

## Моделирование режимов тягового вентильно-индукторного электропривода троллейбуса

АНТИПОВ В.Н., ГРОЗОВ А.Д., ИВАНОВА А.В.

ИХС РАН, Санкт-Петербург, Россия

*Рассматриваются результаты разработки и моделирования вентильно-индукторного двигателя для тягового привода троллейбуса. Проект основан на принципах блочно-модульного проектирования двигателя, а прототипом является асинхронный двигатель ТАД-3 мощностью 180 кВт, которым в настоящее время оснащаются троллейбусы. Параметры вентильно-индукторного двигателя получены на основе численного расчета магнитного поля по программе ELCUT и встроены в MATLAB/Simulink-модель двигателя, созданную для отношения 12/8 полюсов статора к зубцам ротора. Моделирование дает возможность совершенствовать процедуру проектирования, рационально выбирать параметры регулирования и получать динамику изменения основных параметров двигателя в различных режимах. Исследованы зависимости действующего значения фазного тока и среднего вращающего момента от параметров регулирования, а также изменение частоты вращения двигателя троллейбуса в режиме постоянной мощности. Предложенный вариант вентильно-индукторного двигателя обеспечивает все режимы работы по стандартной диаграмме движения троллейбуса с асинхронным тяговым двигателем ТАД-3. При использовании реактивного регулируемого привода на городском транспорте достигается экономия активных материалов до 30 %, используются лишь недефицитные и недорогие материалы, производство двигателя отличается высокой технологичностью и низкой трудоемкостью (простая конфигурация магнитной системы, отсутствие коллектора, беличьей клетки, постоянных магнитов, машинная намотка катушек).*

*Ключевые слова:* вентильно-индукторный двигатель, компьютерное моделирование, проектирование, общественный транспорт

Реактивный регулируемый привод (РРП) на базе вентильно-индукторного двигателя (ВИД) обладает весьма привлекательными достоинствами, но, несмотря на давно созданные основы его проектирования [1–5], требует немало усилий для решения задачи по созданию индукторной машины с высокими техническими показателями. Перспективы применения РРП с ВИД на городском транспорте, где его преимущества очевидны [6–11], также ограничены несовершенством процедуры его проектирования. Дополнительные возможности для эффективного проектирования ВИД открывает математическое блочное визуально-ориентированное моделирование в матричной системе *MATLAB* с пакетами расширения *Simulink* и *SimPowerSystems* [12–14], однако в практике проектирования эта процедура используется редко.

В [15] представлены три типа моделей, созданных авторами в среде *MATLAB/Simulink*, а также показаны возможности расчета и исследования на примере вентильно-индукторного двигателя ВИД-3,5-1130 (3,5 кВт, 550 В, 1130 мин<sup>-1</sup>) с отношением зубцов статора и ротора 6/4.

При внедрении регулируемого реактивного привода в качестве тягового привода подвижного состава городского электротранспорта (метро, трамвай, трол-

лейбус) следует отдать предпочтение варианту с отношением зубцов статора и ротора 12/8 [9]. Для такой топологии созданы модели и исследованы режимы работы тягового РРП троллейбуса.

В качестве прототипа для блочно-модульного проектирования ВИД троллейбуса выбран показанный на рис. 1 асинхронный тяговый двигатель переменного тока ТАД-3 (180 кВт, 450 В, 1500/3410 мин<sup>-1</sup>, 1100 Н·м).

В вентильно-индукторном двигателе достигается экономия активных материалов до 30 %, используются лишь недефицитные и недорогие материалы, производство двигателя характеризуется высокой техноло-



Рис. 1. Асинхронный тяговый двигатель переменного тока ТАД-3 для троллейбуса

Fig. 1. TAD-3 induction traction motor for a trolleybus

гичностью и низкой трудоемкостью (простая конфигурация магнитной системы, отсутствие коллектора, беличьей клетки, постоянных магнитов, машинная намотка катушек).

**Материалы и методы.** Вентильно-индукторный двигатель выполненного проекта отличает высокий уровень достигнутых параметров за счет применения современных методов расчета и проектирования и оптимизации вариантных исполнений.

Основные данные выбранного варианта ВИД-180-1500:

число фаз обмотки статора.....	3
число полюсов статора .....	12
число зубцов ротора .....	8
внешний диаметр статора, мм.....	520
диаметр ротора, мм .....	360
длина пакета статора, мм.....	420
воздушный зазор, мм .....	0,6
полюсная дуга статора, град.....	15
полюсная дуга ротора, град.....	16
ширина полюса статора, мм .....	47,1
ширина полюса ротора, мм .....	50,1
высота спинки статора, мм.....	33,6
высота спинки ротора, мм .....	31,6
глубина пазов статора, мм .....	47,8
глубина пазов ротора, мм.....	23,6
число витков катушки .....	10(6)
индуктивность фазы, мГн.....	16,5
вращающий момент, Н·м при $I = 1,0I_n$ .....	1033
вращающий момент, Н·м при $I = 2,0I_n$ .....	2113

