) При расчете по методу гармонического анализа [2, 15–17]: 1) учтено влияние скин-эффекта только на активное сопротивление обмотки ротора; 2) напряжение фазы синтезировано по гармоникам с порядковыми номерами 1, 5, 7, 11, 13, ..., 97, полученным из разложения экспериментальной кривой фазного напряжения; 3) учтено влияние скин-эффекта на индуктивности рассеяния статора и ротора в пазовых частях обмоток; 4) не учтено влияние на индуктивности рассеяния статора и ротора насыщения магнитной цепи.

Notes:

- I) Disregarding the skin effect and the magnetic circuit saturation in the stator and rotor leakage inductance.
 II) Unlike (I), factors in the effect of the magnetic circuit saturation on the stator and rotor leakage inductance.
 III) With only stator leakage inductance affected by: 1) the magnetic circuit saturation; 2) skin effect as function $f_1^{-0,16}$ of current frequency.
 IV) Unlike (III), factors in the skin effect as a function of the stator current frequency $f_1^{-0,5}$ on stator leakage inductance.
 V) With leakage inductance affected by: 1) the magnetic circuit saturation; 2) skin effect as a function of current frequency ($f_1^{-0,16}$ for the stator and $f_2 = (sf_1)^{-0,16}$ for the rotor).
 VI) Unlike (V), with no effect of the magnetic circuit saturation on the rotor leakage inductance.
 VII) Given the influence of the magnetic circuit saturation on the stator and rotor leakage inductance (absent for the rotor to current $1,2\sqrt{2}I_{ном}$).
 VIII) Unlike (VII), factors in the skin effect as a function of the current frequency in the winding on the leakage inductance.
 IX) Calculated with the harmonic analysis method [2, 15–17]: 1) factors in the skin effect only on the active resistance of the rotor winding; 2) phase voltage synthesised from harmonics 1, 5, 7, 11, 13, ..., 97 from the expansion of the experimental phase voltage curve; 3) given the skin effect on the stator and rotor leakage inductance in the slotted parts of the windings; 4) disregarding the magnetic circuit saturation in the stator and rotor leakage inductance.

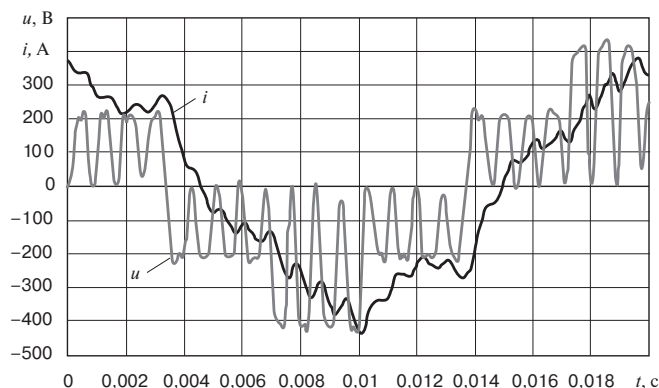


Рис. 1. Расчетные кривые напряжения и тока фазы АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 при питании от АИН при частоте основной гармоники тока статора $f_1 = 48,4$ Гц, полученные с использованием метода гармонического анализа. Напряжение синтезировано по гармоникам с порядковыми номерами 1, 5, 7, 11, 13, ..., 97, полученным из разложения экспериментальной кривой фазного напряжения в ряд Фурье [11]

Fig. 1. Calculated phase voltage and current curves of the AZhV250M2RUHL2 type asynchronous motor powered by an autonomous voltage inverter at the fundamental harmonic frequency of the stator current $f_1 = 48.4$ Hz obtained by harmonic analysis. The voltage is synthesised from harmonics 1, 5, 7, 11, 13, ..., 97 from the Fourier series expansion of the experimental phase voltage curve [11]

повышения надежности вспомогательного электропривода электровозов за счет корректного выбора полупроводниковых ключей АИН.

Постановка задачи. В работах [9, 10] описаны разработанные автором математическая и компьютерная модели трехфазного АД в трехфазных заторможенных координатах, базирующиеся на Т-образной схеме замещения АД и решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) и алгебраических уравнений [1], включая уравнение движения ротора. В отличие от метода гармонического анализа математическая модель позволяет рассматривать и переходные, и установившиеся процессы в АД.

Также модель позволяет учитывать явление насыщения магнитной цепи основным магнитным потоком, сцепленным одновременно с магнитопроводами статора и ротора. Модуль мгновенного значения амплитуды изображающего вектора потокосцепления взаимной индукции рассчитывается через ортогональные проекции вектора [8]. Структуры и приемы, апробированные в компьютерной модели [9, 10], реализованной средствами системы автоматизированного проектирования (САПР) OrCAD [19, 20], успешно использованы для разработки моделей АД [21] в среде Matlab [22], которые позволяют учитывать влияние межвитковых замыканий в обмотке статора на режим работы электрической машины.

Сравнивая допущения, принятые в компьютерной модели, с методом гармонического анализа, отметим, что согласно [9, 10] не учитывается влияние

скин-эффекта на активные сопротивления и индуктивности. Насыщение магнитной цепи потоками рассеяния также не учитывается.

Возникают вопросы: 1) как влияют принятые в модели [9, 10] допущения на соответствие моделируемой кривой тока фазы статора АД экспериментально полученной кривой тока при питании от АИН; 2) какие уточнения можно внести в компьютерную модель АД для учета влияния на индуктивности рассеяния скин-эффекта и насыщения от магнитных потоков рассеяния.

В работах [10, 12–14] напряжения, подаваемые на фазы моделируемого АД, формируются при помощи той или иной компьютерной модели АИН, т. е. неизбежно являются идеализированными и несколько отличаются по форме от регистрируемых в ходе эксперимента осциллограмм напряжений. Например, на рис. 1 кривая фазного напряжения АД, используемая в качестве входного сигнала при расчетах, синтезирована на основе усеченного ряда Фурье, из которого отброшены гармонические составляющие порядков выше 97-го, что визуально воспринимается как сглаженная форма импульсов напряжения по сравнению с ожидаемым набором импульсов, форма которых близка к прямоугольной. Использование при моделировании идеальных трапецеидальных импульсов напряжения с очень крутыми фронтами также является отступлением от истины: длительность фронтов зависит от конкретного типа применяемых полупроводниковых ключей; форма трапеции на самом деле криволинейная, поскольку искажается влиянием как процессов коммутации самих ключей, так и влиянием паразитных элементов монтажа преобразователя, случайными процессами электромагнитного взаимодействия с другим оборудованием. Эти обстоятельства позволяют оправдывать расхождение токов фаз АД, получаемых в результате моделирования и эксперимента. Логика проста: поскольку есть различия во входных сигналах (напряжения на фазах АД) при моделировании и эксперименте, то они приведут к различиям выходных сигналов (токов фаз АД). С целью исключения влияния неточности воспроизведения компьютерной моделью АИН деталей формы напряжений, регистрируемых в ходе экспериментов, на результат моделирования токов будем подавать на фазы компьютерной модели АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 осциллограммы напряжений, полученные экспериментально. Такой подход уже использовался автором в иной программной среде [11]. Осциллограммы напряжений и токов АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 получены специалистами ОАО «ВЭЛНИИ» (г. Новочеркасск) в ходе испытаний преобразователя собственных нужд ПСН-169 и опубликованы в [6].

