
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.313.33
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-2-119-125

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ПАЗОВ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

А. А. СИЛАЕВ, М. Я. МАРУСИНА

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: marusina_m@mail.ru*

Представлена методика восстановления геометрии пазов короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя на основе испытаний на нагрузочном стенде. Моделирование двигателя было проведено в программе Infolytica MotorSolve, для минимизации целевой функции выбраны квазиньютоновский метод оптимизации и генетический алгоритм. Приведены расчетные и экспериментальные характеристики асинхронного двигателя с учетом влияния испытательного стенда и без его учета.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, метод оптимизации, геометрия ротора, тепловой режим

Введение. Высокая скорость обработки информации современными процессорами дала толчок развитию старых и разработке новых алгоритмов управления системой „преобразователь—двигатель“. Для понимания особенностей управления асинхронным короткозамкнутым двигателем, и прежде всего ограничений, присущих способам и устройствам управления, помимо абстрактных представлений о пространственных векторах и системах координат, необходимы сведения о физических явлениях, а также о статических и динамических характеристиках асинхронного двигателя (АД) при работе в условиях изменяющегося напряжения, тока и/или частоты питания [1—3].

Достоверность результатов моделирования электромагнитных и электромеханических процессов в АД непосредственно зависит от точности исходных параметров линейной схемы замещения обобщенной электрической машины. Существует множество методик вычисления параметров схем замещения АД, которые различаются точностью получаемых результатов. Но на практике ни одна из них не позволяет получить результат моделирования, полностью совпадающий с механическими, электрическими и энергетическими характеристиками [1].

В условиях, когда нелинейными процессами пренебречь невозможно (например, нельзя пренебречь насыщением зоны зубцов сердечника ротора при наличии высших гармоник магнитодвижущей силы, сопоставимых по величине с основной гармоникой), для детального исследования электромагнитных и тепловых процессов при эксплуатации двигателя необходима информация о геометрии пазов ротора АД. Потому необходимо разработать способ восстановления геометрии пазов ротора для исследования электромагнитных и тепловых процессов при эксплуатации АД.

Цель настоящей работы — по результатам испытаний асинхронного двигателя на нагрузочном стенде восстановить геометрию пазов короткозамкнутого литого ротора.

Восстановление геометрии пазов ротора асинхронного двигателя. Для моделирования геометрии формы пазов ротора был выбран асинхронный двигатель АИР56В2. На первом этапе, сохранив целостность изоляции обмоток ротора и статора, авторы собрали доступную информацию о двигателе. Основные характеристики АД приведены ниже.

Номинальные данные асинхронного двигателя АИР56В2

| | |
|--|-----------|
| Мощность, Вт | 250 |
| Напряжение, В | 380/220 |
| Ток, А | 0,55/0,95 |
| Скорость, об/мин | 2720 |
| $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ | 2,2 |
| $M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$ | 2,2 |
| $M_{\text{мин}}/M_{\text{ном}}$ | 1,8 |
| $\cos\varphi$ | 0,78 |
| КПД | 0,68 |

Полученная информация о статоре двигателя представлена ниже.

Известные параметры статора двигателя

| | |
|--------------------------------|------|
| Внешний диаметр, мм | 89 |
| Внутренний диаметр, мм | 48,5 |
| Высота пакета, мм | 54 |
| Толщина листов стали, мм | 0,5 |
| Число пазов | 24 |
| Ширина зубца, мм | 3 |
| Глубина паза, мм | 8,75 |
| Высота шлица, мм | 0,7 |

Обмотка двигателя — однослойная, концентрическая, сопротивление фазы 27,5 Ом, диаметр медного провода с изоляцией 0,4 мм. Путем моделирования подобрано число витков в пазу — 135, диаметр провода без изоляции — 0,35 мм. Известно, что пазы ротора закрытые, литые стержни изготовлены из алюминия. Параметры ротора с короткозамкнутой обмоткой приведены ниже.

Известные параметры ротора двигателя

| | |
|--------------------------------|-----|
| Внешний диаметр, мм | 48 |
| Внутренний диаметр, мм | 16 |
| Высота пакета, мм | 54 |
| Толщина листов стали, мм | 0,5 |
| Число пазов | 18 |
| Высота КЗ кольца, мм | 4 |
| Ширина КЗ кольца, мм | 9 |

Для моделирования формы пазов ротора двигателя была выбрана программа Infolytica MotorSolve [4—6]. При построении модели двигателя в программе расчетов сделаны следующие допущения: марка стали сердечников ротора и статора М19(24G) — аналог электро-технической стали 2412 (ГОСТ 21427-75) [7], коэффициент заполнения статорного и роторного пакета 0,95 [8], скос пазов ротора — 0 (на основе внешнего осмотра полузакрытых пазов ротора двигателя, аналогичного исследуемому АД АИР56В2). При моделировании двигателя для некоторых заданных значений скорости вращения был рассчитан тепловой режим.

