

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-858-865
УДК 621.313

Карта намагничивания вентильно-индукторного электродвигателя: экспериментальный подход

Андрей Михайлович Яременко¹✉, Галина Львовна Демидова²,
Алла Алексеевна Сорокина³, Александр Геннадьевич Маматов⁴,
Андрей Николаевич Богданов⁵, Алексей Сергеевич Анучин⁶

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{5,6} Московский энергетический институт, Москва, 111250, Российская Федерация

¹ amyaremenko@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0007-7220-3957>

² demidova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2786-715X>

³ 265957@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7466-4673>

⁴ amamатов@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1887-3059>

⁵ anbogdanov@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3858-5859>

⁶ anuchin.alecksey@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1019-756X>

Аннотация

Введение. В настоящее время вентильно-индукторная электрическая машина рассматривается как наиболее перспективный вид электромеханического преобразователя энергии без постоянных магнитов для работы со скоростями ниже номинальных значений. Для управления вентильно-индукторным электродвигателем с минимальными пульсациями момента необходимо формировать токи фаз в соответствии с угловым положением ротора в функции потокоцепления фазы от тока и положения ротора. Карты намагничивания также используются в системах управления с косвенным определением положения ротора. **Метод.** В работе представлена экспериментальная методика получения карты намагничивания вентильно-индукторного электродвигателя. Приведен расчет потокоцепления для каждого угла положения ротора электрической машины. Предложенное решение предусматривает механическую блокировку ротора вентильно-индукторного двигателя и периодическую подачу напряжения при помощи полупроводникового преобразователя на одну из фаз электродвигателя для получения информации о фазном токе и напряжении. **Основные результаты.** С использованием представленного экспериментального подхода получены соотношения между потокоцеплением, током фазы и углом поворота ротора. Показано, что данное решение может быть использовано для точного определения карты намагничивания вентильно-индукторного двигателя. **Обсуждение.** Представленную методику целесообразно использовать при проектировании системы управления с прогнозированием.

Ключевые слова

вентильно-индукторный двигатель, карта намагничивания, потокоцепление, идентификация, электрическая машина

Ссылка для цитирования: Яременко А.М., Демидова Г.Л., Сорокина А.А., Маматов А.Г., Богданов А.Н., Анучин А.С. Карта намагничивания вентильно-индукторного электродвигателя: экспериментальный подход // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 5. С. 858–865. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-858-865

Switched reluctance motor flux linkage characteristic: experimental approach

Andrey M. Yaremenko¹✉, Galina L. Demidova², Alla A. Sorokina³,
Aleksandr G. Mamatov⁴, Andrey N. Bogdanov⁵, Alecksey S. Anuchin⁶

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^{5,6} Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russian Federation

¹ amyaremenko@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0009-0007-7220-3957>

² demidova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2786-715X>

³ 265957@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7466-4673>

⁴ amamatov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1887-3059>

⁵ anbogdanov@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3858-5859>

⁶ anuchin.alecksey@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1019-756X>

Abstract

Currently, switched reluctance motors are considered the most promising type of electromechanical energy converter without permanent magnets, especially for operations at sub-nominal speeds. To control of a switched reluctance motor to minimize torque ripple requires the regulation of phase currents based on the rotor angular position, utilizing the flux linkage as a function of both current and rotor angle. The flux linkage characteristic is essential in control systems that indirectly determine the rotor position. The paper presents an experimental methodology for deriving the flux linkage characteristic of a switched reluctance motor. The calculation of flux linkage for each rotor position angle of the electric machine is provided. The proposed methodology involves mechanically locking the rotor and periodically applying voltage to one of the motor phases using a power converter to gather data on phase current and voltage. Using the proposed experimental methodology, the relationships between flux linkage, phase current, and rotor angle were obtained. The results demonstrate that this methodology can be effectively utilized to accurately determine the flux linkage characteristic of a switched reluctance motor. The experimental methodology proposed in this paper can be employed to generate the flux linkage characteristic of a switched reluctance motor. This approach is particularly advantageous for designing model predictive control systems.

Keywords

switched reluctance motor, flux linkage characteristic, identification, flux model, electric motor

For citation: Yaremenko A.M., Demidova G.L., Sorokina A.A., Mamatov A.G., Bogdanov A.N., Anuchin A.S. Switched reluctance motor flux linkage characteristic: experimental approach. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 5, pp. 858–865 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-858-865

Введение

Одной из основных проблем вентильно-индукторных двигателей (ВИД) является возникновение пульсаций момента [1]. Для уменьшения пульсаций момента применяют методики: управление с прогнозирующей моделью с непрерывным управляющим воздействием [2, 3]; с конечным набором управляющих воздействий [4–6], где управление основывается на использовании данных из предварительно рассчитанных поисковых таблиц (Look-up Table) [7]. Упомянутые методики используют карту намагничивания как функцию углового положения ротора, тока и потокосцепления.

