

УДК 621.313

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВУМЯ ИНДУКТОРАМИ И ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПО СХЕМЕ ХАЛЬБАХА, С РАЗЛИЧНЫМИ ВАРИАНТАМИ СТАТОРА

А. Б. Захаренко, А. К. Надкин

**Ш**ирокое распространение получила конструкция двухроторных синхронных двигателей с постоянными магнитами без ярма на статоре. Эта машина применяется в качестве мотор-колеса для привода легких транспортных средств. Для анализа ее оптимальности в работе рассмотрены варианты двухроторных синхронных двигателей с постоянными магнитами с полной схемой Хальбаха и различными конфигурациями статора: без ярма, с ярмом и одинаковым числом зубцов на внешней и внутренней частях, с ярмом и разным числом зубцов на внешней и внутренней частях. Рассмотренные модификации статора, с одной стороны, усложняют конструкцию, с другой, могут позволить достичь улучшенных значений вращающего момента или снизить его пульсации.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрическая машина, электромагнитный момент, схема Хальбаха.

Магнитоэлектрическая машина с двумя индукторами и постоянными магнитами, расположенными по схеме Хальбаха, является новой [1] и обладает преимуществами перед другими электромашинами. Для легких электроприводных транспортных средств применяется синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) с числом пазов статора на полюс и фазу  $q = \frac{3}{8}$ . Примером такой

машины является синхронный двигатель мотор-колеса электроскутера, разработанного и выпускаемого ЗАО «Инкар-М» (г. Королев), с числом пазов  $ZS = 18$  и числом полюсов  $2p = 16$ . Эта машина рассмотрена в данной работе. Результаты оптимизации подобной машины приведены в работе [2]. Представляет интерес рассмотрение ряда усовершенствований, не учтенных в [2], но влияющих на характеристики машины.

Целью данной работы является выявление особенностей двухроторных СДПМ с различными вариантами исполнения статора, задача работы – электромагнитный расчет, направленный на определение момента каждого из вариантов.

Модель магнитной системы электродвигателя, взятого за основу, показана на рис. 1.

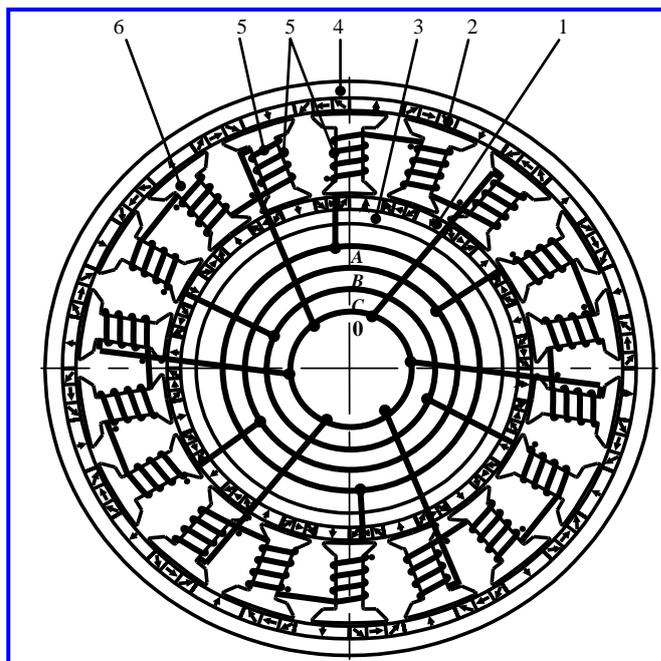
На рис. 1 обозначены: 1 – постоянные магниты внутреннего индуктора; 2 – постоянные магниты внешнего индуктора; 3 и 4 – ярма внутреннего и внешнего индукторов; 5 – обмотка якоря; 6 – зубец якоря. Расчет поля этого СДПМ показан на рис. 2. Поскольку машина обладает симметрией, для расчета поля достаточно взять симметричный участок магнитной системы. При этом в расчете всех электромеханических величин (момент, ЭДС, и др.) учтен коэффициент симметрии 3. Число витков в каждой якорной катушке – 144, амплитуда

тока – 10 А, что близко к режиму короткого замыкания (пуска двигателя).