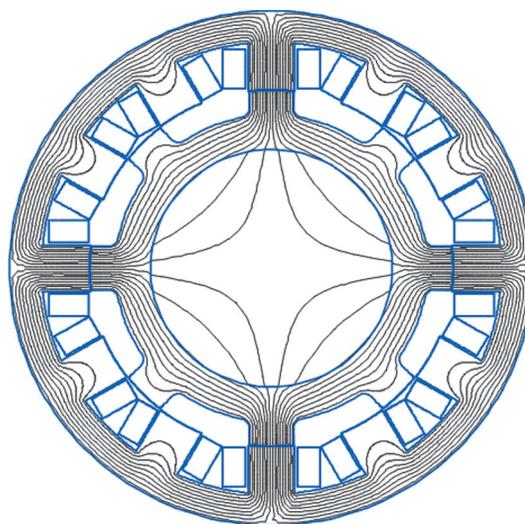
Электromагнитное поле машины для различных значений тока при согласованном и рассогласованном положениях ротора и статора определено численным методом (использовалась программа *ELCUT*), также получены зависимости магнитного потока от тока машины. Распределение векторного магнитного потен-

циала ВИД-180-1500 для согласованного положения ротора и статора показано на рис. 2.

Вращающий электромагнитный момент  $M$  вычислен как приращение магнитной коэнергии  $W_{co}$  по углу поворота  $\theta$  для различных значений тока:

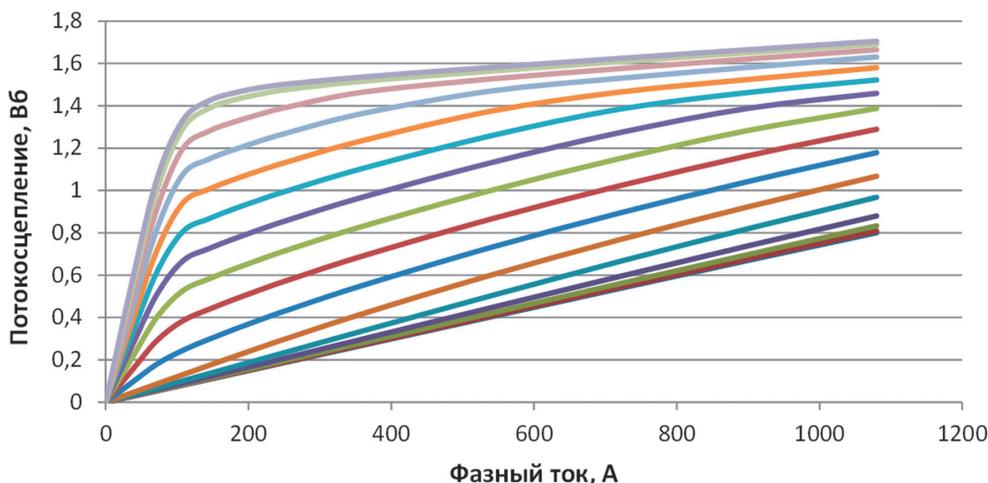
$$M = -\frac{dW_{co}}{d\theta}.$$

Зависимости потокоцепления двигателя ВИД-180-1500 от фазного тока и угла рассогласования зубцов статора и ротора, полученные расчетом электромагнитного поля в *ELCUT*, показаны на рис. 3.



**Рис. 2.** Распределение векторного магнитного потенциала двигателя ВИД-180-1500 при согласованном положении ротора и статора

**Fig. 2.** Distribution of the vector magnetic potential of the motor SRM-180-1500 at the matched position of the rotor and stator



**Рис. 3.** Зависимость потокоцепления фазы двигателя ВИД-180-1500 от фазного тока и угла рассогласования зубцов статора и ротора (от 0 до 22,5° с шагом 1,5°)

**Fig. 3.** Dependence of the flux linkage of the motor phase SRM-180-1500 on the phase current and the angle of misalignment of the teeth of the stator and rotor (from 0 to 22,5° with a step of 1,5°)

Для моделирования трехфазного ВИД с отношением зубцов статора и ротора 12/8 в разработанные в [15] модели внесены следующие изменения:

в исходные данные, в том числе и в блоки *Look-Up Table* и *Look-Up Table 1*;

в *m*-файлы в блоках *Matlab Function* и *Matlab Function 7*;

в преобразование функции *rem* (остаток после деления) *m*-файлов блоков *MATLAB Function 2*.

В блоке *Look-Up Table* записаны данные тока в зависимости от потокосцепления и угла рассогласования  $i = \varphi(\psi, \theta)$ . Полученные путем численного решения задачи электромагнитного поля данные потокосцепления в виде двумерной таблицы в зависимости от дискретных значений токов фазы и углов рассогласования  $\psi = f(i, \theta)$  (рис. 3) преобразованы в данные токов фазы в виде двумерной таблицы в зависимости от дискретных значений потокосцепления и углов рассогласования  $i = \varphi(\psi, \theta)$ . Преобразование (рис. 4) выполнено средствами *MATLAB* путем создания специального *m*-файла.

В блоке *Look-Up Table 1* записаны данные момента в зависимости от фазного тока и угла рассогласования (рис. 5). Задача решена также созданием *m*-файла *MATLAB*, в котором по зависимости  $\psi = f(i, \theta)$  находится коэнергия

$$W_{co}(i, \theta) = \int_0^{i_0} \psi(i, \theta_0) di$$

и определяется ее градиент.