Для идентификации карты намагничивания используются двумя методами, разделенными по принципу работы: онлайн- и оффлайн-методики.

Оффлайн-методики [8–10] позволяют получить карту намагничивания ВИД с помощью специальной испытательной оснастки, при этом характеристика строится на полном обороте ротора во всем диапазоне изменения тока. Среди оффлайн-методик используются: прямой способ измерения потокосцепления якоря посредством электродвижущей силы самоиндукции дополнительной катушки индуктивности [10]; методика построения карты намагничивания с искусственно заторможенным ротором ВИД [8] и методика расчета карты по известной моментной характеристике двигателя [9].

При онлайн-методике [11] параметры карты намагничивания двигателя определяются во время

обычного режима работы ВИД, при этом полученные данные соответствуют мгновенным значениям токов фаз и положения ротора, при котором происходило измерение.

Обзор методик

Подход, описанный в работе [10], основан на измерении изменения магнитного потока в проверяемой катушке при изменении тока от одного значения к другому. Однако данное решение применяется для машин большой мощности и требует сложной, крупногабаритной оснастки, что ограничивает ее применение. Работа методики, описанная в [8], основывается на блокировке положения ротора в любом желаемом положении с последующей подачей напряжения на обмотку и измерение параметров. Преимущество данной методики заключается в отсутствии необходимости управления ВИД во время измерений. К недостаткам относится наличие дополнительного оборудования для блокировки ротора и постоянная переналадка для каждого положения. В работе [9] представлен способ косвенного измерения через известную моментную характеристику. В отличие от других подходов, данный способ не требует сложной оснастки и базируется на измерении момента двигателя с помощью динамометра. Измерения производятся в нескольких угловых положениях от рассогласованного к согласованному, а поскольку картина распределения момента симметрич-

на относительно центральной оси полюса статора, то полученные измерения составят половину поверхности распределения.

В онлайн-методиках [11] параметры карты намагничивания двигателя определяются во время обычного режима работы ВИД, при этом полученные данные соответствуют мгновенным значениям токов фаз и положения ротора, при котором происходило измерение. Онлайн-идентификация параметров ВИД ограничивается рабочей областью и не дает возможности получить полную карту намагничивания [12].

Известна онлайн-методика построения карты намагничивания ВИД [13], включающая в себя оценку сопротивления обмотки, основанная на использовании виртуального измерительного прибора на базе цифрового сигнального процессора (например, dSPACE DS1003/DS1004 Alphacombo с платой DS2201 Multi-I/O, 20 12-битных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), 8 12-битных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), осуществляющего расчет потокосцепления по измеренным данным тока с шагом 0,01 А и угла поворота ротора. Недостатком данного решения является использование сложного и дорогостоящего оборудования для обработки данных. В работе [14] приведен способ вычисления потокосцепления по данным измерений фазового тока и напряжения с учетом максимального тока двигателя, а в [15] — метод нечеткой логики для построения карты намагничивания на основе измеренных токов и напряжений фаз в зависимости от контрольных точек угла поворота ротора. К недостаткам метода [15] относится зависимость от правильного выбора правил использования нечеткой логики и высокие требования к знаниям и опыту для настройки системы.

Идентификация карты намагничивания ВИД критически важна как для проектирования системы управле-

ния, так и для оценки потерь в силовых ключах [16] при работе ВИД, в частности, в системах электротранспорта [17], где ВИД работает в области поддержания постоянного момента или постоянной мощности. Нагрев ВИД в процессе работы приводит к изменению [18] кривой намагничивания, что также необходимо учитывать при проектировании системы управления, что нереализуемо при отсутствии идентифицированной первоначальной кривой. При проектировании систем с косвенным определением положения ротора — бездатчиковых систем [19], также критически важным является наличие корректной зависимости потокосцепления от тока и угла поворота ротора [20].

Целью работы является разработка методики построения карты намагничивания ВИД с использованием экспериментального стенда и программного обеспечения для обработки полученных данных. Результаты исследования позволяют получить полное представление о распределении потокосцепления в зависимости от тока и положения ротора, что является необходимым этапом для последующего проектирования системы.

Описание методики

В настоящей работе применен экспериментальный подход построения карты намагничивания, при которой требуется искусственное торможение ротора. На рис. 1 представлена функциональная схема экспериментального стенда.