Построение целевой функции оптимизации геометрии пазов ротора на основе испытаний двигателя. Эксперимент на испытательном нагрузочном стенде происходил за относительно короткий промежуток времени — не более 5 с. На первом этапе двигатель без нагрузки разгонялся до синхронной скорости, на втором постепенно тормозился нагрузочным устройством до полной остановки. При проведении эксперимента на испытательном стенде температура отдельных частей двигателя значительно изменялась, это определяет необходимость учета температуры при оптимизации. Температура двигателя, полученная в ходе про-

цесса оптимизации, не будет отражать реальной температуры двигателя, а лишь даст возможность уменьшить значение целевой функции [9, 10].

При проведении испытаний не учитывалось влияние испытательного стенда, поэтому потери на трение должны быть учтены при моделировании.

В качестве метрики целевой функции была выбрана ошибка MSE (Mean Squared Error) [11]:

$$\text{MSE}_Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{\text{exp}}(s_i) - Y_{\text{calc}}(s_i))^2,$$

где n — число точек кривой, использованной для определения ошибки (в данном расчете $n = 9$), $Y_{\text{calc}}(s_i)$ — рассчитанное значение характеристики двигателя при скольжении s_i , $Y_{\text{exp}}(s_i)$ — полученное экспериментально, при испытании на нагрузочном стенде, значение характеристики двигателя, при скольжении s_i .

Поскольку для оптимизации используются две характеристики (зависимость вращающего момента и тока статора от скольжения), оба значения MSE подвергаются нормированию:

$$\text{cost} = \text{MSE}_{\text{current}}^2 + \text{MSE}_{\text{torque}}^2,$$

где cost — целевая функция.

Полагаем, что расчетные кривые моментной и токовой характеристик отличаются от экспериментальных на постоянное значение $(E + 1)$. Если

$$Y_{\text{calc}}(s) = (E + 1)Y_{\text{exp}}(s),$$

возможно рассчитать значение E в зависимости от значения целевой функции cost :

$$\begin{aligned} \text{MSE}_{\text{current}} &= \frac{1}{n} \sum_n (I_{\text{exp}} - I_{\text{exp}}(1 + E))^2 = \frac{E^2}{n} \sum_n (-I_{\text{exp}})^2, \\ \text{MSE}_{\text{torque}} &= \frac{1}{n} \sum_n (T_{\text{exp}} - T_{\text{exp}}(1 + E))^2 = \frac{E^2}{n} \sum_n (-T_{\text{exp}})^2. \end{aligned}$$

Так как значения тока и вращающего момента положительны, то:

$$\begin{aligned} \text{MSE}_{\text{current}} &= \frac{E^2}{n} \sum_n (I_{\text{exp}})^2, \\ \text{MSE}_{\text{torque}} &= \frac{E^2}{n} \sum_n (T_{\text{exp}})^2. \end{aligned}$$

Выразив целевую функцию через полученные значения MSE, получим

$$\begin{aligned} \text{cost} &= \text{MSE}_{\text{torque}}^2 + \text{MSE}_{\text{current}}^2 = \left(\frac{E^2}{n} \sum_n (T_{\text{exp}})^2 \right)^2 + \left(\frac{E^2}{n} \sum_n (I_{\text{exp}})^2 \right)^2 = \\ &= \frac{E^4}{n^2} \left(\left(\sum_n (T_{\text{exp}})^2 \right)^2 + \left(\sum_n (I_{\text{exp}})^2 \right)^2 \right). \end{aligned}$$

Решив полученное выражение для E , получим

$$E = \sqrt[4]{\frac{n^2 \cdot \text{cost}}{\left(\sum_n (T_{\text{exp}})^2 \right)^2 + \left(\sum_n (I_{\text{exp}})^2 \right)^2}} = \sqrt[4]{\text{cost}} K_{\text{cost}}.$$

В данном расчете $K_{\text{cost}} = 0,3944$.

Для восстановления геометрии пазов ротора использованы переменные, представленные в таблице.