На рис. 6 показана модель для исследования ВИД-180-1500. На стадии проектирования для исследуемого режима моделированием определяется электромагнитный момент  $M_{mean}$ . Заданными параметрами являются: напряжение  $U$ , частота вращения двигателя  $\omega$ , ограничение тока  $I_{ref}$ , углы включения  $\theta_{on}$  и отключения  $\theta_{off}$  фаз. При исследовании регулирования частоты вращения двигателя  $\omega$  на вход *MATLAB Function 2* подается с *Integrator 3* значение частоты вращения, сформированное после решения уравнения движения. Заданными параметрами являются: напряжение  $U$ , ограничение тока  $I_{ref}$ , момент нагрузки  $M_{load}$ , момент инерции  $J$ , углы включения  $\theta_{on}$  и отключения  $\theta_{off}$  фаз.

На рис. 6 показаны все элементы одной фазы, а две другие фазы представлены блоками *Subsystem*, поскольку все фазы идентичны по структуре. Блоки измерения и контроля сигналов на рис. 6 не показаны.

В схеме моделирования для каждой фазы двигателя с конфигурацией 12/8 предусмотрено три блока задания функций *MATLAB Function*. Блок *MATLAB Function 2* с помощью функции *rem* (остаток после де-

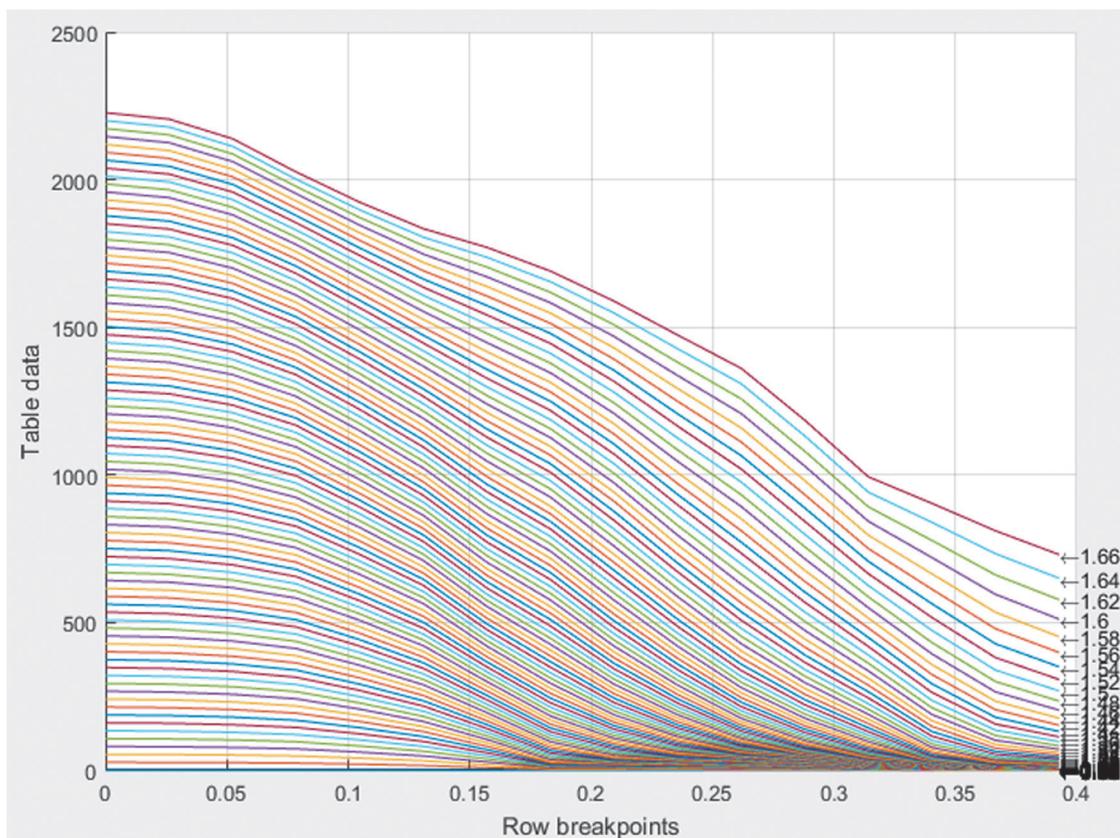


Рис. 4. Зависимость тока от потокосцепления  $i = \varphi(\psi)$  при различных положениях ротора  $\theta$  для ВИД-180-1500  
 Fig. 4. The dependence of the current on the flux linkage  $i = \varphi(\psi)$  at different positions of the rotor  $\theta$  for SRM-180-1500