Принцип работы стенда заключается в следующем: ротор ВИД блокируется механически в любом желаемом положении. Положение ротора может измеряться датчиком положения. С помощью полупроводникового преобразователя на базе биполярных силовых транзисторов с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor) или IGBT-транзисторов осущест-

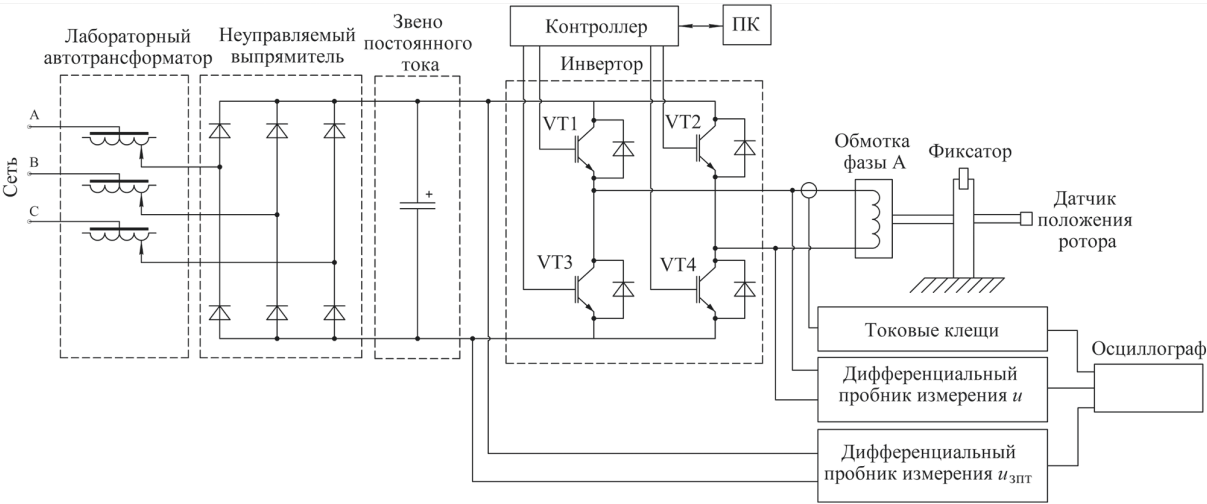


Рис. 1. Функциональная схема экспериментального стенда.

A, B, C — фазы сети, VT1–VT4 — транзисторные ключи, ПК — персональный компьютер, u — напряжение в измеряемой фазе, $u_{зпт}$ — напряжение звена постоянного тока

Fig. 1. Functional diagram of the experimental stand

A, B, C — phases of electrical network, VT1–VT4 — transistor switches, ПК — personal computer, u — voltage in measured phase, $u_{зпт}$ — voltage of the DC link

вляется периодическая подача напряжения на проверяемую обмотку фазы. Фазный ток и напряжение измеряются с помощью соответствующих датчиков. Для построения карты намагничивания требуется измерить сопротивление обмотки, построить кривые фазных напряжения и тока, а также рассчитать потокоцепление. Необходимо выполнить несколько экспериментов в различных положениях ротора.

Описание эксперимента

В качестве исследуемой машины использован экспериментальный образец ВИД со следующими номинальными параметрами: мощность — 7,5 кВт; число фаз — 3; число зубцов статора/ротора — 6/4; напряжение на звене постоянного тока — 540 В; ток — 19,1 А; частота вращения — 3000 об/мин. Стенд состоит из источника питания, исследуемого двигателя и системы измерения. В качестве источника питания применен лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) с напряжением 540 В, от которого напряжение подается на неуправляемый выпрямитель и далее со звена постоянного тока на инвертор. Управляющий контроллер подает сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на транзисторы со скважностью 1. На контроллере установлена защита по превышению тока. Такая схема позволяет подать скачкообразное напряжение на обмотку двигателя. Показания тока снимаются с помощью токового пробника.

С целью предотвращения прокручивания ротора и его надежной фиксации в определенном положении

предусмотрена специальная механическая оснастка. На валу ротора установлен градуированный диск, закрепленный на алюминиевой балке. Конец балки жестко закреплен пружинными зажимами. Общая схема стенда в сборе представлена на рис. 2.

Измерение тока в обмотке произведено с помощью токового пробника для осциллографа Pintek PA-677. Измерение напряжения выполнено с помощью высоковольтного дифференциального пробника Micsig DP10007. Характеристики токового и высоковольтного дифференциального пробников представлены в табл. 1.

Показания пробников считываются и выводятся сразу на осциллограф АКИП-4126/4А-Х. Снятые показания переводятся на съемный носитель и обрабатываются программными средствами.