Переменные, необходимые для восстановления геометрии ротора

| Параметр | Значение | |
|---|-------------|--------------|
| | минимальное | максимальное |
| Глубина паза, мм | 4 | 10 |
| Ширина зубца, мм | 2 | 5 |
| Высота шлица, мм | 0 | 1 |
| Ширина межзубцовой перегородки, мм | 0,5 | 5 |
| Высота межзубцовой перегородки, мм | 0 | 1 |
| Потери на вентиляцию, Вт | 0 | 50 |
| Потери на трение, Вт | 0 | 150 |
| Коэффициент потерь, зависящих от нагрузки | 0 | 0,1 |
| Рабочая температура, °С | 20 | 110 |

Для минимизации целевой функции использован квазиньютоновский метод оптимизации [12—14], в случае нахождения локального минимума при дальнейшей оптимизации использован генетический алгоритм.

При расчете двигателя без учета влияния стэнда потери на трение приняты равными нулю. Для некоторых заданных значений скорости вращения найден минимум новой целевой функции $\text{cost}T$. При этом геометрия пазов ротора, потери на трение и все остальные параметры, кроме температуры двигателя, оставались неизменными. Затем из вычисленных температур, при заданном скольжении, находилась минимум целевой функции $\text{cost}T$. Температура, при которой был найден минимум целевой функции, и является усредненной температурой двигателя в момент эксперимента с заданным скольжением

$$\text{cost}T(s_i) = (I_{\text{exp}}(s_i) - I_{\text{calc}}(s_i))^2 + (T_{\text{exp}}(s_i) - T_{\text{calc}}(s_i))^2.$$

Результаты численного моделирования. На рис. 1—4 приведены расчетные и экспериментальные характеристики двигателя с учетом и без учета влияния испытательного стэнда: соответственно зависимости вращающего момента T , тока статора I , КПД η , коэффициента мощности $\cos\phi$ от скольжения. Расчет характеристик асинхронного двигателя проведен с учетом потерь на трение в испытательном стэнде (сплошная кривая) и без учета влияния потерь (пунктир), приведенные кривые хорошо согласуются с характеристиками АД, полученными в результате эксперимента.

