ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.001.57

Дмитрий Юрьевич Вихарев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент, Россия, Иваново, e-mail: typhoon145rus@gmail.com

Никита Андреевич Родин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: nikita_iv_96@mail.ru

Модель неявнополюсной электрической машины на основе математического описания магнитного поля в воздушном зазоре

Авторское резюме

Состояние вопроса. При моделировании переходных процессов в электроэнергетических системах возникает вопрос построения достоверных моделей электрических машин. Одной из наиболее сложных задач является построение моделей синхронной и асинхронной машин. Целью работы является построение математических моделей синхронной и асинхронной машин на основе обобщенной модели неявнополюсной машины, учитывающей изменение частоты вращения ротора, геометрические особенности и вид обмоток ротора и статора.

Материалы и методы. Использованы методы математического моделирования электромагнитных полей в воздушном зазоре на основе уравнений Максвелла и методы теории электрических цепей. Математической моделью обобщенной неявнополюсной машины является система нелинейных дифференциальных уравнений. Основным принятым допущением является бесконечная магнитная проницаемость сердечников статора и ротора. Для верификации использованы технические данные реальных электрических машин.

Результаты. Разработаны математические модели неявнополюсной синхронной машины и асинхронной машины с фазным ротором на основе обобщенной модели, которые могут быть использованы для анализа переходных процессов в совокупности, без разделения их на электромагнитные и электромеханические. Новизна моделей состоит в учете несинусоидального распределения магнитного поля в воздушном зазоре, различных видов многофазных обмоток переменного тока и в отказе от допущения неизменности частоты вращения на временном шаге моделирования.

Выводы. Предложенные математические модели могут быть использованы для решения задач проектирования, анализа режимов электроэнергетических систем, функционирования релейной защиты и автоматики объектов электроэнергетики, противоаварийной автоматики. В перспективе математические модели будут дополнены уравнениями, учитывающими влияние демпферных контуров и особенностей выполнения обмоток. Целью дальнейших исследований является создание моделей явнополюсных синхронных машин и асинхронных машин с короткозамкнутым ротором.

[©] Вихарев Д.Ю., Родин Н.А., 2021

Вестник ИГЭУ, 2021, вып. 6, с. 27–37.

Ключевые слова: математическое моделирование, уравнения Максвелла, теория электрических цепей, переходный процесс, неявнополюсная синхронная машина, асинхронный двигатель с фазным ротором

Dmitry Yurievich Vikharev

Ivanovo State Power Engineering University, Student, Russia, Ivanovo, e-mail: typhoon145rus@gmail.com

Nikita Andreevich Rodin

Ivanovo State Power Engineering University, Teaching Assistant of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: nikita_iv_96@mail.ru

Model of implicit pole electric machine based on mathematical formulation of magnetic field in air gap

Abstract

Background. When modeling transient processes in electric power systems, the issue of designing reliable models of electrical machines is of great interest. The most difficult task is to design the models of synchronous and asynchronous machines. The purpose of the project is to develop mathematical models of synchronous and asynchronous machines based on a generalized model of an implicit-pole machine that considers the change of rotor speed, geometric shapes, and the type of rotor and stator windings.

Materials and methods. Methods of mathematical modeling of electromagnetic fields in the air gap based on Maxwell equations and methods of the theory of electrical circuits are applied. A system of nonlinear differential equations is considered as a mathematical model of a generalized implicit-pole machine. The key assumption made is the high magnetic permeability of the stator and rotor cores. Technical data of real electric machines have been used for verification.

Results. Mathematical models of an implicit pole synchronous machine and an asynchronous machine with a phase rotor have been developed. These models can be used to analyze transient processes in the aggregate without dividing them into electromagnetic and electromechanical ones. The novelty of the models is the fact of non-sinusoidal distribution of the magnetic field in the air gap, various types of multiphase AC windings and rejecting the principle of constant rotation frequency at the time step of the simulation.