Эксперимент проводился по следующей методике. Перед началом эксперимента к фазе двигателя подключают токовый пробник, а к звену постоянного тока и выходу инвертора — дифференциальный пробник. Контроллер настраивают на отключение системы при достижении ограничения по току в 19 А. Затем вращают рукоятку ЛАТР до достижения напряжения 540 В на звене постоянного тока. На фазу двигателя через неуправляемый выпрямитель и инвертор подают скачкообразное напряжение и проверяют, что двигатель занимает согласованное положение. Значения тока и напряжения фиксируются осциллографом и сохраняются на электронный носитель. Далее ротор отклоняют на 6° по шкале и жестко фиксируют. Эксперимент повторяют с подачи скачкообразного напряжения, снимая показания в 17 положениях. После проведения экспериментов

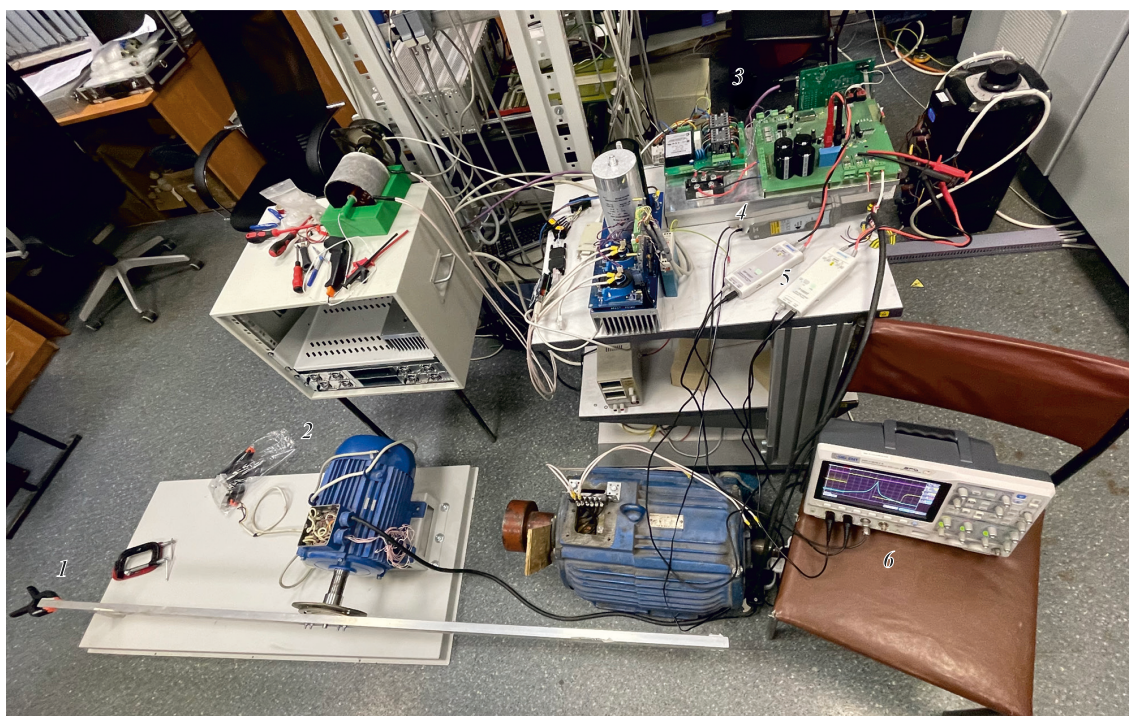


Рис. 2. Фотография экспериментального стенда: 1 — фиксирующая оснастка; 2 — вентильно-индукторный двигатель; 3 — неуправляемый выпрямитель, инвертор и контроллер; 4 — токовые клещи; 5 — токовые и дифференциальные пробники; 6 — осциллограф

Fig. 2. Photo of the experimental equipment. 1 — fixing tool; 2 — switched reluctance motor; 3 — uncontrolled rectifier, inverter and controller; 4 — current clamps; 5 — current and differential probes; 6 — oscilloscope

Таблица 1. Параметры датчика тока и высоковольтного дифференциального пробника
Table 1. Current sensor parameters and the high-voltage differential probe

Параметр	Значение	
Токовый пробник		
Максимальный ток (DC), А	от –70 до +70	
Максимальная рабочее напряжение, В	600	
Частотный диапазон (DC), МГц	1	
Точность в диапазоне 500 мВ/А (20 мА–14 А)	± (3 %+20 мА)	
Точность в диапазоне 50 мВ/А (200 мА–100 А)	± (4 %+200 мА)	
Высоковольтный дифференциальный пробник		
Полоса пропускания, МГц	100	
Коэффициент деления	1/10	1/100
Максимальное дифференциальное напряжение, В	70	700
Максимальное входное напряжение, В	600 (CAT II) 1000 (CAT I)	
Точность, %	± 2	

Примечание: CAT I — приборы, предназначены для работы с источниками напряжения, которые не подключены непосредственно к сети электроснабжения; CAT II — приборы, которые могут работать с цепями, подключенными к низковольтной электрической сети через стандартные розетки, такие как бытовая техника.

и обработки результатов были получены графики токов и напряжений для каждого положения ротора, пример которых для согласованного положения показан на рис. 3.