В современных САПР, в частности в OrCAD, существует возможность задать сигнал в виде текстового

файла, содержащего абсциссы и ординаты точек кривой. При необходимости длительного повторения сигнала имеется опция, позволяющая циклически повторять содержимое текстового файла в течение заданного времени. Измерительные системы, получающие данные экспериментов с первичных датчиков-преобразователей, имеют свое программно-аппаратное обеспечение аналого-цифрового преобразования, позволяющее регистрировать результаты измерений, сохраняя их в виде текстовых файлов. Эти текстовые файлы, содержащие координаты зарегистрированных точек кривых физических величин во временной области, чаще всего после некоторых преобразований формата записанных данных используются в качестве текстовых файлов данных, задающих сигнал в компьютерных моделях, разрабатываемых посредством САПР. Такое внесение оцифрованных данных эксперимента (формы экспериментально полученной кривой) в качестве сигнала в компьютерную модель не подразумевает промежуточных операций, способствующих накоплению искажений, как то: распечатка кривой, ручное оцифровывание координат ее точек, ручной ввод данных в текстовый файл. Те же самые цифры, что получены в результате измерений, используются как задающий сигнал напряжений фаз при компьютерном моделировании.

Ответ на первый из поставленных вопросов следует из результатов компьютерного моделирования (таблица, строка 2) — для полученной кривой тока фазы имеем СКО = 9,58 %. С целью снижения СКО внесем уточнения в компьютерную модель АД [9, 10].

Учет насыщения от магнитных потоков рассеяния. Как известно, в электрических машинах кроме главного магнитного потока присутствуют магнитные потоки рассеяния [1]. При степени детализации, присущей вышеупомянутым компьютерным моделям АД [1, 9, 10, 21], следует говорить о магнитных потоках рассеяния фаз обмоток статора и ротора. Уточним, что, например, магнитный поток рассеяния фазы B статора сцеплен исключительно со статором (не проникает через воздушный зазор в ротор) и исключительно с фазой B обмотки статора АД. Если нелинейность кривой намагничивания от основного магнитного потока определяет непостоянство величины главной индуктивности в схеме замещения АД, то нелинейность кривой намагничивания от магнитных потоков рассеяния определяет непостоянство величин индуктивностей рассеяния фаз обмоток статора и ротора АД. Иначе говоря, индуктивность рассеяния фазы обмотки АД зависит от величины тока, протекающего через эту обмотку. В [23] описан случай, когда для одного из типов АД насыщение магнитной системы потоками рассеяния имело определяющее влияние на характеристики режимов работы электрической машины. То есть учет этого явления может быть важен

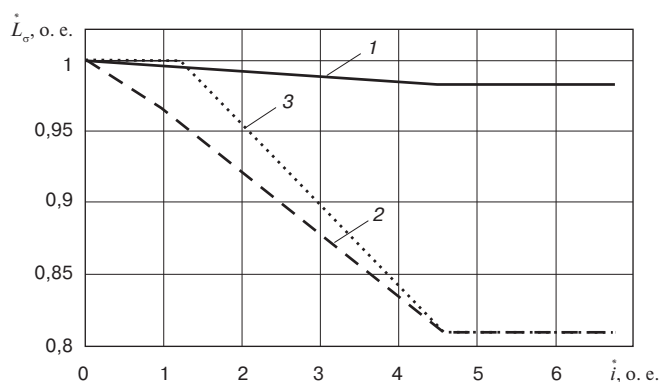


Рис. 2. Нелинейные характеристики, принятые для моделирования индуктивностей рассеяния статора и ротора АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 в относительных единицах:

1 — $\dot{L}_{\sigma 1}(i)$; 2 — начальный вариант $\dot{L}'_{\sigma 2}(i)$;
3 — конечный вариант $\dot{L}'_{\sigma 2}(i)$

Fig. 2. Non-linear characteristics assumed for simulating the stator and rotor leakage inductances of an AZhV250M2RUHL2 type asynchronous motor in relative units:

1 — $\dot{L}_{\sigma 1}(i)$; 2 — initial variant $\dot{L}'_{\sigma 2}(i)$;
3 — final variant $\dot{L}'_{\sigma 2}(i)$

для обеспечения адекватности моделирования процессов в АД.

Как правило (также и в случае АД типа АЖВ250М2РУХЛ2), зависимости индуктивностей рассеяния от тока неизвестны. По рекомендации [23] нелинейность, характеризующая изменение индуктивности рассеяния, должна охватывать режимы работы АД от холостого хода до короткого замыкания. Для АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 известны значения индуктивных сопротивлений статора и ротора в пусковом режиме при синусоидальном напряжении, составляющие соответственно 98,2 и 81,1 % от значений в номинальном режиме, т. е. это значения при $s = 1$. Соглашаясь с [23] в том, что трудно разделить влияние на индуктивность рассеяния явлений насыщения и скин-эффекта, обратим внимание на то, что и в режиме короткого замыкания, и в режиме холостого хода через индуктивность рассеяния статора протекает ток одинаковой частоты. Отсюда следует вывод, что, во всяком случае, в статоре уменьшение индуктивного сопротивления рассеяния (и прямо пропорционально — индуктивности рассеяния) обусловлено большими величинами пусковых токов, но не частотой тока (не явлением скин-эффекта). Для единообразия такой же подход распространим на приведенную индуктивность рассеяния ротора.

На рис. 2 представлен принятый для моделирования вид нелинейных характеристик индуктивностей рассеяния статора и ротора соответственно. Будем использовать сначала кривые 1 и 2.