Исходя из анализа рис. 3, получаем момент внутреннего ротора – 21,2 Нм, момент внешнего ротора – 19,8 Нм, суммарный момент – 41,1 Нм, пульсации – 2,4 Нм.

Рассмотрим, как изменится электромагнитный момент, если на статор электродвигателя по рис. 1 добавить ярмо. Модель магнитной системы и результаты расчета магнитного поля приведены на рис. 4.

По расчету поля на рис. 4 видно, что все поле по-прежнему замыкается через зубцы и в ярмо почти не распространяется.



**Рис. 1.** Поперечное сечение электромашины с размещением постоянных магнитов по полной схеме Хальбаха

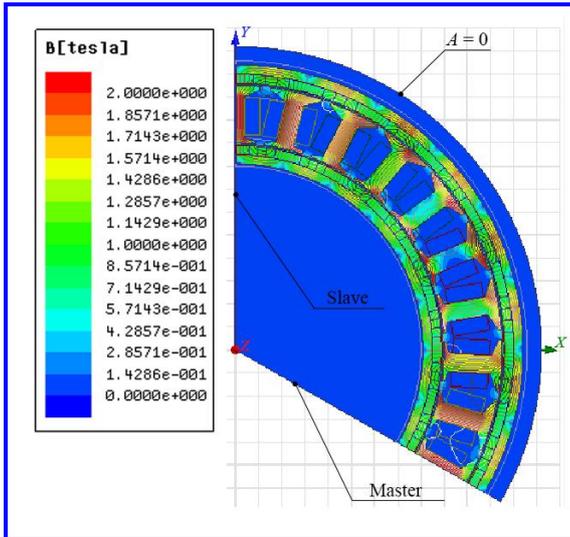


Рис. 2. Расчет магнитного поля исходного двигателя

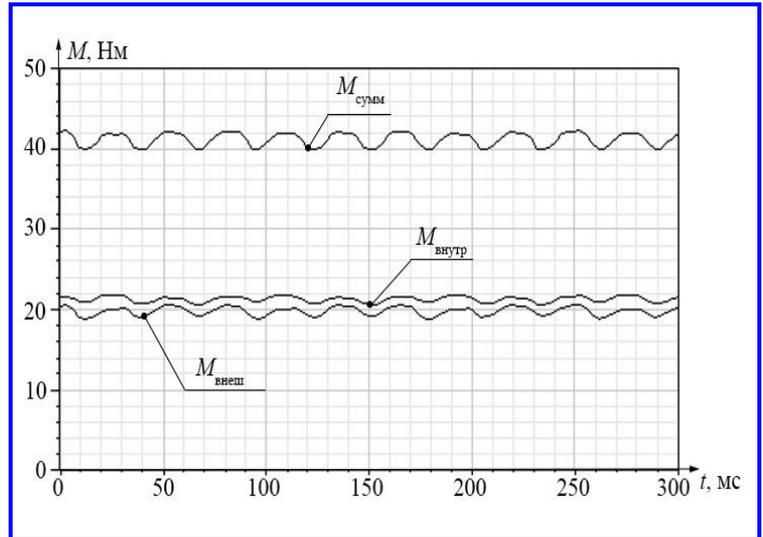


Рис. 3. Электромагнитный момент исходного двигателя без яра на статоре

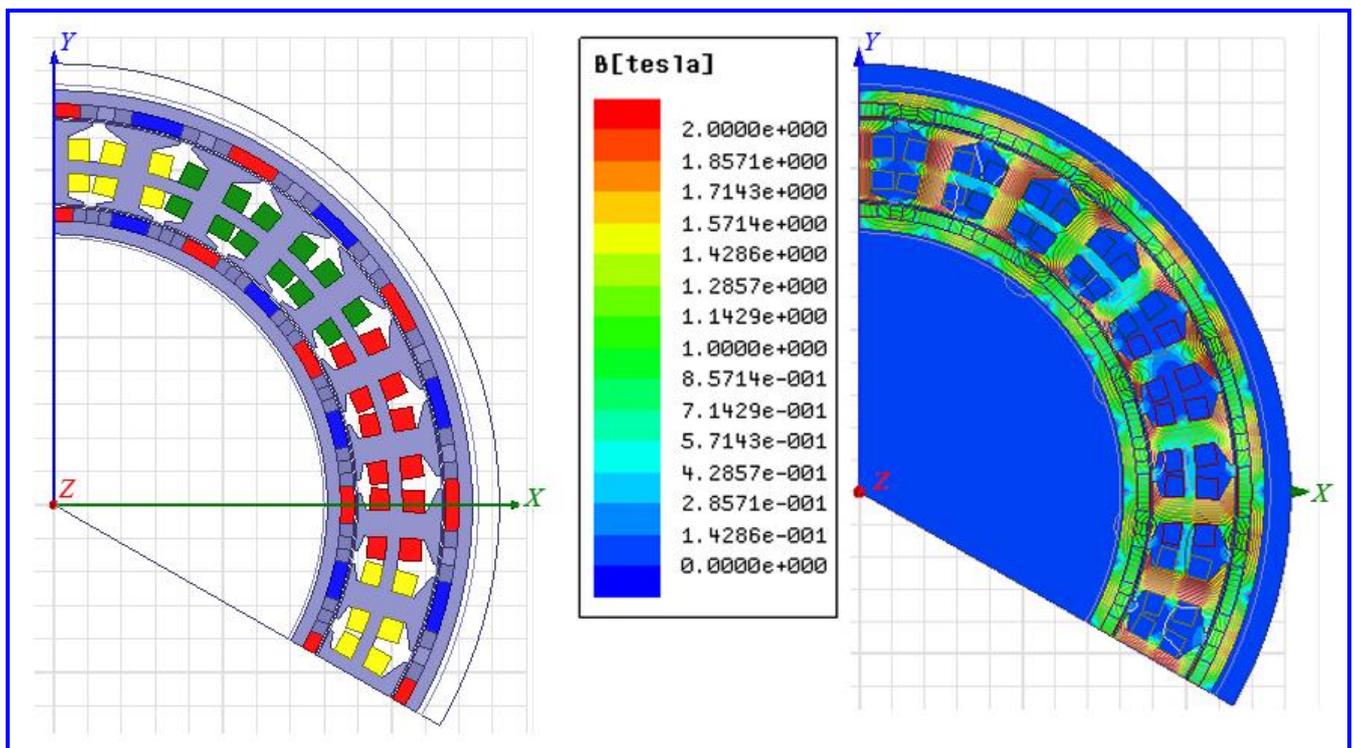


Рис. 4. Модель и результаты расчета магнитного поля машины с яром на статоре