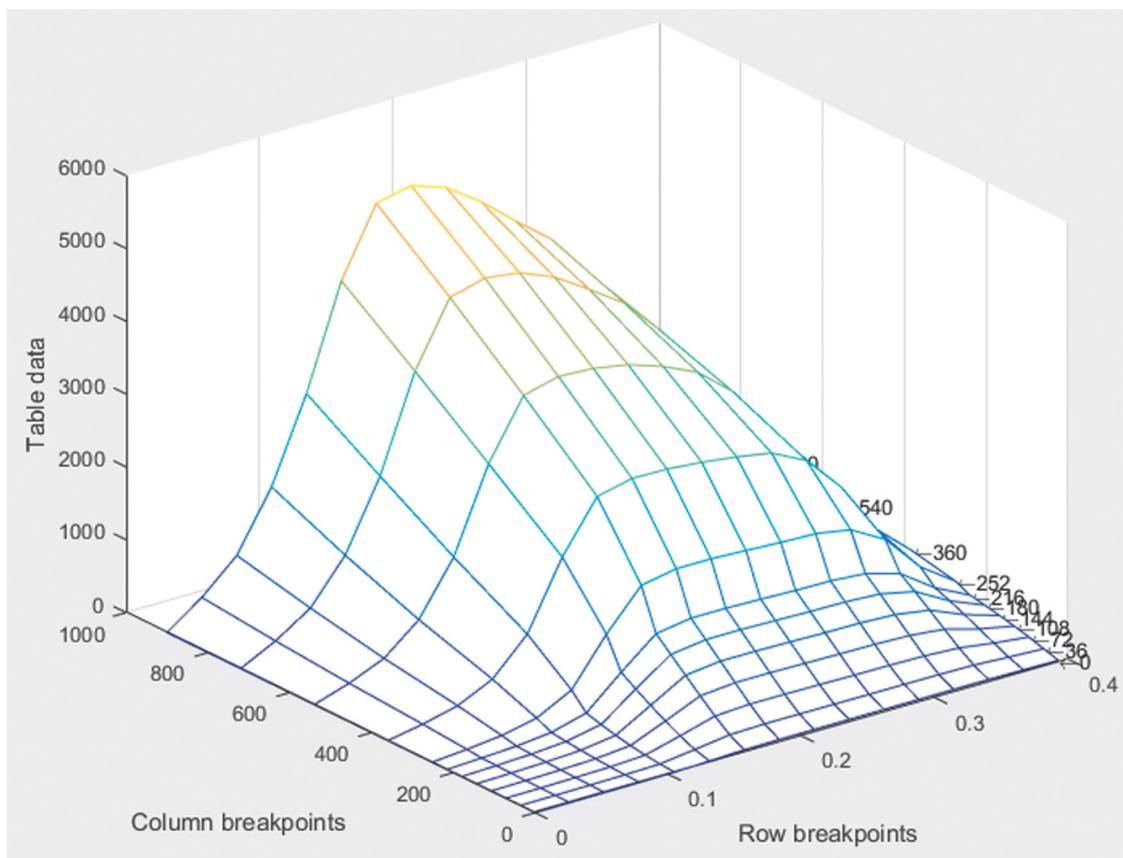


Рис. 5. Зависимости момента  $M = f(\theta)$  от тока при различных положениях ротора для ВИД-180-1500  
 Fig. 5. Dependences of the torque  $M = f(\theta)$  on the current at the rotor different positions for SRM-180-1500

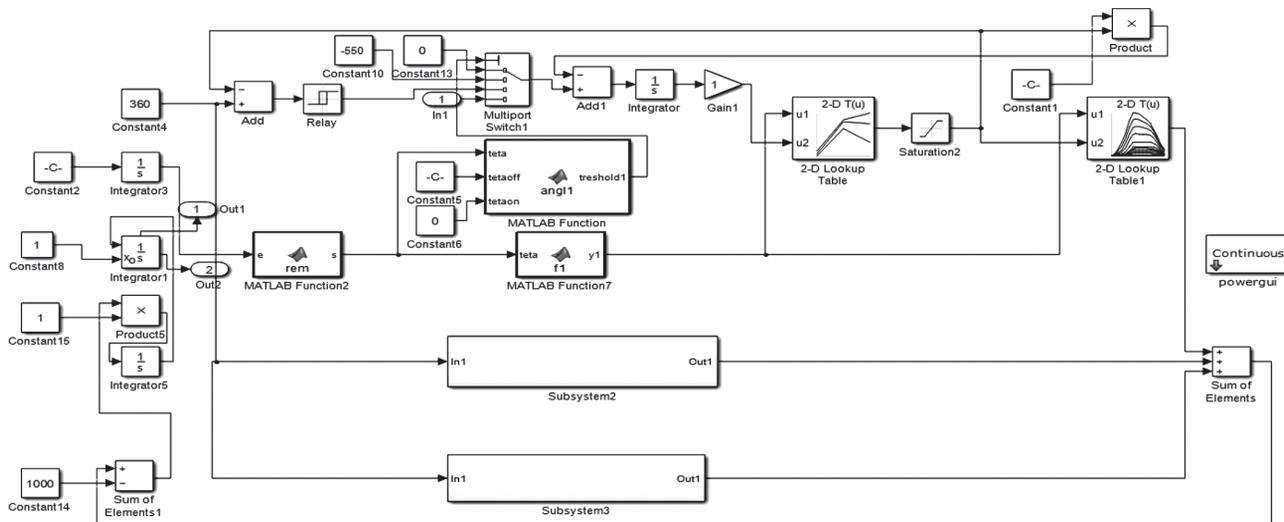


Рис. 6. Модели для исследования режимов работы ВИД-180-1500  
 Fig. 6. Models for the study of SRM-180-1500 operating modes

ления) должен преобразовать непрерывную функцию угла поворота ротора в функцию угла поворота в пределах от 0 до  $\pi/4$ . Блок *MATLAB Function* 7 с помощью созданного *m*-файла для каждой фазы преобразует значения угла поворота из диапазона  $0-\pi/4$  к диапазону  $0-\pi/8$ , для которого записаны двумерные таблицы

блоков *Look-Up Table* и *Look-Up Table 1*. Блок *MATLAB Function* с помощью *m*-файла для каждой фазы обеспечивает переключение сигналов в многопортовом переключателе в соответствии с условиями:

$$u_j = U_{dc}, \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{off};$$

$$u_j = -U_{dc}, \theta_{off} \leq \theta \leq \theta_{ent};$$

$$u_j = 0, \theta \geq \theta_{ent},$$

где  $\theta$  – угол рассогласования положения ротора и статора;  $u_j$  – напряжение фазы в зависимости от угла  $\theta$ .