Автором в работах [9, 24] приведено описание математической и компьютерной моделей насыщающегося

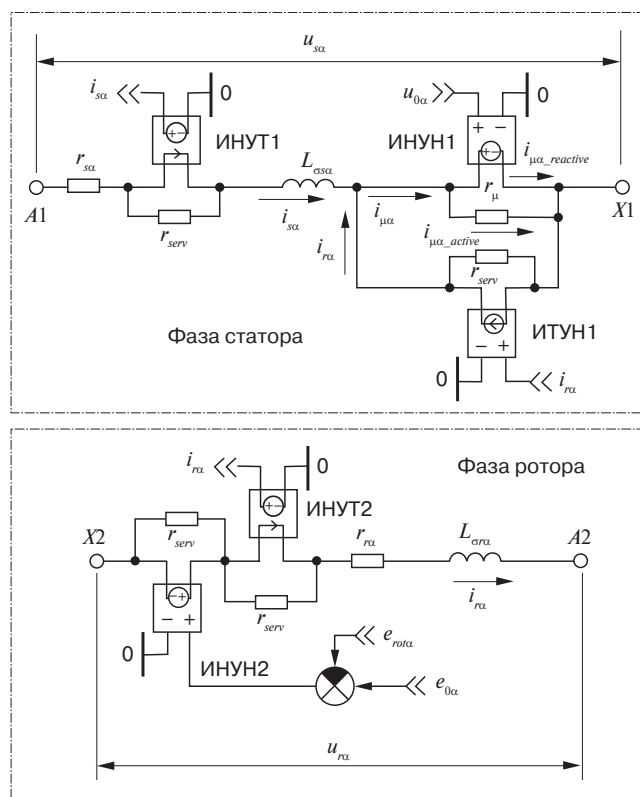


Рис. 3. Графическое изображение исходной (без учета насыщения потоками рассеяния) компьютерной модели фазы *A* обмоток статора и ротора трехфазного АД согласно [9]:

A1 и *X1* — маркировка начала и конца фазы статора; *A2* и *X2* — маркировка начала и конца фазы ротора; u_{sa} — напряжение фазы статора; i_{sa} — ток фазы статора; u_{ra} — напряжение фазы ротора; i_{ra} — ток фазы ротора; u_{0a}, e_{0a} — напряжение и ЭДС намагничивания фазы АД; $i_{\mu a}, i_{\mu a, active}, i_{\mu a, reactive}$ — ток намагничивания фазы, его активная и индуктивная составляющие; e_{rota} — ЭДС вращения фазы; r_{sa}, r_{ra} — активные сопротивления фазы статора и ротора; r_{μ} — сопротивление потерь в стали; $L_{\sigma sa}, L_{\sigma ra}$ — индуктивности рассеяния фазы статора и ротора; параметры ротора традиционно приведены к фазе статора

Fig. 3. Graphic representation of the initial (disregarding saturation with leakage fluxes) computer simulation of Phase *A* of the stator and rotor windings of a three-phase asynchronous motor subject to [9]:

A1 и *X1* — stator phase beginning and end marking; *A2* и *X2* — rotor phase beginning and end marking; u_{sa} — stator phase voltage; i_{sa} — stator phase current; u_{ra} — rotor phase voltage; i_{ra} — rotor phase current; u_{0a}, e_{0a} — voltage and EMF of the magnetising phase of the asynchronous motor; $i_{\mu a}, i_{\mu a, active}, i_{\mu a, reactive}$ — phase magnetising current, its active and inductive components; e_{rota} — EMF of phase rotation; r_{sa}, r_{ra} — active resistances of the stator and rotor phases; r_{μ} — steel loss resistance; $L_{\sigma sa}, L_{\sigma ra}$ — the stator and rotor phase leakage inductances; rotor parameters are traditionally reduced to the stator phase

электрического дросселя. Такой же подход предлагается использовать для учета насыщения магнитными потоками рассеяния индуктивностей обмоток фаз статора и ротора в компьютерной модели трехфазного АД. На рис. 3 показано графическое изображение компьютерной модели фазы *A* обмоток статора и ротора АД согласно [9, 10] (исходный вариант). На рис. 3–5 в качестве датчиков и для ввода сигналов в составе модели АД

использованы элементы типа ИНУН, ИНУТ, ИТУН. В этих сокращениях: И — источник; У — управляемый; Н — напряжение; Т — ток. Например, ИНУТ — источник напряжения, управляемый ток. На рис. 4 и 5, представляющих собой дополненный для учета насыщения от магнитных потоков рассеяния вариант схемы [25], блок ABS выполняет операцию вычисления модуля сигнала. Блок TABLE представляет собой таблицу, в которой заданы значения индуктивности рассеяния (в относительных единицах) в функции мгновенного тока статора. Блок в виде прямоугольника, имеющий внутри обозначение «1,0», является источником постоянного напряжения величиной 1,0 В. Резисторы r_{serv} обладают большим сопротивлением, например 10 МОм. Практически не влияя на численные результаты моделирования, они стабилизируют ход решения за счет сохранения цепи протекания тока (физический смысл — путь протекания токов утечки), что особенно важно при дискретном изменении сопротивления цепей питания АД, например при питании от полупроводникового преобразователя частоты или при обрыве фазы.

Отметим, что резистивные элементы подобного назначения используются другими разработчиками компьютерных моделей электротехнических устройств [26]. Аналогичным образом на рис. 4 учитывается насыщение магнитной цепи потоками рассеяния в фазах ротора АД; дополнив нижнюю часть рис. 3, получаем рис. 5.

По второму закону Кирхгофа для фазы *A* статора и ротора АД (приведена к статору [9, 10]) с учетом [9, 24] можно записать уравнения (1) и (2) соответственно (обозначения по [9, 24] и рис. 3–5):

$$u_{sa} + \Delta L_{\sigma sa}(i_{sa}) \frac{di_{sa}}{dt} = r_{sa} i_{sa} + L_{\sigma sa} \frac{di_{sa}}{dt} + u_{0a}; \quad (1)$$

$$u_{ra} + \Delta L_{\sigma ra}(i_{ra}) \frac{di_{ra}}{dt} = e_{0a} - e_{rota} - L_{\sigma ra} \frac{di_{ra}}{dt} - r_{ra} i_{ra}. \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) $\Delta L_{\sigma}(i)$ — мгновенное значение разницы между ненасыщенным и насыщенным значениями индуктивности рассеяния (для рис. 4 и 5), т. е. между постоянным значением L_{σ} , не учитывающим влияние насыщения от потоков рассеяния (относительное значение $L_{\sigma} = 1$ о. е.), и переменным в зависимости от величины протекающего тока значением $L_{\sigma sat}(i)$, учитывающим влияние насыщения от потоков рассеяния (относительное значение $L_{\sigma sat}(i) \leq 1$ о. е.).