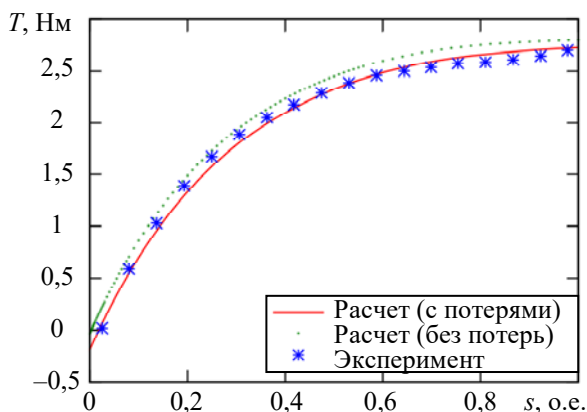


Рис. 1

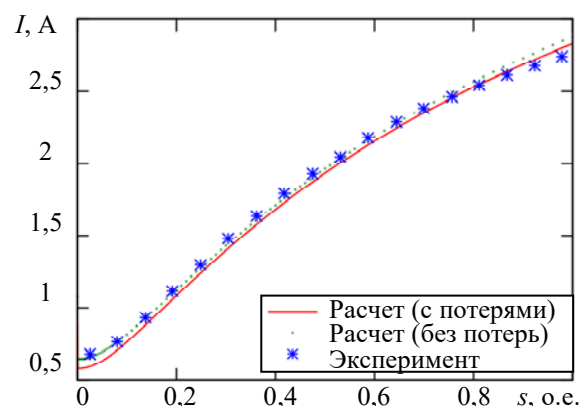


Рис. 2

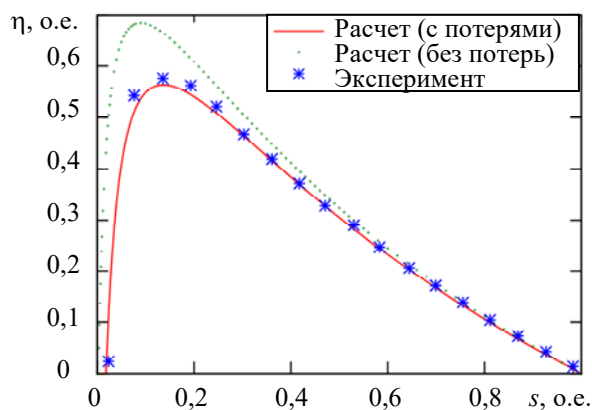


Рис. 3

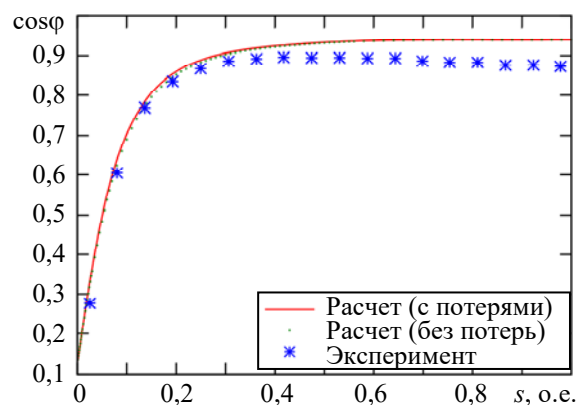


Рис. 4

Для проверки предложенной методики восстановления геометрии пазов исследован реальный ротор двигателя АИР56В2. На рис. 5 представлена восстановленная геометрия пазов ротора двигателя с наложенной фотографией реального ротора асинхронного двигателя АИР56В2 в разрезе. Из рисунка видно, что пазы рассчитанного ротора не полностью совпадают с реальными пазами ротора асинхронного двигателя. Оценка показала, что площадь восстановленных пазов ротора отличается от площади пазов ротора АД АИР56В2 на 17 %. Это можно объяснить затеканием алюминия между листами роторного железа, наличием штампованных ключей листов стали ротора, которые используются для совмещения пазов, кроме того, авторам была не известна марка стали сердечника ротора и статора АД АИР56В2, поэтому при моделировании сделано предположение о стали М19(24G), что может не соответствовать действительности. В целом точность восстановления геометрии пазов ротора можно считать приемлемой для инженерной практики.



Рис. 5

Заключение. Предложенная методика восстановления геометрии пазов ротора на основе испытаний двигателя позволяет рассчитать геометрию ротора с приемлемой точностью. Методика полезна при инженерном моделировании электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Кроме того, в отсутствие конструкторской документации методика может быть использована при расчетах магнитных и тепловых полей двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усольцев А. А. Современный асинхронный электропривод оптико-механических комплексов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 164 с.
2. Усольцев А. А., Лукичев Д. В. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 10. С. 35—41.

3. Casadei D., Serra G., Tani A., Zarri L. Assessment of direct torque control for induction motor drives // Bulletin of the Polish academy of sciences/Technical sciences. 2006. Vol. 54, N 3.
4. Марусина М. Я., Силаев А. А. Влияние градиента магнитного поля ионного насоса на пробное тело абсолютного баллистического гравиметра // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 8. С. 701—705.
5. Marusina M. Ya., Bazarov B. A., Galaidin P. A., Silayev A. A., Marusin M. P. A Magnetic System Based on Permanent Magnets for a Flowmeter of Multiphase Fluid Media // Measurement Techniques. 2014. Vol. 57, N 4. P. 461—465. DOI 10.1007/s11018-014-0478-0.
6. Marusina M. Ya., Bazarov B. A., Galaidin P. A., Marusin M. P., Silayev A. A., Zakemovskaya E. Yu., Mustafaev Yu. N. Design of a Gradient System for a Multiphase Flowmeter // Measurement Techniques. 2014. Vol. 57, N 5. P. 580—586. DOI 10.1007/s11018-014-0501-5.
7. Moses A., Anderson Ph., Jenkins K., Stanbury H. Electrical Steels. Vol. 1. Fundamentals and basic concepts. May 2019. DOI:10.1049/PBPO157F. ISBN: 9781785619700.
8. Maizana D., Yanawati Y., Ami Nurul Nazifah A. Performance Comparison on 0.35 mm and 0.50 mm Thicknesses of Non-Oriented Steel Sheets Using FEM // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 679. P. 112—117. 10.4028/www.scientific.net/AMM.679.112.
9. Силаев А. А., Марусина М. Я., Невмержицкий Д. А. Стенд для испытаний синхронного бесколлекторного двигателя // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11 С. 1030—1033.
10. Marusina M. Y., Silaev A. A., Nevmerzhitky D. A. Method of converting an induction motor to a permanent magnet synchronous motor (LS-PMSM) with linear starting using FEA for mechatronic systems // Proc. of the 2019 IEEE Intern. Conf. “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS), September, 23—27, 2019. P. 356—358. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928320.
11. Bird J. Mathematics Pocket Book for Engineers and Scientists. London: Routledge, 2020. <https://doi.org/10.1201/9780429294402>.
12. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988.
13. Shi Y., Athavale A., Lorenz R. Shaping Induction Machine Rotor Slots for Driving Cycle Loss Reduction. 2018. P. 1619—1626. 10.1109/ECCE.2018.8557740.
14. Shashi M., Bhagwat R. Quasi-Newton Methods. 2019. 10.1007/978-981-15-0894-3_9.