Для возможности наблюдения за ходом процессов при моделировании использовалось измерительное устройство – осциллограф *Scope*. С помощью блоков математической обработки сигнала определены действующие значения тока фазы и среднее значение момента двигателя, которые выведены на экран виртуального дисплея. Для последующего анализа данные фазного тока, потокосцепления и вращающего момента сохранены в рабочем пространстве с помощью блоков *simout*.

На рис. 7 приведен пример данных, получаемых на экранах осциллографов *Scope* при моделировании.

**Результаты и обсуждение.** На рис. 8 показана диаграмма движения троллейбуса массой 20 т на условном перегоне 350 м, оснащенного двумя асинхронными тяговыми двигателями. На диаграмме показан разгон, выбег и торможение троллейбуса.

Для двигательного режима характерными являются три точки: *P1, P2, P3*. Соответствующие им параметры движения представлены в табл. 1.

Для ВИД-180-1500 моделированием получены зависимости действующего значения фазного тока  $I_{rms}$

(рис. 9,а) и среднего вращающего момента  $M_{mean}$  (рис. 9,б) от параметров регулирования: ширины импульса  $\Delta$  и токоограничения  $I_{ref}$ .

Полученные зависимости подтверждают возможность реализации номинальных параметров двигателя при токоограничении не выше 360 А.

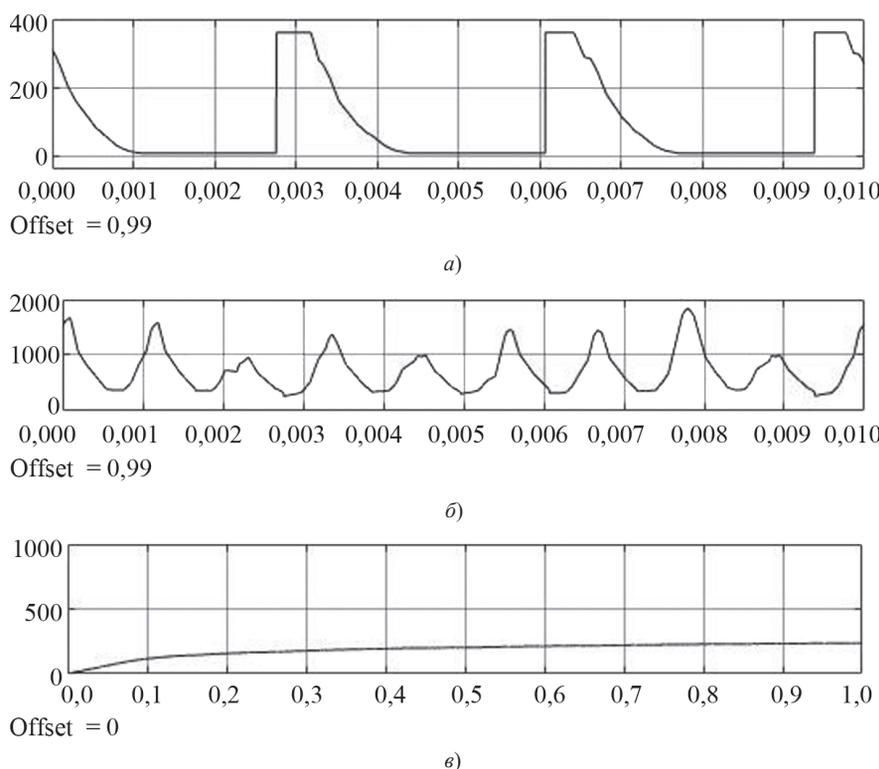
Выполнено моделирование регулирования скорости троллейбуса при постоянной мощности. Результаты показаны на рис. 10 для  $\Delta = \pi/10$  и  $I_{ref} = 300$  и 360 А.

Выполнено моделирование режимов, соответствующих контрольным точкам диаграммы движения троллейбуса (табл. 2).

Результаты исследования показывают, что все контрольные точки диаграммы движения троллейбуса могут быть реализованы при значениях токоограничения, ширины импульса и действующего значения тока, представленных в табл. 2.

**Выводы.** Для тягового привода троллейбуса предложен разработанный на принципах блочно-модульного проектирования вариант вентиляно-индукторного двигателя ВИД-180-1500 с параметрами асинхронного двигателя переменного тока ТАД-3.