На графиках показано напряжение u на обмотке двигателя в фазе А, фазный ток i и напряжение на звене постоянного тока $u_{зпт}$. В начале измерения открывается ключ VT1, VT4, в течение всего эксперимента ключи остаются открыты и закрываются только в конце измерения. В виду того, что в ходе эксперимента отсутствует ШИМ-модуляция ключей, измеренное напряжение на обмотке равно напряжению на звене постоянного тока за вычетом падения напряжения (приблизительно 2 В) на ключах VT1 и VT4. Данный опыт эквивалентен опыту короткого замыкания, что обуславливает просадку напряжения на звене постоянного тока в 15 В к концу измерения.

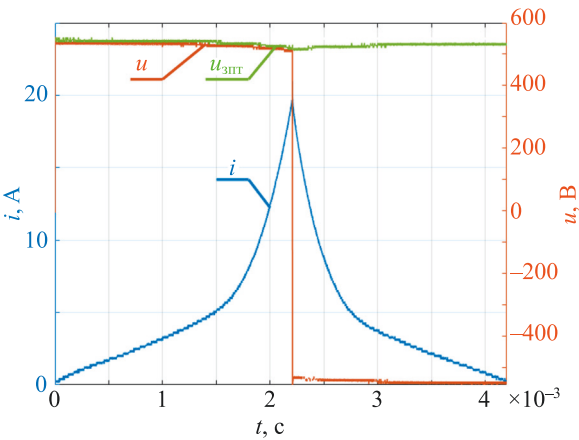


Рис. 3. Графики тока и напряжения в согласованном положении ротора

Fig. 3. Current and voltage graphs in the matched rotor position

Обработка результатов

Полученные графики токов и значений напряжений позволяют построить кривые потокоцепления для каждого углового положения по следующей формуле:

$$\psi(t) = \int_0^t (u(t) - Ri(t))dt + \psi(0), \tag{1}$$

где $\psi(0)$ — начальное значение потокоцепления ($t = 0$); $u(t)$ — напряжение на фазе; $i(t)$ — ток в фазе ВИД; R — сопротивление фазной обмотки.

Сопротивление фазной обмотки R было измерено и составляет 1,6 Ом. По формуле (1) выполнено интегрирование кривой тока для каждого положения с шагом 1 А. Проинтегрировав кривые тока и получив значения потокоцепления, можно построить расчетные характеристики (рис. 4).

Для получения полной карты намагничивания осуществим измерения во всех 17 положениях. В результате была получена поверхность, изображенная на рис. 5.

Моделирование карты и построение графиков проводились с использованием программного пакета MATLAB. Алгоритм построения полной карты намагничивания включал следующие этапы. Данные, полученные в ходе расчетов, были разделены по трем параметрам: сила тока, потокоцепление и угол. Эти данные дополнены восемью точками в сторону уменьшения угла θ (от 111 до 63°) и девятью точками в сторону увеличения угла (от 111 до 159°). Выполнено построение графика по дополненным точкам, при этом количество точек по углу и по току было установлено на уровне 50 значений. Промежуточные значения для всей карты намагничивания определены методом интерполяции. В результате на основе расширенного набора данных была синтезирована поверхность намагничивания ВИД.

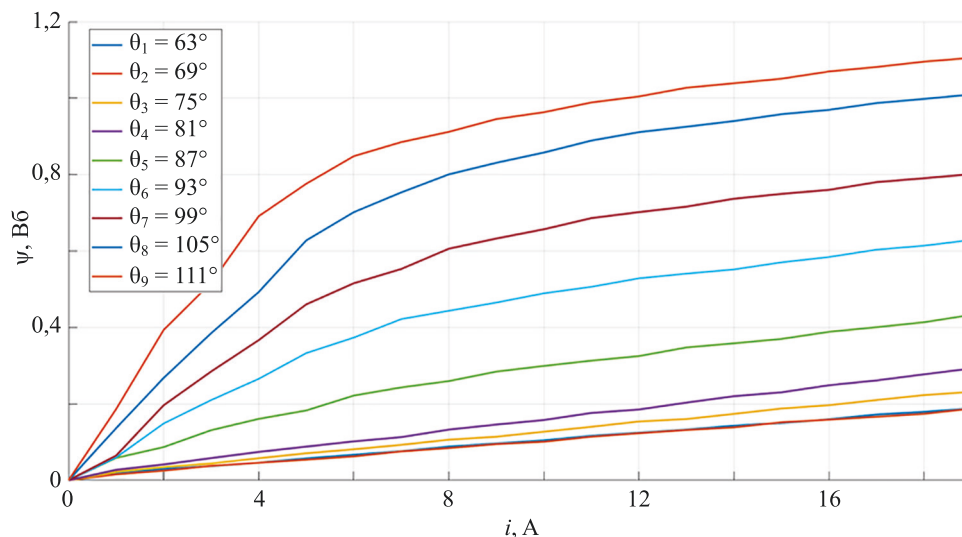


Рис. 4. График зависимости потокоцепления от тока, где θ — угол положения ротора
Fig. 4. Graph of the dependence of flux-current, where θ is the angle of the rotor position