Conclusions. The proposed mathematical models can be used to solve design problems, to analyze the modes of electric power systems, the operation of relay protection and automation of electric power facilities, and emergency automation. In the future, the equations that consider the influence of the damper circuits and the peculiarities of the windings will be added to the developed mathematical models. The purpose of further research is to develop models of salient-pole synchronous machines and asynchronous machines with a squirrel-cage rotor.

Key words: mathematical model, Maxwell equations, electric circuit theory, transient process, implicit pole synchronous machine, asynchronous motor with phase wound rotor

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.6.027-037

Введение. Для анализа режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) и проектирования электроэнергетических объектов, выбора силового, коммутационного и измерительного оборудования, разработки алгоритмов автоматики управления выключателем и релейной защиты требуется получение в достаточной степени достоверных значений параметров режима (установившиеся нормальные и послеаварийные режимы), а во многих случаях и их временных зависимостей (нормальные и аварийные переходные режимы). В свою очередь, для определения этих параметров требуется создание математической модели ЭЭС. При этом для получения более точного описания процессов в ЭЭС необходимо использование математических моделей первичного оборудования, учитывающих не только электромагнитный, но и электромеханический переходный процесс¹. Наиболее сложными объектами для моделирования являются генераторы и двигатели, так как они имеют подвижные части, что связано с изменени-

¹ Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М., Стандартинформ, 2007.

ями не только электрических, но и механических параметров.

Существующие комплексы моделирования содержат концептуально упрощенные модели неявнополюсных машин (HM), принцип действия которых основан на суждении о неизменности частоты вращения.

Обширный ряд математических моделей синхронных электрических машин базируется на представлениях, описанных системой уравнений Парка-Горева [1-3]. При этом основным упрошением является использование таких понятий, как синхронное, переходное и сверхпереходное сопротивления электрической машины, суть которых заключается в рассмотрении переходного процесса как совокупности установившихся режимов. Такая модель синхронной машины (СМ) предполагает неизменность частоты вращения ротора во временном шаге моделирования в силу предполагаемой инерционности электромеханических параметров агрегата, а также синусоидальное распределение вектора магнитной индукции в воздушном зазоре. Изменение угла поворота ротора фиксируется с помощью угловой характеристики генератора, что позволяет вычислить угловую скорость в следующем условном установившемся режиме. Такое исследование переходных процессов лишает электрические и механические параметры явной зависимости от угловой скорости и ее изменения во времени.

Усложненная модель СМ, также построенная на основе уравнений Парка– Горева, используется в программе PSCAD. Для использования модели СМ в этом программном комплексе требуется большое количество данных не только о самом агрегате, но и о системе возбуждения, турбине и ее регуляторах, вале ротора. Получение такого количества данных достаточно затруднительно, а без них невозможно построение модели в программном комплексе PSCAD.

Модели асинхронных машин в большинстве случаев также основываются на суждениях о неизменности частоты вращения ротора [4, 5] или же не способны описывать работу двигателя в любых режимах работы ЭЭС [6, 7].

С учетом изложенного является актуальной задача создания обобщающей математической модели HM на основе геометрических особенностей и вида обмоток, что позволит учесть несинусоидальное распределение магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины и избавиться от суждения о неизменности частоты вращения ротора. Решение данной задачи позволит провести более точный анализ нормальных установившихся, нормальных переходных, аварийных и послеаварийных установившихся режимов работы электрической сети [8].

Материалы и методы. Электрическая схема замещения неявнополюсной вращающейся машины. Основу электрической схемы замещения представляет собой совокупность электродвижущих сил, созданных вращающимся магнитным полем и действующих в каждой фазе НМ. Основным допущением, позволяющим вывести аналитические выражения для векторов, описывающих магнитное поле в воздушном зазоре, является то, что материал металлических сердечников имеет бесконечно большую по своему значению магнитную проницаемость во всех режимах работы электрической машины. Это позволяет использовать метод суперпозиции магнитных полей в воздушном зазоре, с помощью которого можно представить итоговое вращающееся магнитное поле как сумму магнитных полей, созданных каждой из обмоток НМ.