Блок TABLE1 на рис. 4 реализует нелинейную зависимость индуктивности рассеяния статора от тока фазы статора согласно кривой 1 на рис. 2. Блок TABLE2 на рис. 5 реализует нелинейную зависимость индуктивности рассеяния ротора от тока фазы ротора согласно кривой 2 на рис. 2. Параметры фазы ротора и ее ток приведены к статору. Для простоты в знаменателе коэффициента передачи блока-усилителя перед

блоком TABLE2 на рис. 5 можно использовать значение тока $I_{\text{ном}}$ в качестве базисного.

ЭДС $\Delta L_{\sigma\sigma\alpha}(i_{\sigma\alpha}) \frac{di_{\sigma\alpha}}{dt}$ вводится в электрическую цепь фазы статора посредством ИНУН3 (см. рис. 4), а ЭДС $\Delta L_{\sigma\sigma\alpha}(i_{r\alpha}) \frac{di_{r\alpha}}{dt}$ вводится в электрическую цепь фазы ротора посредством ИНУН6 (см. рис. 5). Для остальных фаз уравнения аналогичны (1) и (2).

Для смоделированной кривой тока фазы при учете снижения индуктивностей рассеяния (ввиду насыщения от магнитных потоков рассеяния) имеем СКО=10,14% (таблица, строка 3), что говорит об увеличении различия между полученными в результате компьютерного моделирования и эксперимента кривыми тока. Автор предполагал, наоборот, сближение форм кривых. Проанализируем причину несоответствия ожидания факту несколько позже.

Учет влияния скин-эффекта на индуктивности рассеяния. Как видно из рис. 1, выходное напряжение АИН является несинусоидальным полигармоническим. Ток ввиду коммутаций импульсов напряжения имеет явно выраженные пульсации, форма которых близка к треугольной. Частота этих пульсаций превосходит частоту основной гармоники тока. При повышенных частотах закономерно ожидать проявлений скин-эффекта, в том числе снижающего величину индуктивностей рассеяния [27]. Как правило, учет при математическом моделировании АД скин-эффекта, зависящего от частоты тока, заменяется учетом его зависимости от скольжения s [28, 29].

Однако таким образом можно учесть действие скин-эффекта только в роторе при переходных процессах скорости. У нас же сравнение результатов моделирования происходит для установившегося режима (квазистатического, говоря строго), когда колебания скорости цикличны и незначительны по величине. В математических моделях АД на основе систем ОДУ отсутствует как таковой сигнал, соответствующий частоте тока или напряжения. В то же время в явном виде присутствуют скорости изменения токов — это первые производные токов по времени $\frac{di_1}{dt}$ и $\frac{di_2'}{dt}$. Предлагается использовать их вместо частот f_1 и f_2 для учета влияния скин-эффекта. Отметим, что замена значений частоты [30] на первую производную индукции по времени используется при расчете составляющих потерь в стали при несинусоидальном напряжении [31, 32, 33]. Справедливости ради, можно получить значение f_1 в модели АД из сигнала задания частоты вращения либо анализируя период задаваемого напряжения фазы, но это дает лишь частоту основной гармоники, поэтому не поможет при учете влияния скин-эффекта при полигармонических токах.

В [34] представлена аппроксимация экспериментально полученных зависимостей индуктивностей

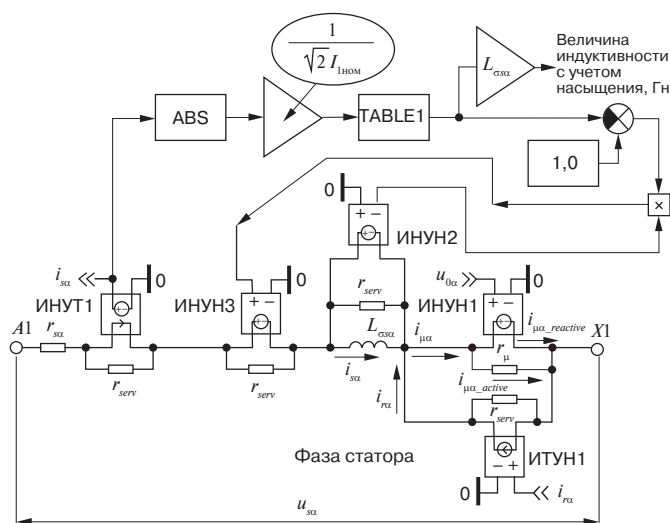


Рис. 4. Графическое изображение уточненной (с учетом насыщения потоком рассеяния статора) компьютерной модели фазы А обмотки статора АД:
 $I_{\text{ном}}$ — номинальное значение действующего тока фазы статора

Fig. 4. Graphic representation of an adjusted (considering stator leakage flux saturation) computer simulation of Phase A of the stator winding of the asynchronous motor:

$I_{\text{ном}}$ — nominal value of stator phase effective current

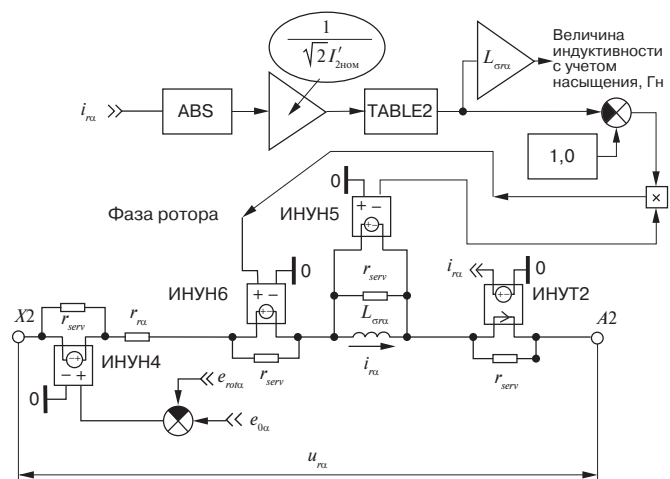


Рис. 5. Графическое изображение уточненной (с учетом насыщения потоком рассеяния ротора) компьютерной модели фазы А обмотки ротора АД:
 $I'_{\text{ном}}$ — номинальное значение действующего тока фазы ротора, приведенного к фазе статора

Fig. 5. Graphic representation of an adjusted (considering rotor leakage flux saturation) computer simulation of Phase A of the rotor winding of the asynchronous motor:

$I'_{\text{ном}}$ — nominal value of the rotor phase effective current reduced to the stator phase

рассеяния от частоты тока в АД номинальной мощностью от 2,2 до 160 кВт выражением $L_{\sigma}(f) = K_L f^{(-0,16)}$, где $K_L = \text{const}$. Например, ввиду влияния скин-эффекта индуктивность рассеяния на частоте 20 кГц будет в 2,6 раза меньше, чем при 50 Гц. Для АД типа