Расчет момента исходного двигателя показан на рис. 3.

Момент полученной по рис. 4 машины показан на рис. 5. Схема обмотки и амплитуда тока не изменены относительно СДПМ по рис. 1, 2. Из-за уменьшения площади паза плотность тока в пазах увеличилась, но лежит в допустимых пределах.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 5, момент внутреннего ротора теперь составил 17,6 Нм, момент внешнего ротора – 23,9 Нм, суммарный момент – 41,4 Нм, пульсации – 2,4 Нм. Таким образом, при добавлении яра изменились значения моментов на внутреннем и внешнем роторе, но сумма и пульсации практически остались прежними.

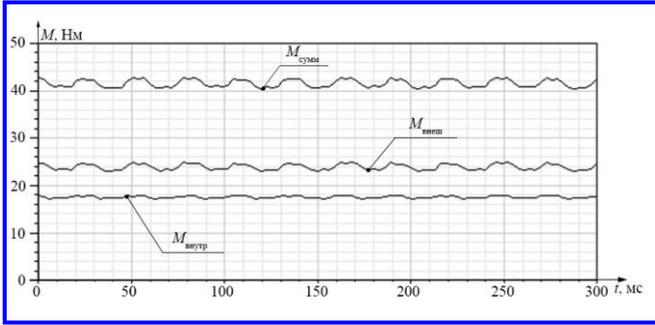


Рис. 5. Момент машины по рис. 4

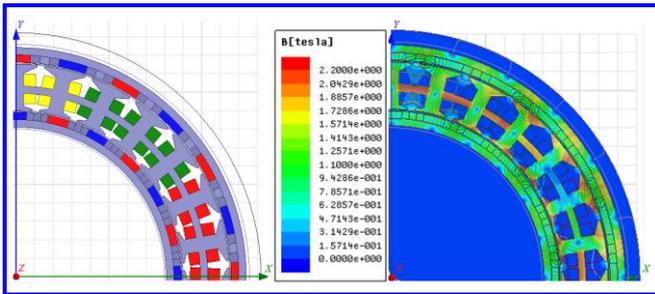


Рис. 6. Модель и результаты расчета магнитного поля машины с ярмом на статоре при встречном расположении роторов