Для анализа магнитного поля необходимо представить воздушный зазор в развернутом, линейном виде. Чтобы описать магнитное поле, созданное одной обмоткой двухполюсной машины, необходимо определить выражение для вектора магнитной напряженности. На рис. 1 условно показана обмотка переменного тока, которая уложена в пазы статора.



Рис. 1. Расположение фазы обмотки в воздушном зазоре в линейном представлении: τ – величина полюсного деления; H – вектор магнитной напряженности; l(t) – зависимость тока, протекающего в обмотке, от времени; δ – величина воздушного зазора; x – расстояние от центра витка обмотки

Поскольку магнитная проницаемость стали бесконечно велика, магнитные напряженности в сталях статора и ротора равны нулю и в каждой точке на поверхности статора и ротора значения скалярных магнитных потенциалов имеют одинаковые значения, поэтому вектор магнитной напряженности будет перпендикулярен к поверхности статора или ротора в каждой точке [9].

С использованием закона полного тока и контура интегрирования (отмечен пунктирной линией на рис. 1) получено выражение для модуля вектора магнитной индукции, находящегося в каждой точке контура интегрирования:

$$B(t) = \mu_0 \frac{I(t) w_{\rm n}}{2\delta}, \qquad (1)$$

где *B*(*t*) – зависимость величины вектора магнитной индукции от времени; *w*_п – количество витков в обмотке; µ₀ – магнитная постоянная в системе СИ.

Для получения выражения проекции вектора магнитной индукции в воздушном зазоре НМ необходимо разложить (1) в тригонометрический ряд Фурье [10]:

$$B_{z}(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} k_{B} I(t) \cos\left(\frac{\pi n}{\tau} x - p n \varphi(t)\right); \quad (2)$$

$$k_{B} = \frac{2\mu_{0}w_{n}}{\pi n\delta}\sin\left(\frac{\pi n}{2}\right),$$
(3)

где p – количество пар полюсов; x – расстояние от точки отсчета; $\varphi(t)$ – угол сдвига обмотки относительно принятой точки отсчета.

Разложение выражения для проекции результирующего вектора магнитной индукции в ряд Фурье дает возможность простого учета любого числа пар полюсов, так как каждая гармоника индукции имеет период, пропорциональный двум полюсным делениям. Это позволяет создать модель многополюсной машины на основе двухполюсной.

Общий случай для трехфазной HM представлен на рис. 2.

Выражение для проекции итогового вектора магнитной индукции имеет вид

$$B_{\Sigma z}(x, t) = \sum_{m} \sum_{n=0}^{\infty} k_{Bm} I_m(t) \cos(\Psi(x, t)), \qquad (4)$$

где
$$\Psi(\mathbf{x},t) = \frac{\pi n}{\tau} \mathbf{x} - n \varphi_m(t)$$
. (5)

Индекс *т* в выражениях (4) и (5) соответствует фазам А, В и С каждой обмотки. В табл. 1 приведены значения и выражения для определения углов ϕ_m для различных обмоток HM.



Рис. 2. Схема расположения фаз трехфазных обмоток статора и ротора в воздушном зазоре в линейном представлении

Таблица 1. Значения и выражения для определения углов ϕ_m для обмоток статора и ротора неявнополюсной машины

Обмотка		φ _m
Статор	Фаза А	0
	Фаза В	$\frac{2\pi}{3}$
	Фаза С	$-\frac{2\pi}{3}$
Ротор	Фаза А	$p_{\Phi_p}(t)$
	Фаза В	$p_{\varphi_{\rho}}(t) + \frac{2\pi}{3}$
	Фаза С	$p_{\Phi_{\rho}}(t) - \frac{2\pi}{3}$

Примечание. φ_{*p*}(*t*) – угол поворота ротора относительно центра обмотки фазы A статора.