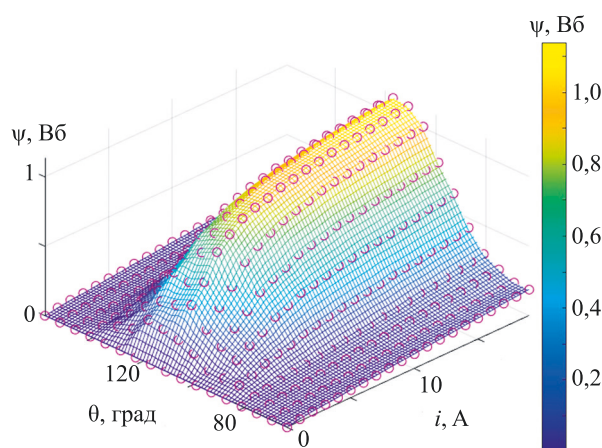


Рис. 5. Полная карта намагничивания
Fig. 5. Full magnetization map

Заключение

Разработан необходимый и достаточный для построения карты намагничивания вентильно-индукторного двигателя экспериментальный подход — от подготовки экспериментального стенда до способов обработки полученных результатов. Для обработки полученных данных разработана программа для расчета потокоцепления и построения карты намагничивания. Полученные методики были верифицированы на вентильно-индукторном двигателе конфигурации 6/4 мощностью 7,5 кВт и позволили получить карту намагничивания для диапазона положений от 63 до 159° при согласованном положении в 111°. Полученная карта дает полное представление о распределении потокоцепления в зависимости от тока и положения ротора вентильно-индукторного двигателя, что в дальнейшем может быть применено при проектировании системы управления.

Литература

1. Krasovsky A. Simulation and analysis of improved direct torque control of switched reluctance machine // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2020. V. 18. N 1. P. 251–260. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v18.i1.pp251-260>
2. Anuchin A., Demidova G.L., Hao C., Zharkov A., Bogdanov A., Šmídl V. Continuous control set model predictive control of a switch reluctance drive using lookup tables // *Energies*. 2020. V. 13. N 13. P. 3317. <https://doi.org/10.3390/en13133317>
3. Fang G., Ye J., Xiao D., Xia Z., Emadi A. Low-Ripple continuous control set model predictive torque control for switched reluctance machines based on equivalent linear SRM model // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022. V. 69. N 12. P. 12480–12495. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3130344>
4. Rodriguez J., Kazmierkowski M.P., Espinoza J.R., Zanchetta P., Abu-Rub H., Young H.A., Rojas C.A. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. V. 9. N 2. P. 1003–1016. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2221469>
5. Rodriguez J., Garcia C., Mora A., Flores-Bahamonde F., Acuna P., Novak M., Zhang Y., Tarisciotti L., Davari S.A., Zhang Z., Wang F.,

References

1. Krasovsky A. Simulation and analysis of improved direct torque control of switched reluctance machine. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 251–260. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v18.i1.pp251-260>
2. Anuchin A., Demidova G.L., Hao C., Zharkov A., Bogdanov A., Šmídl V. Continuous control set model predictive control of a switch reluctance drive using lookup tables. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 13, pp. 3317. <https://doi.org/10.3390/en13133317>
3. Fang G., Ye J., Xiao D., Xia Z., Emadi A. Low-Ripple continuous control set model predictive torque control for switched reluctance machines based on equivalent linear SRM model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, vol. 69, no. 12, pp. 12480–12495. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3130344>
4. Rodriguez J., Kazmierkowski M.P., Espinoza J.R., Zanchetta P., Abu-Rub H., Young H.A., Rojas C.A. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 1003–1016. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2221469>
5. Rodriguez J., Garcia C., Mora A., Flores-Bahamonde F., Acuna P., Novak M., Zhang Y., Tarisciotti L., Davari S.A., Zhang Z., Wang F.,