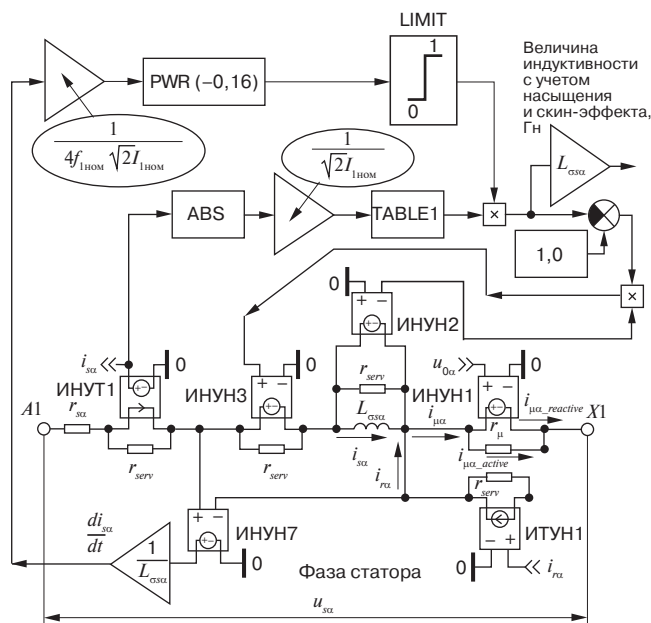


Рис. 6. Графическое изображение уточненной (с учетом насыщения потоком рассеяния статора и влияния скин-эффекта на индуктивность рассеяния) компьютерной модели фазы А обмотки статора АД:
 $f_{1\text{ном}}$ — номинальная частота тока фазы статора

Fig. 6. Graphic representation of an adjusted (considering the saturation of the stator leakage flux and the skin effect on the leakage inductance) computer simulation of Phase A of the stator winding of the asynchronous motor:
 $f_{1\text{ном}}$ — nominal frequency of stator phase current

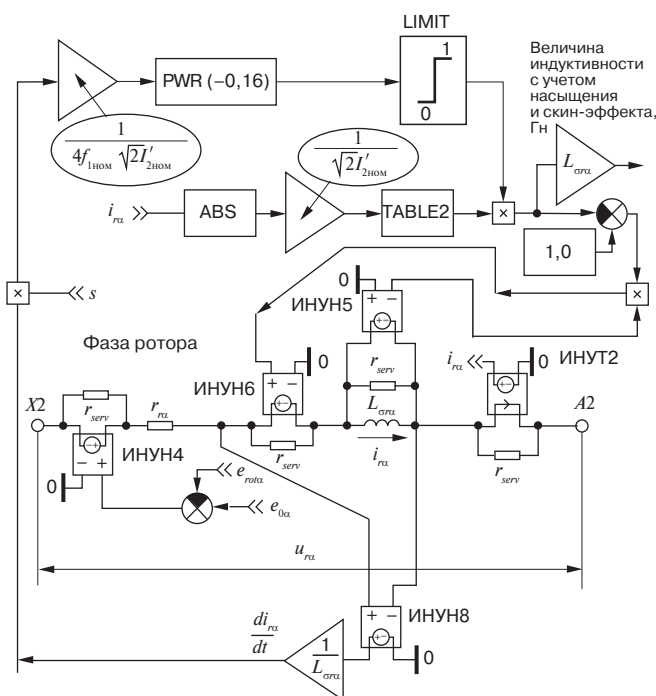


Рис. 7. Графическое изображение уточненной (с учетом насыщения потоком рассеяния ротора и влияния скин-эффекта на индуктивность рассеяния) компьютерной модели фазы А обмотки ротора АД

Fig. 7. Graphic representation of an adjusted (considering the saturation of the rotor leakage flux and the skin effect on the leakage inductance) computer simulation of Phase A of the rotor winding of the asynchronous motor

АЖВ250М2РУХЛ2 все параметры известны для синусоидального тока частотой 50 Гц. Поэтому в качестве базисного значения $\frac{di}{dt}$ можем использовать амплитудное значение тока фазы статора $\sqrt{2} \cdot 197$ А, достигаемое за четверть периода $\frac{1}{4f_{1\text{ном}}} = \frac{1}{4 \cdot 50} = \frac{0,02}{4} = 0,005$ с.

Необходимо учесть особенности физики процессов в роторе: несмотря на то, что в математической модели параметры ротора приведены к статору и в схеме замещения частота тока в роторной цепи такая же, как и в статоре, в реальности частота тока в роторе $f_2 = sf_1$.

Поэтому умножим для фазы ротора $\frac{di'_2}{dt}$ на мгновенное значение скольжения s . Кроме того, ограничим максимальную величину отношения

$$\frac{di}{dt} \frac{1}{4\sqrt{2}I_{\text{ном}}f_{1\text{ном}}} = 1.$$

На рис. 6 и 7 показаны дополненные с учетом влияния скин-эффекта компьютерные модели фазы статора и ротора АД. На рисунках блоки LIMIT ограничивают сигнал на выходе между значениями 0 и 1 включительно. Блоки PWR(-0,16) выполняют возведение абсолютной величины входного сигнала в степень -0,16.

Для смоделированной при учете снижения индуктивностей рассеяния ввиду насыщения от магнитных потоков рассеяния и действия скин-эффекта кривой тока имеем СКО = 9,45 % (таблица, строка 6), что не может удовлетворить, поскольку почти не отличается от СКО варианта, приведенного в строке 2 таблицы.

Теперь для рис. 6 и 7 в уравнениях (1) и (2) соответственно для статора и ротора нужно учитывать $\Delta L_\sigma(i, f)$ — разности мгновенных значений индуктивности рассеяния, указанные без учета влияния насыщения и скин-эффекта и с учетом этих влияний.