Для вычисления электродвижущих сил по закону Фарадея необходимо определить выражения для магнитных потоков через все обмотки статора и ротора. Магнитные потоки Ф(*t*) определяются следующим выражением:

$$\Phi(t) = \rho I_{M} \int_{\varphi_{m}(t)\frac{\tau}{\pi} - \frac{\tau}{2}}^{\varphi_{m}(t)\frac{\tau}{\pi} + \frac{\tau}{2}} B_{\Sigma z}(x, t) dx, \qquad (6)$$

где *I*_M – активная длина стали статора.

Вычисляя интеграл в выражении (6) в общем виде, можно получить следующее выражение для магнитного потока соответствующей фазы $\Phi_{ph}(t)$:

$$\Phi_{\rho h}(t) = \sum_{m} \sum_{n=0}^{\infty} k_{\phi \rho h} I_{m}(t) \cos(n \Psi_{\phi \rho h}(t)).$$
(7)

Выражения для функций углов $\Psi_{\Phi ph}$ представлены в табл. 2.

Таблица 2. Функции углов $\Psi_{\Phi ph}$ для обмоток статора и ротора неявнополюсной машины

Обмотка		$\Psi_{\Phi ph}$	
Статор	Фаза А	$\frac{\pi}{2} + \varphi_m(t)$	
	Фаза В	$\frac{\pi}{6}-\varphi_m(t)$	
	Фаза С	$-\frac{\pi}{6}-\varphi_m(t)$	
Ротор	Фаза А	$\frac{\pi}{2} + \varphi_m(t) - p\varphi_p(t)$	
	Фаза В	$\frac{\pi}{6} - \varphi_m(t) + p \varphi_p(t)$	
	Фаза С	$-\frac{\pi}{6}-\varphi_m(t)+p\varphi_p(t)$	

Выражения для определения коэффициентов *k*_{Фр}, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Выражения для определения коэффициентов *k*_{Фрh} для обмоток статора и ротора неявнополюсной машины

Обмотка		$k_{\Phi ph}$	
Статор	Фаза А	$\frac{4\mu_0 w_c w_m l_m \tau p}{\pi^2 n^2 \delta} \sin^2 \left(\frac{\pi n}{2}\right)$	
	Фаза В	$\frac{4\mu_0 w_c w_m l_M \tau p}{\pi^2 n^2 \delta} \sin\left(-\frac{\pi n}{2}\right)$	
	Фаза С	$\frac{4\mu_0 w_c w_m l_M \tau p}{\pi^2 n^2 \delta} \sin\!\left(\frac{\pi n}{2}\right)$	
Ротор	Фаза А	$\frac{4\mu_0 w_p w_m l_M \tau p}{\pi^2 n^2 \delta} \sin^2 \left(\frac{\pi n}{2}\right)$	
	Фаза В	$\frac{4\mu_0 w_p w_m l_M \tau p}{\pi^2 n^2 \delta} \sin\left(-\frac{\pi n}{2}\right)$	
	Фаза С	$\frac{4\mu_0 w_p w_m l_m \tau p}{\pi^2 n^2 \delta} \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right)$	

Примечание. *w*_c, *w*_p – количество витков в обмотках статора и ротора соответственно.

Выражения для магнитных потоков позволяют найти электродвижущие силы соответствующих фаз $E_{ph}(t)$, действующие в определенной обмотке, с помощью закона Фарадея:

$$E_{ph}(t) = -\sum_{m} \sum_{n=0}^{\infty} k_{\Phi ph} \frac{dI_m}{dt} \cos(n\Psi_{ph}(t)) + \sum_{m} \sum_{n=0}^{\infty} nk_{\Phi ph} \frac{d\Psi_{ph}}{dt} I_m(t) \sin(n\Psi_{ph}(t)).$$
(8)