Проведено исследование режимов работы двигателя в среде *MATLAB/Simulink* на модели, созданной для конфигурации магнитной системы 12/8. Моделирование дает возможность совершенствовать процедуру проектирования, рационально выбирать параметры ре-



**Рис. 7.** Данные моделирования на экранах осциллографов (режим  $\Delta = \pi/10$ ,  $I_{ref} = 360$  А,  $M_{load} = 700^\circ$  Н·м): а – ток фазы; б – электромагнитный момент; в – круговая частота вращения

**Fig. 7.** Simulation data on oscilloscope screens (mode  $\Delta = \pi/10$ ,  $I_{ref} = 360$  А,  $M_{load} = 700^\circ$  Nm): а – phase current; б – electromagnetic torque; в – circular rotation frequency

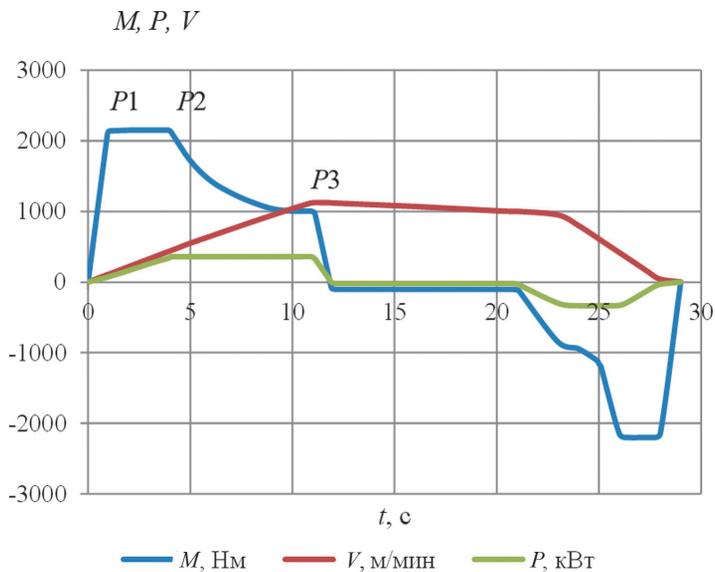


Рис. 8. Диаграмма движения троллейбуса массой 20 т на условном перегоне 350 м  
 Fig. 8. Diagram of the movement of a trolleybus weighing 20 tons on the 350 m conditional stretch

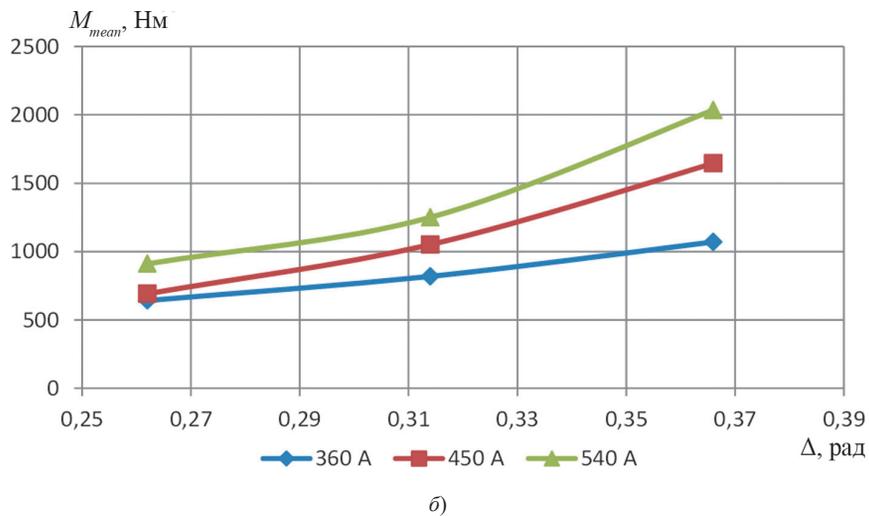
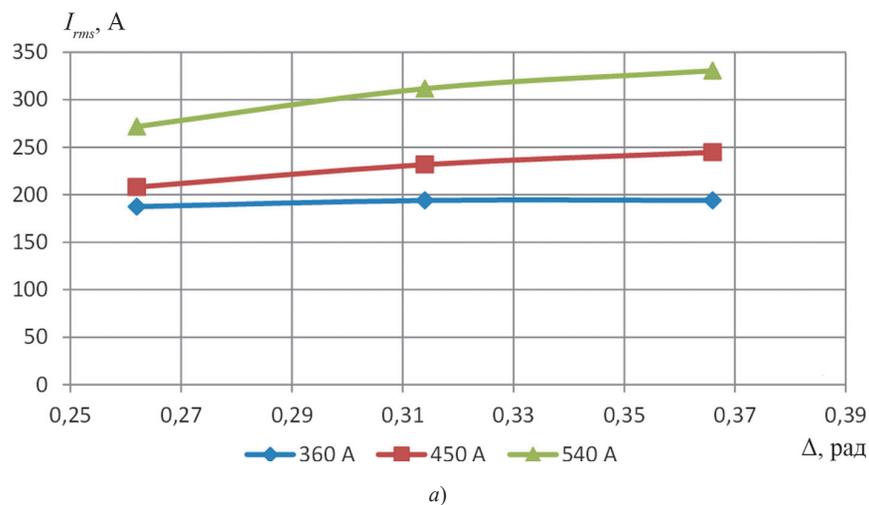