Компьютерные модели хороши тем, что в них можно отключать влияние тех или иных физических эффектов, что затруднительно, если вообще возможно, в реальных объектах. Отключим влияние насыщения от потоков рассеяния на индуктивность рассеяния ротора. Результат для этого случая дан в строке 7 таблицы: СКО = 8,18 %, что явно лучше. Принимая во внимание результаты в строках 4 и 8 таблицы, можно сделать вывод о том, что в рассматриваемом режиме работы АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 не проявляется уменьшение индуктивности рассеяния ротора ввиду насыщения стали магнитными потоками рассеяния. Однако в переходных режимах при возникновении больших токов такое насыщение вполне возможно, поэтому вовсе отключать этот эффект в модели нецелесообразно. Изменим зависимость индуктивности рассеяния ротора от тока таким образом, чтобы

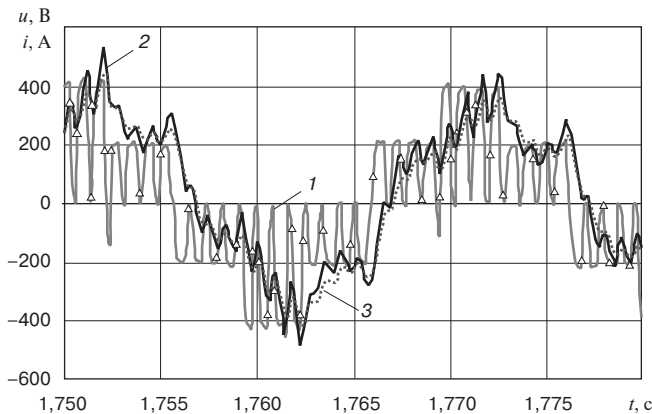


Рис. 8. Иллюстрация характера различия кривых тока фазы АД типа АЖВ250М2РУХЛ2, полученных экспериментально и в результате компьютерного моделирования, при питании от преобразователя частоты при $f_1 = 48,4$ Гц при условии учета насыщения магнитной цепи не только основным потоком, но и потоками рассеяния статора и ротора, а также учета влияния скин-эффекта на индуктивности рассеяния статора и ротора:
1 — напряжение фазы статора, полученное экспериментально (использовано в качестве входного сигнала при компьютерном моделировании);
2 — ток фазы статора, полученный экспериментально;
3 — ток фазы статора, полученный в результате компьютерного моделирования

Fig. 8. Differences in experimental and computer simulated phase current curves of AZhV250M2RUHL2 type asynchronous motor powered by a frequency converter at $f_1 = 48.4$ Hz, considering the magnetic circuit saturation not only with the main flux, but also with stator and rotor leakage fluxes, as well as considering the skin effect on stator and rotor leakage inductance:
1 — experimental stator phase voltage (used as an input in the computer simulation);
2 — experimental stator phase current;
3 — computer simulated stator phase current

насыщение не оказывало своего влияния до тока $1,2\sqrt{2}I_{ном}$. Это соответствует использованию кривой 3 вместо кривой 2 (рис. 2). Результаты моделирования такой конфигурации указаны в строке 9 таблицы и на рис. 8 (СКО = 8,04 %). Попытка усилить влияние скин-эффекта на индуктивности рассеяния за счет применения в модели выражения $L_\sigma(f) = K_L f^{(-0,5)}$ не привела к сближению кривых тока, полученных в результате компьютерного моделирования и эксперимента: СКО = 8,13 % (сравнение строк 5 и 4 в таблице при прочих равных условиях).

На рис. 9 показано влияние насыщения потоком рассеяния и скин-эффекта на относительную величину индуктивности рассеяния фазы статора $\dot{L}_{\sigma 1}$. Без учета влияния имеем $\dot{L}_{\sigma 1} = 1$ о.е. При принятой структуре модели АД влияние тех же факторов

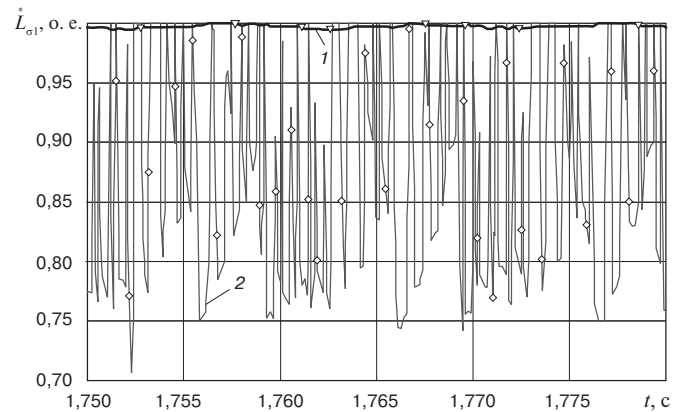


Рис. 9. Влияние на относительную величину $\dot{L}_{\sigma 1}$ насыщения потоком рассеяния статора (1) и скин-эффекта (2) (к результатам моделирования, показанным на рис. 8)

Fig. 9. Influence of stator leakage flux saturation (1) and skin effect (2) on the relative value of $\dot{L}_{\sigma 1}$ (to the simulation results in fig. 8)

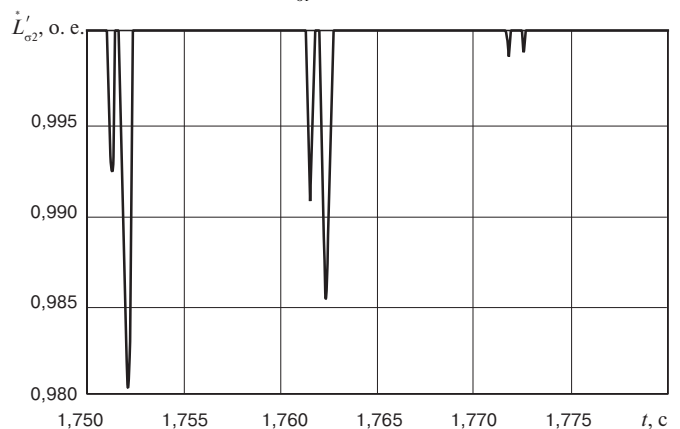


Рис. 10. Влияние на относительную величину $\dot{L}'_{\sigma 2}$ насыщения от магнитного потока рассеяния ротора (к результатам моделирования, показанным на рис. 8)

Fig. 10. Influence on the relative value of $\dot{L}'_{\sigma 2}$ saturation from the rotor magnetic flux leakage (to the simulation results in fig. 8)

на относительную величину индуктивности рассеяния фазы ротора значительно слабее: скин-эффект не проявляется вовсе, а уменьшение индуктивности ввиду насыщения потоком рассеяния ротора незначительно и имеет импульсный характер лишь при отдельных самых высоких пиках тока (см. рис. 10).

Обсуждение. Получен результат — повышение точности расчета мгновенных значений фазных токов АД, питаемого от АИН, что отвечает цели работы. Практическое применение разработанной уточненной компьютерной модели электромагнитных процессов АД, питаемого от АИН, целесообразно, например, при обосновании выбора полупроводниковых ключей АИН. Тем не менее ток, полученный в результате эксперимента, продолжает демонстрировать по сравнению с расчетным током следующее: быстрее нарастает

и спадает при коммутациях фазного напряжения, имеет несколько большую амплитуду. Преодоление этих особенностей может являться целью дальнейшего совершенствования компьютерной модели электромагнитных процессов АД, питаемого от АИН.