Электромагнитный момент неявнополюсной электрической машины. Электромагнитный момент, действующий на вал ротора HM, определяется законом Ампера. То есть электромагнитный момент создается только силами, которые являются результатом взаимодействия вращающегося магнитного поля и токов, протекающих по проводникам обмоток, расположенных на поверхности ротора. Для нахождения сил, действующих на проводники, необходимо определить значения проекций вектора магнитной индукции на вертикальную ось (в линейном представлении воздушного зазора электрической машины) в точках расположения проводников с током. Результирующая сила является векторной суммой сил Ампера, каждая из которых создана током, протекающим в фазе обмотки, и магнитным полем в воздушном зазоре [10]. Выражение для результирующей силы *F*_{ЭМ}(*t*) имеет вид

$$F_{\Im M}(t) = 2\rho I_{M} \sum_{m=\rho} w_{m} I_{m} B_{\Sigma z} \left(\varphi_{m} \frac{\tau}{\pi} - \frac{\tau}{2}, t \right).$$
(9)

Электромагнитный момент $M_{\Im M}(t)$ определяется следующим выражением [10]:

$$M_{\rm \Im M}(t) = \frac{D_m}{2} F_{\rm \Im M}(t), \qquad (10)$$

где *D*_{*m*} – диаметр ротора.

Результаты. Модель неявнополюсной синхронной машины и ее верификация. Модель неявнополюсной синхронной машины (НСМ) является частным случаем рассмотренной модели при том условии, что в систему уравнений не будет входить учет фаз В и С ротора.

Для верификации модели проведено численное моделирование процесса точной синхронизации синхронного генератора ТВФ-63-2УЗ с последующим переводом машины в номинальный режим работы. Этапами данного вычисленного эксперимента являются:

1) точная синхронизация с сетью;

2) плавное увеличение тока возбуждения до номинального значения;

3) линейное увеличение момента первичного двигателя до номинального значения после затухания электромагнитного переходного процесса.

На рис. З представлены зависимости силы тока в фазе А, циклической частоты вращения ротора, тока возбуждения, взаимного угла между ЭДС генератора и напряжением сети от времени для рассматриваемого процесса.



Рис. 3. Временные зависимости силы тока в фазе A, циклической частоты вращения ротора, тока возбуждения, взаимного угла между ЭДС генератора и напряжением сети при проведении точной синхронизации генератора ТВФ-63-2УЗ с последующим его переводом в номинальный режим работы

Амплитуда номинального тока статора синхронного генератора ТВФ-63-2УЗ равна 6170 А [11]. Амплитудное значение тока статора, протекающего в номинальном режиме, полученное по результатам моделирования, равно 6124 А.

В табл. 4 представлены значения электромагнитной мощности для различных значений взаимного угла δ между ЭДС синхронного генератора ТВФ-63-2УЗ и системы, полученные в результате численного моделирования и по теоретической зависимости, а также их относительные погрешности. Для верификации использовались выражения, описывающие угловую характеристику НСМ [12].

Данный вычислительный эксперимент произведен для ряда синхронных генераторов российского производства, таких как Т-6-2УЗ, ТАП-12-2/6,3 УЗ, Т-12-2УЗ, ТВС-32УЗ, ТВФ-63-2УЗ, ТВФ-120-2УЗ, ТВФ-110-2ЕУЗ, ТВВ-160-2ЕУЗ, ТГВ-200-2УЗ, ТВВ-220-2ЕУЗ, ТГВ-300-2УЗ, ТВВ-320-2ЕУЗ, ТВВ-500-2УЗ, ТГВ-500-4УЗ, ТВВ-320-2ЕУЗ, ТГВ-800-2УЗ, ТВВ-1000-2УЗ, ТВВ-1200-2УЗ, а также для турбогенераторов зарубежных фирм-производителей QF-150-2 и 390H. Таблица 4. Сравнение угловых характеристик генератора ТВФ-63-2УЗ, полученных в результате моделирования и в результате расчета