Рис. 9. Зависимости действующего значения фазного тока  $I_{rms}$  (а) и среднего вращающего момента  $M_{mean}$  (б) от параметров регулирования  
 Fig. 9. Dependences of the effective value of the phase current  $I_{rms}$  (a) and the mean torque  $M_{mean}$  (b) on the control parameters

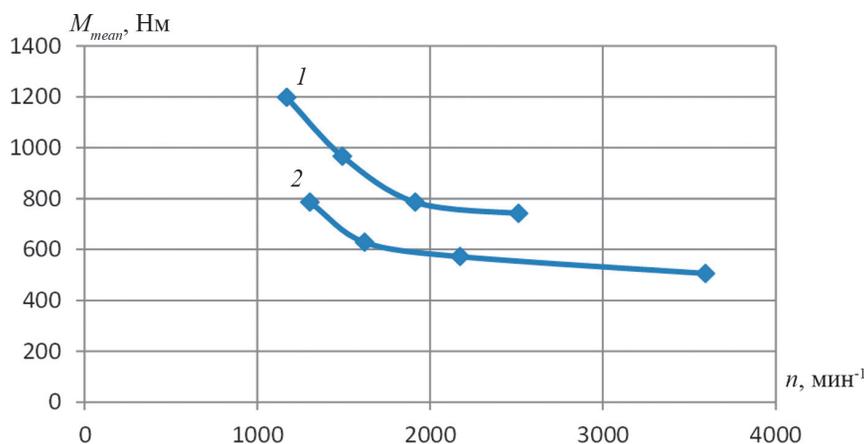


Рис. 10. Изменение частоты вращения двигателя троллейбуса в режиме постоянной мощности для  $\Delta = \pi/10$  и  $I_{ref} = 360$  А (1) и 300 А (2)

Fig. 10. Changing the speed of the trolleybus motor in constant power mode for  $\Delta = \pi/10$  and  $I_{ref} = 360$  A (1) and 300 A (2)

Таблица 1

**Характерные точки диаграммы движения троллейбуса**  
**Characteristic points of the trolleybus movement diagram**

Режимы	Время, с	Момент, Н·м	Мощность, кВт	Скорость, м/мин
P1 (режим динамического ускорения)	1,1	2150	30	120
P2 (номинальный режим)	3,9	2150	360	480
P3 (режим максимальной скорости)	11	1000	360	1130

Таблица 2

**Режимы для характерных точек диаграммы движения троллейбуса**  
**Modes for characteristic points of the trolleybus movement diagram**

Режимы	$M$ , Н·м	$U$ , В	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$I_{ref}$ А	$\Delta$ , рад
P1	1239	140	375	360	0,367
P2	1071	550	1500	360	0,367
P3	550	550	3420	300	0,314

гулирования ( $I_{ref}$ ,  $\theta_{on}$ ,  $\theta_{off}$ ,  $\omega$ ,  $M_{load}$ ) и получать динамику изменения основных параметров двигателя в различных режимах.

Предложенный вариант ВИД-180-1500 обеспечивает все режимы работы по стандартной диаграмме движения троллейбуса с асинхронным тяговым двигателем ТАД-3.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-08-00386.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lawrenson P.J., et al.** Variable-Speed Switched Reluctance Motors. – IEEE Proc. B Power Applications, 1980, vol. 127, No. 4, pp. 253–265.
2. **Miller T.J.E.** Switched Reluctance Motors and Their Control. London: Magna Physics Publishing and Oxford University Press, 1993, 200 p.
3. **Krishnan R.** Switched Reluctance Motor Drives. Boca Raton: CRC Press, 2001, 432 p., DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420041644>.
4. **Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А.** Вентильно-индукторные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 2003, 71 с.
5. **Miller T.J.E.** Optimal Design of switched reluctance motors. – IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2002, vol. 49, No. 1, pp. 15–27.

6. **Птах Г.К.** Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт. – Электротехника: сетевой электронный научный журнал, 2015, т. 2, № 3, с. 23–33.

7. **Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.** Исследование характеристик базовых вентиляльно-индукторных электродвигателей тягового привода городского электротранспорта. – Электричество, 2016, № 10, с. 45–52.

8. **Rahman K. M. et al.** Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues. – IEEE Trans. on Industry Applications, 2000, vol. 36 (1), pp. 111–121.

9. **Kiyota K., Chiba A.** Design of Switched Reluctance Motor Competitive to 60-kW IPMSM in Third-Generation Hybrid Electric Vehicle. – IEEE Trans. Industry Appl., 2012, vol. 48, No. 6, pp. 2303–2309.

10. **Takeno M., et al.** Test Results and Torque Improvement of the 50-kW Switched Reluctance Motor Designed for Hybrid Electric Vehicles. – IEEE Trans. on Industry Appl., 2012, vol. 48 (4), pp. 1327–1334.

11. **Andrada P., et al.** Switched Reluctance Motor Controller for Light Electric Vehicles. – Proc. 2018 European Conf. on Power Electronics and Appl., 2018, pp. 1–9.

12. **Soares F., Costa Blanco P.J.** Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment. – IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2001, vol. 37, No. 3, pp. 989–1009.

13. **Chancharoensook P., Rahman M.F.** Dynamic Modelling of a Four-Phase 8/6 Switched Reluctance Motor Using Current and Torque Look-up Tables. – IEEE Annual Conf. of the Industrial Electronics Society, 2002, vol. 1, pp. 491–496.