- Norambuena M., Dragicevic T., Blaabjerg F., Geyer T., Kennel R., Khaburi D.A., Abdelrahman M., Zhang Z., Mijatovic N., Aguilera R.P. Latest advances of model predictive control in electrical drives—Part I: Basic concepts and advanced strategies // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022. V. 37. N 4. P. 3927–3942. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3121532>
6. Rodriguez J., Garcia C., Mora A., Davari S.A., Rodas J., Valencia D.F., Elmorshedy M., Wang F., Zuo K., Tarisciotti L., Flores-Bahamonde F., Xu W., Zhang Z., Zhang Y., Norambuena M., Emadi A., Geyer T., Kennel R., Dragicevic T., Khaburi D.A., Zhang Z., Abdelrahman M., Mijatovic N. Latest Advances of model predictive control in electrical drives—Part II: applications and benchmarking with classical control methods // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022. V. 37. N 5. P. 5047–5061. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3121589>
 7. Memon A., Shaikh M.M., Bukhari S.S.H., Ro J.-S. Look-up data tables-based modeling of switched reluctance machine and experimental validation of the static torque with statistical analysis // *Journal of Magnetism*. 2020. V. 25. N 2. P. 233–244. <https://doi.org/10.4283/JMAG.2020.25.2.233>
 8. Chancharoensook P., Rahman M.F. Magnetization and static torque characterization of a four-phase switched reluctance motor: experimental investigations // *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001 – Indonesia. Proceedings (Cat. No.01TH8594)*. V. 2. 2001. P. 456–460. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2001.975359>
 9. Cossar C., Miller T.J.E. Electromagnetic testing of switched reluctance motors // *Proc. of International Conference on Electrical Machines*. 1992. P. 470–474.
 10. Prescott J.C., El-Kharashi A.K. A method of measuring self-inductances applicable to large electrical machines // *Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering*. 1959. V. 106. N 26. P. 169–173. <https://doi.org/10.1049/pi-a.1959.0070>
 11. Cossar C., Popescu M., Miller T., McGilp M. On-line phase measurements in switched reluctance motor drives // *Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications*. 2007. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/epe.2007.4417358>
 12. Anuchin A., Bogdanov A., Demidova G., Stolyarov E., Surnin D., Vagapov Y. Online magnetization surface identification for a switched reluctance motor // *Proc. of the 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2020. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/UPEC49904.2020.9209832>
 13. Cheok A.D., Wang Z. Flux linkage measurement method for switched reluctance motors and inductor/transformers using a real-time DSP system // *International Journal of Electronics*. 2002. V. 89. N 8. P. 625–644. <https://doi.org/10.1080/0020721021000057571>
 14. Switched reluctance motor flux linkage characteristic measurement method. Patent CN201010018146A. 2010.
 15. Liu J., Wang G., Sun L., Liu D., Fan Y. A novel method to obtain the flux-linkage characteristics of switched reluctance motors // *IEEE Transactions on Magnetism*. 2021. V. 57. N 11. P. 8205011. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3111521>
 16. Xu Y., Gu J., Chen H., Chen Z., Pu Y. Power loss calculation for the power converter in switched reluctance motor drive // *Proc. of the IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*. 2014. P. 19–24. <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2014.6932619>
 17. He C., Hao C., Qianlong W., Shaohui X., Shun Yao Y. Design and control of switched reluctance motor drive for electric vehicles // *Proc. of the 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. 2016. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2016.7838783>
 18. Chen H., Wang K., Yan W., Orabia M., Parspour N. Temperature analysis of switched reluctance motor based on equivalent heat circuit method // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021. V. 31. N 8. P. 0604104. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3117753>
 19. Sarr A., Bahri I., Diallo D., Berthelot E. Sensorless control of Switched Reluctance Machine // *Proc. of the IECON 2016 — 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2016. P. 6693–6698. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793584>
 20. Anuchin A., Shpak D., Kotelnikova A., Dmitriev A., Bogdanov A., Demidova G. Encoderless rotor position estimation of a switched reluctance drive operated under model predictive control // *Proc. of the 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316621>
 - Norambuena M., Dragicevic T., Blaabjerg F., Geyer T., Kennel R., Khaburi D.A., Abdelrahman M., Zhang Z., Mijatovic N., Aguilera R.P. Latest advances of model predictive control in electrical drives—Part I: Basic concepts and advanced strategies. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, vol. 37, no. 4, pp. 3927–3942. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3121532>
 6. Rodriguez J., Garcia C., Mora A., Davari S.A., Rodas J., Valencia D.F., Elmorshedy M., Wang F., Zuo K., Tarisciotti L., Flores-Bahamonde F., Xu W., Zhang Z., Zhang Y., Norambuena M., Emadi A., Geyer T., Kennel R., Dragicevic T., Khaburi D.A., Zhang Z., Abdelrahman M., Mijatovic N. Latest Advances of model predictive control in electrical drives—Part II: applications and benchmarking with classical control methods. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, vol. 37, no. 5, pp. 5047–5061. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3121589>
 7. Memon A., Shaikh M.M., Bukhari S.S.H., Ro J.-S. Look-up data tables-based modeling of switched reluctance machine and experimental validation of the static torque with statistical analysis. *Journal of Magnetism*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 233–244. <https://doi.org/10.4283/JMAG.2020.25.2.233>
 8. Chancharoensook P., Rahman M.F. Magnetization and static torque characterization of a four-phase switched reluctance motor: experimental investigations. *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001 – Indonesia. Proceedings (Cat. No.01TH8594)*. V. 2, 2001, pp. 456–460. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2001.975359>
 9. Cossar C., Miller T.J.E. Electromagnetic testing of switched reluctance motors. *Proc. of International Conference on Electrical Machines*, 1992, pp. 470–474.
 10. Prescott J.C., El-Kharashi A.K. A method of measuring self-inductances applicable to large electrical machines. *Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering*, 1959, vol. 106, no. 26, pp. 169–173. <https://doi.org/10.1049/pi-a.1959.0070>
 11. Cossar C., Popescu M., Miller T., McGilp M. On-line phase measurements in switched reluctance motor drives. *Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/epe.2007.4417358>
 12. Anuchin A., Bogdanov A., Demidova G., Stolyarov E., Surnin D., Vagapov Y. Online magnetization surface identification for a switched reluctance motor. *Proc. of the 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2020, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/UPEC49904.2020.9209832>
 13. Cheok A.D., Wang Z. Flux linkage measurement method for switched reluctance motors and inductor/transformers using a real-time DSP system. *International Journal of Electronics*, 2002, vol. 89, no. 8, pp. 625–644. <https://doi.org/10.1080/0020721021000057571>
 14. Switched reluctance motor flux linkage characteristic measurement method. Patent CN201010018146A. 2010.
 15. Liu J., Wang G., Sun L., Liu D., Fan Y. A novel method to obtain the flux-linkage characteristics of switched reluctance motors. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2021, vol. 57, no. 11, pp. 8205011. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3111521>
 16. Xu Y., Gu J., Chen H., Chen Z., Pu Y. Power loss calculation for the power converter in switched reluctance motor drive. *Proc. of the IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, 2014, pp. 19–24. <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2014.6932619>
 17. He C., Hao C., Qianlong W., Shaohui X., Shun Yao Y. Design and control of switched reluctance motor drive for electric vehicles. *Proc. of the 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, 2016, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2016.7838783>
 18. Chen H., Wang K., Yan W., Orabia M., Parspour N. Temperature analysis of switched reluctance motor based on equivalent heat circuit method. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, vol. 31, no. 8, pp. 0604104. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3117753>
 19. Sarr A., Bahri I., Diallo D., Berthelot E. Sensorless control of Switched Reluctance Machine. *Proc. of the IECON 2016 — 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 6693–6698. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793584>
 20. Anuchin A., Shpak D., Kotelnikova A., Dmitriev A., Bogdanov A., Demidova G. Encoderless rotor position estimation of a switched reluctance drive operated under model predictive control. *Proc. of the 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2020, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316621>