	Взаимный у	Относи	
Мощ- ность, МВт	разрабо- танная модель	теорети- ческая зависи- мость [12]	относи- тельная погреш- ность, %
31,5	15,66	15,83	1,07
63	32,75	33,00	0,756
94,5	54,26	54,70	0,804
107,1	66,78	67,64	1,27
115,4	84,72	85,05	0,388

Для всех рассматриваемых генераторов амплитуда тока статора в номинальном

режиме работы HCM отличалась от расчетного номинального тока не более чем на 4 %, а взаимный угол между генератором и системой – не более чем на 2 %. Следовательно, модель корректно отражает функционирование генератора в установившихся режимах работы.

Для демонстрации функционирования модели в переходных режимах было проведено численное моделирование трехфазного короткого замыкания на выводах генератора ТВФ-63-2УЗ при его параллельной работе с сетью. Полученные временные зависимости на разработанной модели и в результате расчета в программном комплексе МАТLAB представлены на рис. 4 и 5 соответственно.



Рис. 4. Временные зависимости силы тока в фазе A и циклической частоты вращения ротора от времени при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора ТВФ-63-2УЗ при его параллельной работе с сетью для разработанной модели



Рис. 5. Временные зависимости силы тока в фазе A и циклической частоты вращения ротора от времени при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора ТВФ-63-2УЗ при его параллельной работе с сетью для модели в программном комплексе MATLAB

Анализ временных диаграмм показывает, что зависимости тока фазы А статора и частоты вращения ротора для разработанной модели и в программном комплексе МАТLAB при прочих равных условиях идентичны, а амплитуды тока различаются не более чем на 10 %. Это говорит о возможности использования разработанной модели для анализа переходных режимов синхронной машины.

Модель асинхронного двигателя с фазным ротором и ее верификация. Модель многополюсного асинхронного двигателя совпадает с общей моделью НМ. Результаты моделирования прямого пуска асинхронного двигателя АКНЗ-4-16-57-6УЗ представлены на рис. 6. При этом номинальный ток двигателя и номинальное скольжение равны 318 А и 1,2 % соответственно [11]. В результате моделирования ток и скольжение, соответствующие номинальному режиму, равны 307 А и 1,16 %.

В целях верификации модели была снята механическая характеристика двигателя 4АНК160S4У3, представлена зависимость частоты вращения ротора двигателя от максимального нагрузочного момента α. Получить зависимость механического момента от скольжения в полном ее виде не представляется возможным, так как у характеристики есть участки неустойчивой работы, которых трудно достичь в установившемся режиме работы двигателя. Для определения погрешности моделирования рассчитана теоретическая зависимость частоты вращения от момента, которая определена по выражениям, представленным в [13]. Принято, что нагрузочный момент изменяется по следующему закону:

$$M_{H}(s) = \alpha \cdot \tanh\left(\beta \cdot 100\pi \frac{1-s}{p}\right), \qquad (11)$$

где α – максимальный нагрузочный момент; β – коэффициент, определяющий пологость характеристики нагрузочного момента; *s* – скольжение; *p* – число пар полюсов электрической машины.

Результаты снятия механической характеристики двигателя 4АНК160S4У3 и сравнение их с теоретической зависимостью представлены в табл. 5.

Данный вычислительный эксперимент произведен для 30 асинхронных двигателей с фазным ротором производства ООО «Электрофизика» и «НПП Харьковский электромеханический завод». Для всех рассматриваемых двигателей амплитуда тока статора в номинальном режиме работы отличалась от расчетного номинального тока не более чем на 5 %, а скольжение – не более чем на 3,5 %. Следовательно, модель корректно отражает функционирование асинхронного двигателя с фазным ротором в установившихся режимах работы.