Сведения об авторах

Алексей Алексеевич Силаев

— аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: sila3v@gmail.com

Мария Яковлевна Марусина

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: marusina_m@mail.ru

Поступила в редакцию
07.10.2020 г.

Ссылка для цитирования: Силаев А. В., Марусина М. Я. Восстановление формы пазов ротора асинхронного двигателя по результатам испытаний // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 2. С. 119—125.

RESTORATION OF THE ROTOR GROOVES SHAPE OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR ACCORDING TO THE TEST RESULTS

A. A. Silaev, M. Ya. Marusina

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: marusina_m@mail.ru*

A method for reconstructing the slots geometry of a short-circuited rotor of an asynchronous motor based on a load stand tests results is presented. The engine simulation was carried out in the Infolytica MotorSolve program, and a quasi-Newtonian optimization method and a genetic algorithm are used to minimize the objective function. The calculated and experimental characteristics of the asynchronous motor with and without taking into account the influence of the test bench are compared.

Keywords: asynchronous motor, optimization method, rotor geometry, thermal conditions

REFERENCES

1. Usoltsev A.A. *Sovremennyy asinkhronnyy elektroprivod optiko-mekhanicheskikh kompleksov* (Modern Asynchronous Electric Drive of Optical-Mechanical Complexes), St. Petersburg, 2011, 164 p. (in Russ.)
2. Usoltsev A.A., Lukichev D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 10(51), pp. 35–41. (in Russ.)
3. Casadei D., Serra G., Tani A., Zarri L. *Bulletin of the Polish academy of sciences/Technical sciences*, 2006, no. 3(54).
4. Marusina M.Ya., Silaev A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 8(61), pp. 701–705. (in Russ.)
5. Marusina M.Ya., Bazarov B.A., Galaidin P.A., Silayev A.A., Marusin M.P. *Measurement Techniques*, 2014, no. 4(57), pp. 461–465. DOI 10.1007/s11018-014-0478-0.
6. Marusina M.Ya., Bazarov B.A., Galaidin P.A., Marusin M.P., Silayev A.A., Zakemovskaya E.Yu., Mustafaev Yu.N. *Measurement Techniques*, 2014, no. 5(57), pp. 580–586. DOI 10.1007/s11018-014-0501-5.
7. Moses A., Anderson Ph., Jenkins K., Stanbury H. *Electrical Steels*. Vol. 1. Fundamentals and basic concepts, May 2019. DOI:10.1049/PBPO157F. ISBN: 9781785619700.
8. Maizana D., Yanawati Y., Ami Nurul Nazifah A. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 679, pp. 112–117, 10.4028/www.scientific.net/AMM.679.112.
9. Marusina M.Y., Silaev A.A., Nevmerzhitsky D.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 11(62), pp. 157–166, DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-11-1030-1033. (in Russ.)
10. Marusina M.Y., Silaev A.A., Nevmerzhitsky D.A. *Proc. of the 2019 IEEE Intern. Conf. "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*, September, 23–27, 2019, pp. 356–358, DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928320
11. Bird J. *Mathematics Pocket Book for Engineers and Scientists*, London, Routledge, 2020, <https://doi.org/10.1201/9780429294402>.
12. Bunday B. *Basic Optimisation Methods*. London, Edward Arnold, 1984, 128 p.
13. Shi Y., Athavale A., Lorenz R. *Shaping Induction Machine Rotor Slots for Driving Cycle Loss Reduction*, 2018, pp. 1619–1626, 10.1109/ECCE.2018.8557740.
14. Shashi M. & Bhagwat R. *Quasi-Newton Methods*, 2019, 10.1007/978-981-15-0894-3_9.

Data on authors

- Alexey A. Silaev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: sila3v@gmail.com
- Maria Ya. Marusina** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: marusina_m@mail.ru

For citation: Silaev A. A., Marusina M. Ya. Restoration of the rotor grooves shape of an asynchronous motor according to the test results. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 2. P. 119–125 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-2-119-125