Заключение. Разработана уточненная компьютерная модель электромагнитных процессов АД, питаемого от АИН, позволившая повысить точность расчета мгновенных значений фазных токов двигателя. Уточнения компьютерной модели позволяют учитывать влияния на характеристики индуктивности рассеяния скин-эффекта и насыщения магнитной цепи потоками рассеяния. Для установившегося режима работы АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 наиболее значительное влияние на индуктивность рассеяния обмотки статора оказывает скин-эффект.

Введенные в состав предложенной компьютерной модели уточняющие изменения корректны при определении действующих значений основной гармоники токов фаз, а также средних значений частоты вращения и вращающего момента.

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the author expresses his gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the author received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 327 с. [Kopylov I. P. *Mathematical simulation of electrical machines*. 3rd ed., revision and additions. Moscow: Vysshaya Shkola; 2001. 327 p. (In Russ.)].
2. Тяговые электродвигатели электропоездов / В. И. Бочаров [и др.]; под ред. В. Г. Шербакова. Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. 672 с. [Bocharov V. I., Zaharov V. I., Kolomeyev L. F., et al. *Electric tractive motors of electric locomotives*. Novocherkassk: Agentstvo Nautilus; 1998. 672 p. (In Russ.)].
3. Хоменко Б. И., Колпахчан Г. И., Пехотский И. В. Вспомогательные транзисторные преобразователи для перспективного ЭПС // *Электровозостроение*. 2003. Т. 45. С. 184–191 [Khomenko B. I., Kolpakhch'yan G. I., Pekhot'skiy I. V. Auxiliary transistor converters for advanced electric rolling stock. *Elektrovozostroenie*. 2003;45:184–191. (In Russ.)].
4. Патент № 2332777 Российская Федерация, МПК H02M 9/04. Локомотивный преобразователь собственных нужд: № 2007111426/09: заявл. 28.03.2007; опубл. 27.08.2008 / Солтус К. П.,

Синявский И. В., Турулев В. М. 6 с. [Soltus K. P., Sinyavskiy I. V., Turulev V. M. *Patent No. 2332777 Russian Federation, МПК H02M 9/04. Locomotive converter of auxiliaries: No: 2007111426/09: appl. 28.03.2007: publ. 27.08.2008*. 6 p. (In Russ.)].

5. Тишкин А. А., Курганов А. А. Разработка преобразователя частоты для питания асинхронных электродвигателей вспомогательных машин электропоездов переменного тока // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием в рамках IV Всерос. светотехн. форума с междунар. участием, Саранск, 15–16 марта 2017 г. / отв. ред. О. Е. Железникова. Саранск: Афанасьев В. С., 2017. С. 593–597 [Tishkin A. A., Kurganov A. A. Development of a frequency converter for powering asynchronous electric motors of auxiliary machines of AC electric locomotives. In: Zheleznikova O. E., ed. *Problems and prospects for the development of domestic lighting and electrical engineering and energy: Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation in IV All-Russian Lighting Engineering Forum with International Participation, 15–16 March 2017, Saransk*. Saransk: V. S. Afanasev; 2017. p. 593–597 (In Russ.)].

6. Преобразователь для регулируемого вспомогательного электропривода электропоезда переменного тока ЭП200 / И. В. Пехотский [и др.] // *Электровозостроение*. 2002. Т. 44. С. 249–256 [Pekhot'skiy I. V., Kolpakhch'yan G. I., Kurochka A. N., Zhukov M. V. Converter for a variable auxiliary electric drive of an AC electric locomotive EP200. *Elektrovozostroenie*. 2002;44:249–256. (In Russ.)].

7. Пустоветов М. Ю. Моделирование двухконтурной системы подчиненного регулирования координат активного корректора коэффициента мощности вспомогательного электропривода электропоезда // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 125–133 [Pustovetov M. Yu. Simulation of a double-circuit subordinated coordinate regulation system of the active power factor corrector for the electric locomotive auxiliary electric drive. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):125–133. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-125-133>.

8. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 264 с. [Sokolovskiy G. G. *Alternating current electric drives with frequency control*. Moscow: Academy; 2006. 264 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/qmjjaex>.

9. Пустоветов М. Ю., Солтус К. П., Синявский И. В. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. 209 с. [Pustovetov M. Yu., Soltus K. P., Sinyavskiy I. V. *Computer modelling of induction motors and transformers. Examples of interaction with power electronic converters*. Saarbrücken: LAP LAMBERT; 2013. 209 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/rmdddp>.

10. Pustovetov M. Induction Electrical Machine Simulation at Three-Phase Stator Reference Frame: Approach and Results. In: *Applied Electromechanical Devices and Machines for Electric Mobility Solutions*. London: IntechOpen; 2020. p. 63–78. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88906>.

11. Моделирование процессов в асинхронном двигателе с регулируемым выходным напряжением инвертора / И. В. Пехотский [и др.] // *Электровозостроение*. 2002. Т. 44. С. 184–193 [Pekhot'skiy I. V., Pustovetov M. Yu., Kolpakhch'yan P. G., Pustovetova S. Yu. Simulating processes in an asynchronous motor with a variable output voltage of the inverter. *Elektrovozostroenie*. 2002;44:184–193. In Russ.)].

12. Sher H. A., Addoweesh K. E., Khalid Z., Khan Y. Theoretical and experimental analysis of inverter fed induction motor system under DC link capacitor Failure. *Journal of King Saud University — Engineering Sciences*. 2017;29(2):103–111. <http://doi.org/10.1016/j.jksues.2015.06.001>.

13. Sudharshana K. R., Ramachandran A., Muralidharan V., Srinivasan R. Simulation and Experimental Validation of Common Mode Voltage in Induction Motor driven by Inverter using Arduino Microcontroller. In: *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering, WCE 2017, 5–7 July 2017, London, U.K.* [S. I.]; 2017. p. 295–300.

14. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю.А. Бахвалов [и др]; под ред. А.А. Зарифьяна. М.: Маршрут, 2006. 374 с. [Bakhvalov Yu.A., Buzalo G.A., Zarifyan A.A., et al. *Dynamic processes in the asynchronous power actuator of mainline electric locomotives*. Moscow: Marshrut; 2006. 374 p. (In Russ.)]
15. Талья И.И., Таргонский И.Л., Лозановский А.Л. Расчет характеристик асинхронного электродвигателя при несинусоидальном напряжении // Электровозостроение. 1994. Т. 34. С. 66–76 [Tal'ya I. I., Targonskiy I. L., Lozanovskiy A. L. Calculation of the characteristics of an asynchronous electric motor at non-sinusoidal voltage. *Elektrovozostroenie*. 1994;34:66–76. (In Russ.)].
16. Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя при несинусоидальном напряжении / И.И. Талья [и др.] // Электровозостроение. 1995. Т. 35. С. 106–115 [Tal'ya I. I., Morozova O. I., Lozanovskiy A. L., Targonskiy I. L. Electromagnetic moment of an asynchronous electric motor at non-sinusoidal voltage. *Elektrovozostroenie*. 1995;35:106–115. (In Russ.)].
17. Талья И.И., Пустоветов М.Ю. О пульсации электромагнитного момента асинхронного тягового двигателя в пусковом режиме // Известия вузов. Сер. Электромеханика. 1998. №4. С. 34–37 [Tal'ya I. I., Pustovetov M. Yu. Pulsation of the electromagnetic torque of an asynchronous tractive motor in starting mode. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*. 1998;(4):34–37. (In Russ.)].
18. Ламмеранер И., Штафль М. Вихревые токи. М.–Л.: Энергия, 1967. 207 с. [Lammeraner J., Shtafel M. *Whirling current*. Moscow, Leningrad: Energia; 1967. 207 p. (In Russ.)].
19. Кеон Дж. Электронное моделирование в OrCAD / Пер. с англ. В.С. Иванова. М.: ДМК Пресс, 2010. 628 с. [Keown J. *OrCAD PSpice and Circuit Analysis*. Moscow: DMK Press; 2010. 628 p. (In Russ.)].
20. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2. М.: Солон-Р, 2001. 519 с. [Razevig V. D. *OrCAD design system 9.2*. Moscow: Solon-R; 2001. 519 p. (In Russ.)].
21. Goolak S., Tkachenko V., Št'astniak P., Sapronova S., Liubarskiy B. Analysis of Control Methods for the Traction Drive of an Alternating Current Electric Locomotive. *Symmetry*. 2022;14(1):150. <https://doi.org/10.3390/sym14010150>.
22. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2012. 288 с. [Chernykh I. V. *Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow: DMK Press; St. Petersburg: Piter; 2008. 288 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/razcgt>.
23. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин (АВМ): учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1980. 176 с. [Sipaylov G. A., Loos A. V. *Mathematical simulation of electrical machines (ABM): textbook for university students*. Moscow: Vysshaya Shkola; 1980. 176 p. (In Russ.)].
24. Pustovetov M. An Inductive Coil Simulation. *International Journal of Power Systems*. 2021;6:90–93.
25. Пустоветов М. Модификация компьютерной модели 3-фазного асинхронного двигателя для обеспечения учета магнитного насыщения потоками рассеяния // Международная научно-практическая конференция «Наука. Образование. Культура»: 32-я годовщина Комратского гос. ун-та: сб. ст. Комрат, Молдова: A&V Poligraf, 2023. Т. 1. С. 496–499 [Pustovetov M. Modification of a computer model of a 3-phase asynchronous motor to take into account magnetic saturation by leakage fluxes. In: *International Scientific and Practical Conference "Science. Education. Culture": 32nd Anniv. of the Comrat State University: Coll. of articles. Vol. 1*. Comrat, Moldova: A&V Poligraf; 2023. p. 496–499. (In Russ.)].
26. Zirka S. E., Moroz Yu. I., Arturi C. M. Accounting for the Influence of the Tank Walls in the Zero-Sequence Topological Model of a Three-Phase, Three-Limb Transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014;29(5):2172–2179. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2307117>.
27. Wilson P. R., Wilcock R. Frequency Dependent Model of Leakage Inductance for Magnetic Components. *Advanced Electromagnetics*. 2012;1(3):99–106. <https://doi.org/10.7716/aem.v1i3.70>.
28. Maddi Z., Aouzellag D. Dynamic Modelling of Induction Motor Squirrel Cage for Different Shapes of Rotor Deep Bars with Estimation of the Skin Effect. *Progress in Electromagnetics Research*. 2017;59:147–160. <http://doi.org/10.2528/PIERM17060508>.
29. Maksimkina J. The Research of the Processes of the Squirrel-cage Induction Motor's Direct Start-up in the Setting of the Rotor's Variable Parameters. *Power and Electrical Engineering*. 2012;30:53–58.
30. Казаков Ю.Б., Швецов Н.К. Расчетный анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением // Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ). 2015. № 5. С. 42–46 [Kazakov Yu. B., Shvetsov N. K. Calculating analysis of steel losses in induction motors fed by frequency converters with non-sinusoidal output voltage. *Vestnik IGEU*. 2015;(5):42–46. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.5.042-046>.
31. Pfützner H., Shilyashki G., Huber E. Calculated versus measured iron losses and instantaneous magnetization power functions of electrical steel. *Electrical Engineering*. 2022;104:2449–2455. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01474-4>.
32. Rens J., Vandenbossche L., Dorez O. Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses. *World Electric Vehicle Journal*. 2020;11(1):24. <https://doi.org/10.3390/wevj11010024>.
33. Torrent M., Andradá P., Blanqué B., Martínez E., Perat J. I., Sánchez J. A. Method for Estimating Core Losses in Switched Reluctance Motors. *European Transactions on Electrical Power*. 2011;21(1):757–771. <https://doi.org/10.1002/etep.475>.
34. Novotny D. W., Nasar S. A., Jeftenic B., Maly D. Frequency Dependence of Time Harmonic Losses in Induction Machines. In: Novotny D. W., Nasar S. A., eds. *High frequency losses in induction motors. Part II: final report*. Cleveland, OH, USA: NASA Lewis Res. Center; 1991. p. 124–129. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19910015251/downloads/19910015251.pdf> (accessed: 15.04.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Михаил Юрьевич ПУСТОВЕТОВ,

канд. техн. наук, доцент, инженер-конструктор по электрической части, Судостроительно-судоремонтный завод «РИФ» (344019, г. Ростов-на-Дону, ул. 13-я линия, д. 93), Author ID: 416793, <https://orcid.org/0000-0001-7900-4407>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Mikhail Yu. PUSTOVETOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Electrical Design Engineer, RIF Shipyard (344019, Rostov-on-Don, 93, 13th Line St.), Author ID: 416793, <https://orcid.org/0000-0001-7900-4407>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023, рецензия от первого рецензента получена 16.05.2023, рецензия от второго рецензента получена 26.06.2023, принята к публикации 11.08.2023.

The article was submitted 27.04.2023, first review received 16.05.2023, second review received 26.06.2023, accepted for publication 11.08.2023.