Рис. 6. Временные зависимости силы тока фазы A статора, ротора и частоты вращения ротора двигателя AKH3-4-16-57-6УЗ при номинальном нагрузочном моменте

Таблица 5. Сравнение зависимостей частоты вращения ротора двигателя 4АНК160S4У3 от максимального нагрузочного момента, полученных в результате моделирования и расчета

Макси-	Частота вращения ро-		
	тора двигателя, Гц		Относи-
нагрузоч-	разрабо-	теоретиче- ская зави-	тельная погреш-
ный мо-	танная	СИМОСТЬ	ность. %
мент	модель	[12]	
800	12,02	11,99	0,25
1000	11,84	11,8	0,34
1200	11,61	11,54	0,61
1400	11,29	11,18	0,98
1600	1,45	1,43	1,4
1800	1,19	1,17	1,7
2000	1,017	1,002	1,5

Важно подчеркнуть, что при определенном максимальном моменте ротор начинает вращаться с предельно низкой частотой. Это связано с видом нагрузочного момента – рабочая точка двигателя находится на устойчивом участке, когда при увеличении скорости вращения тормозной момент начинает резко увеличиваться. Функция гиперболического тангенса выбрана с той целью, чтобы нагрузочный момент равнялся нулю при скольжении, равном единице.

В дополнение произведено численное моделирование функционирования

модели при близком внешнем коротком замыкании с последующим его устранением. В данном опыте двигатель после устранения короткого замыкания переходит в режим самозапуска с последующим возвратом к нормальному режиму работы. Полученные в результате расчета в программном комплексе MATLAB временные зависимости представлены на рис. 7, 8 соответственно.

Анализ временных диаграмм показывает, что зависимости тока фазы А статора и частоты вращения ротора для разработанной модели и в программном комплексе MATLAB при прочих равных условиях почти полностью повторяют друг друга, что говорит о возможности использования разработанной модели для анализа переходных режимов в рассматриваемом агрегате.

Выводы. Предложенная математическая модель позволяет анализировать поведение неявнополюсной вращающейся электрической машины при любых возмущениях в ЭЭС.

Верификация модели на различных реальных электрических машинах показала высокую точность моделирования. В результате моделирования были получены модели неявнополюсной синхронной машины и асинхронного двигателя с фазным ротором.



Рис. 7. Временные зависимости силы тока фазы A статора, ротора и частоты вращения ротора асинхронного двигателя 4АНК160S4У3 при возникновении близкого внешнего короткого замыкания с последующим его устранением для разработанной модели



Рис. 8. Временные зависимости силы тока фазы A статора, ротора и частоты вращения ротора асинхронного двигателя 4АНК160S4УЗ при возникновении близкого внешнего короткого замыкания с последующим его устранением для модели в программном комплексе MATLAB

Необходимо отметить, что планируется усовершенствовать модели учетом демпферных контуров и особенностей выполнения обмоток переменного тока: типа обмотки, геометрических размеров паза.

Следующим шагом развития моделей должно стать построение математических моделей явнополюсной синхронной машины и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Список литературы

1. **Моделирование** неявнополюсного синхронного генератора в МАТLAB / М.М. Файзиев, Н.А. Курбанов, А.Б. Имомназаров и др. // Вестник науки и образования. – 2017. – Т. 1, № 5(29). – С. 10–14.

2. Горшков К.Е., Гольдштейн М.Е. Математическая модель синхронного генератора с системой самовозбуждения в режиме форсировки при несимметричных коротких замыканиях в энергосистеме // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Энергетика. – 2009. – № 34(167). – С. 4–11.

3. Зарудная А.П., Горшков К.Е. Особенности применения пакета MATLAB/Simulink для анализа статической устойчивости синхронных генераторов в энергосистеме // Вестник Южно-

Уральского государственного университета. Сер.: Энергетика. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 43–54. DOI 10.14529/power170305.

4. Визгина Е.И. Математическая модель высоковольтного асинхронного двигателя большой мощности // Вестник Чувашского университета. – 2011. – № 3. – С. 44–52.

5. **Донской Н.В.** Трехфазная математическая модель асинхронного двигателя // Электротехника. – 2011. – № 1. – С. 40–46.