14. **Matveev A., et al.** Two Approaches for Modeling of Switched Reluctance Drives. – Proc. 2003 European Conf. on Power Electronics and Appl., 2003, 10 p.

15. **Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.** Исследование моделей вентильно-индукторного двигателя. – Электричество, 2018, № 6, с. 60–65.



**Грозов Андрей Дмитриевич** – научный сотрудник ИХС РАН, Санкт-Петербург, Россия.

[19.01.2021]



**Авторы: Антипов Виктор Николаевич** – доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), Санкт-Петербург, Россия.



**Иванова Анна Владимировна** – кандидат техн. наук, старший научный сотрудник ИХС РАН, Санкт-Петербург, Россия.

*Elektrichestvo*, 2022, No. 2, pp. 47–55

DOI:10.24160/0013-5380-2022-2-47-55

## Simulating the Operation Modes of a Trolleybus Traction Switched Reluctance Electric Drive

**ANTIPOV Viktor N.** (*I.V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*) – Leading Researcher; Dr. Sci. (Eng.).

**GROZOV Andrey D.** (*I.V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*) – Research Associate.

**IVANOVA Anna V.** (*I.V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*) – Senior Researcher; Cand. Sci. (Eng.).

The results from development and simulation of a switched reluctance motor for a trolleybus traction drive are discussed. The project is based on the motor modular designing principles, and the 180 kW TAD-3 induction motor with which trolleybuses are currently equipped serves as a prototype. The switched reluctance motor's parameters were obtained from a numerical analysis of the magnetic field using the ELCUT computer program and have been embedded into the MATLAB/Simulink model of the motor developed for the 12/8 stator poles to rotor teeth ratio. The modeling makes it possible to improve the design procedure, rationally select the control parameters, and obtain the dynamics of changes in the motor main parameters in various modes of its operation. The dependences of the phase current r.m.s. value and the mean torque on the control parameters, as well as the change in the trolleybus motor rotational speed in the constant power mode are investigated. The proposed switched reluctance motor design version supports all modes of operation according to the trolleybus standard motion diagram in the case of its being equipped with the TAD-3 induction traction motor. In using a reluctance adjustable drive in urban transport vehicles, savings up to 30% of active materials are achieved; only readily available and inexpensive materials are used, and the motor design is well amenable to mass scale production with low labor intensity (the magnetic system has a simple configuration; the motor does not have a commutator, squirrel cage, and permanent magnets, and its coils are machine-wound).

**Key words:** switched reluctance motor; computer simulation, designing, public transport

The work was carried out with the financial support of the RFBR Grant, Project No. 20-08-00386.

REFERENCES

1. **Lawrenson P.J., et al.** Variable-speed switched reluctance motors. – IEEE Proc. B Power Applications, 1980, vol. 127, No. 4, pp. 253–265.
2. **Miller T.J.E.** Switched reluctance motors and their control. London: Magna Physics Publishing and Oxford University Press, 1993, 200 p.
3. **Krishnan R.** Switched Reluctance Motor Drives. Boca Raton: CRC Press, 2001, 432 p., DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420041644>.
4. **Kuznetsov V.A., Kuz'michyov V.A.** *Ventil'no-induktornye dvigateli (Valve-Inductor Motors)*. M.: Izd-vo MEI, 2003, 71 p.
5. **Miller T.J.E.** Optimal Design of switched reluctance motors. – IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2002, vol. 49, No. 1, pp. 15–27.
6. **Ptah G.K.** *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal – in Russ. (Russian Internet Journal of Electrical Engineering)*, 2015, vol. 2, No. 3, pp. 23–33.
7. **Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 10, pp. 45–52.
8. **Rahman K. M. et al.** Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues. – IEEE Trans. on Industry Applications, 2000, vol. 36 (1), pp. 111–121.
9. **Kiyota K., Chiba A.** Design of switched reluctance motor competitive to 60-kW IPMSM in third-generation hybrid electric vehicle. – IEEE Trans. Industry Appl., 2012, vol. 48, No. 6, pp. 2303–2309.
10. **Takeno M., et al.** Test Results and Torque Improvement of the 50-kW Switched Reluctance Motor Designed for Hybrid Electric Vehicles. – IEEE Trans. on Industry Appl., 2012, vol. 48 (4), pp. 1327–1334.
11. **Andrada P., et al.** Switched Reluctance Motor Controller for Light Electric Vehicles. – Proc. 2018 European Conf. on Power Electronics and Appl., 2018, pp. 1–9.
12. **Soares F., Costa Blanco P.J.** Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment. – IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2001, vol. 37, No. 3, pp. 989–1009.
13. **Chancharoensook P., Rahman M.F.** Dynamic Modelling of a Four-Phase 8/6 Switched Reluctance Motor Using Current and Torque Look-up Tables. – IEEE Annual Conf. of the Industrial Electronics Society, 2002, vol. 1, pp. 491–496.
14. **Matveev A., et al.** Two Approaches for Modeling of Switched Reluctance Drives. – Proc. 2003 European Conf. on Power Electronics and Appl., 2003, 10 p.
15. **Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 6, pp. 60–65.

[19.01.2021]