Авторы

Яременко Андрей Михайлович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0007-7220-3957>, amyaremenko@itmo.ru

Демидова Галина Львовна — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56974083200, https://orcid.org/0000-0003-2786-715X](https://orcid.org/0000-0003-2786-715X), demidova@itmo.ru

Сорокина Алла Алексеевна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0001-7466-4673>, 265957@niuitmo.ru

Маматов Александр Геннадьевич — кандидат технических наук, ассистент, руководитель группы, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191075351, https://orcid.org/0000-0002-1887-3059](https://orcid.org/0000-0002-1887-3059), amamatov@itmo.ru

Богданов Андрей Николаевич — аспирант, Московский энергетический институт, Москва, 111250, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0007-3858-5859>, anbogdanov@itmo.ru

Анучин Алексей Сергеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Московский энергетический институт, Москва, 111250, Российская Федерация, [sc 56168843400, https://orcid.org/0000-0002-1019-756X](https://orcid.org/0000-0002-1019-756X), anuchin.alecksey@itmo.ru

Authors

Andrey M. Yaremenko — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0007-7220-3957>, amyaremenko@itmo.ru

Galina L. Demidova — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56974083200, https://orcid.org/0000-0003-2786-715X](https://orcid.org/0000-0003-2786-715X), demidova@itmo.ru

Alla A. Sorokina — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-7466-4673>, 265957@niuitmo.ru

Aleksandr G. Mamatov — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191075351, https://orcid.org/0000-0002-1887-3059](https://orcid.org/0000-0002-1887-3059), amamatov@itmo.ru

Andrey N. Bogdanov — PhD Student, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0007-3858-5859>, anbogdanov@itmo.ru

Alecksey S. Anuchin — D.Sc., Professor, Head of Department, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russian Federation, [sc 56168843400, https://orcid.org/0000-0002-1019-756X](https://orcid.org/0000-0002-1019-756X), anuchin.alecksey@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 05.06.2024

Одобрена после рецензирования 27.08.2024

Принята к печати 28.09.2024

Received 05.06.2024

Approved after reviewing 27.08.2024

Accepted 28.09.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»