6. Колоколов Ю.В., Мелихов А.Ю., Цуканов В.Г. Математическая модель асинхронного двигателя при несимметричном подключении к сети // Известия Орловского государственного технического университета. Сер.: Информационные системы и технологии. – 2006. – № 1–2. – С. 71–76.

7. Однокопылов Г.И., Брагин А.Д. Математическая модель асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 133–137.

8. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

9. Говорков В.А., Купалян С.Д. Теория электромагнитного поля в упражнениях и задачах. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1970. – 302 с.

10. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и «Электроэнергетика». – М., 2008. – 349 с.

11. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

12. **Страдомский Ю.И.** Характеристики синхронных электрических машин. – Иваново, 2019. – 128 с.

13. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломиров. специалистов «Электроника, электромеханика и электротехнологии»: в 2 т. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.

References

1. Fayziev, M.M, Kurbanov, N.A., Imomnazarov, A.B. Modelirovanie neyavnopolyusnogo sinkhronnogo generatora v MATLAB [Modeling an implicit-pole synchronous generator in MATLAB]. *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2017, vol. 1, no. 5(29), pp. 10–14.

2. Gorshkov, K.E., Gol'dshteyn, M.E. Matematicheskaya model' sinkhronnogo generatora s sistemoy samovozbuzhdeniya v rezhime forsirovki pri nesimmetrichnykh korotkikh zamykaniyakh v energosisteme [Mathematical model of a synchronous generator with a self-excitation system in the forcing mode with asymmetric short circuits in the power system]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika, 2009, no. 34(167), pp. 4–11.

3. Zarudnaya, A.P, Gorshkov, K.E. Osobennosti primeneniya paketa MATLAB/Simulink dlya analiza staticheskoy ustoychivosti sinkhronnykh generatorov v energosisteme [Features of using the MATLAB / Simulink package for analyzing the static stability of synchronous generators in the power system]. Vestnik Yuzhno- Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika, 2017, vol. 17, no. 3. pp. 43–54. DOI: 10.14529/power170305.

4. Vizgina, E.I. Matematicheskaya model' vysokovol'tnogo asinkhronnogo dvigatelya bol'shoy moshchnosti [Mathematical model of a high-voltage induction motor of high power]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2011, no. 3, pp. 44–52.

5. Donskoy, N.V. Trekhfaznaya matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya [Threephase mathematical model of an asynchronous motor]. *Elektrotekhnika*, 2011, no. 1, pp. 40–46.

6. Kolokolov, Yu.V., Melikhov, A.Yu., Tsukanov, V.G. Matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya pri nesimmetrichnom podklyuchenii k seti [Mathematical model of an induction motor with asymmetric connection to the network]. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, seriya: Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, 2006, no. 1–2, pp. 71–76.

7. Odnokopylov, G.I., Bragin, A.D. Matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya v nepolnofaznom rezhime raboty [Mathematical model of an asynchronous motor in partial-phase operation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 133–137.

8. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient electro-mechanical processes in electrical systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 536 p.

9. Govorkov, V.A., Kupalyan, S.D. *Teoriya elektromagnitnogo polya v uprazhneniyakh i za-dachakh* [The theory of the electromagnetic field in exercises and tasks]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970. 302 p.

10. Vol'dek, A.I., Popov, V.V. *Elektricheskie* mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electric machines. AC machines]. Moscow: Piter, 2008. 349 p.

11. Neklepaev, B.N., Kryuchkov, I.P. Elektricheskaya chast' stantsiy i podstantsiy: Spravochnye materialy dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya [Electrical part of stations and substations: Reference materials for course and diploma design]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 608 p.

12. Stradomskiy, Yu.I. *Kharakteristiki sinkhronnykh elektricheskikh mashin* [Characteristics of synchronous electrical machines]. Ivanovo, 2019. 128 p.

13. Ivanov-Smolenskiy, A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow: MEI, 2004.