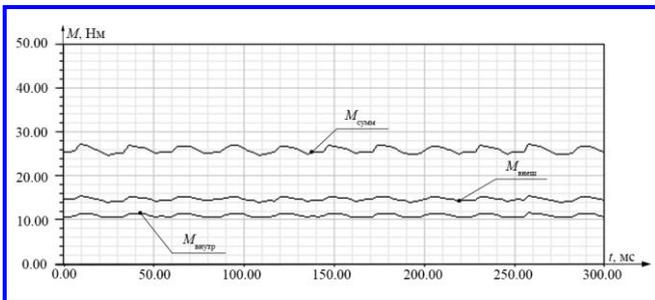


Рис. 7. Момент машины, приведенной на рис. 6

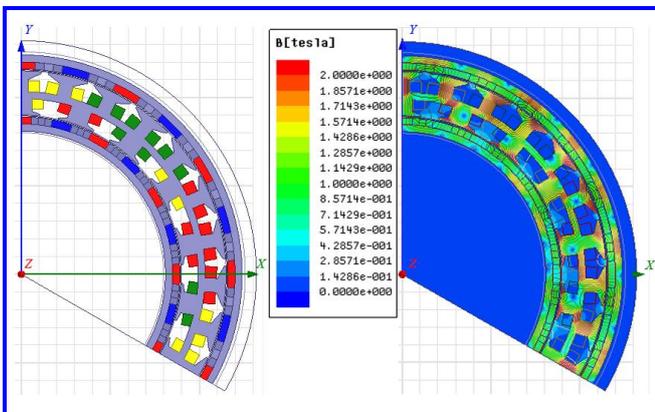


Рис. 8. Модель и результаты расчета магнитного поля машины с разным числом зубцов на внутренней и внешней частях статора

В магнитной системе на рис. 4 роторы находятся в согласном положении, радиальные направления намагничивания полюсов внешнего ротора совпадают с радиальным направлением намагничивания полюсов внутреннего ротора. Однако при наличии ярма роторы могут быть расположены так, что направления их магнитных потоков направлены встречно (рис. 6). На рис. 6 внутренний ротор повернут на угол  $360/2p$  градусов, направление обмотки во внутренних пазах изменено на противоположное.

В этом варианте ярмо статора сильно насыщается, значение индукции достигает 2,2 Тл. Исходя из распределения магнитного потока, ясно, что для снижения насыщения ширина ярма должна быть увеличена до величины ширины зубца, а это в свою очередь сильно уменьшит площадь паза и приведет к недопустимо большим значениям плотности тока. Графики моментов машины, показанной на рис. 6, приведены на рис. 7. Момент внутреннего ротора составил 11,1 Нм, момент внешнего ротора – 14,8 Нм, суммарный момент – 25,9 Нм, пульсации – 2,4 Нм. Таким образом, при добавлении ярма и встречном расположении роторов момент уменьшился из-за чрезмерного насыщения ярма статора.

Рассмотрим, как изменится распределение поля и момент машины, если количество зубцов на внутренней стороне статора будет изменено. Для этого выберем обмотку с  $q = 1/4$ , которой при числе полюсов 24 (как в исходной машине) будет соответствовать число зубцов 18. Модель и расчет поля показаны на рис. 8.

Как видно из рис. 8, для сохранения направления вращения обоих роторов в одну сторону чередование фаз на внутренней части статора пришлось изменить. В отличие от модели на рис. 4 поле распределяется в ярме намного интенсивнее. Для того, чтобы модель на рис. 8 была подобна моделям на рис. 4 и 2, число витков на зубце внешнего ротора выбрано 72, внутреннего – 108. Тогда суммарное количество витков определяется соотношением  $w_1Z_1 + w_2Z_2 = \text{const}$ , где  $w_1$  и  $Z_1$  – число витков на зубце и число зубцов на внешнем статоре,  $w_2$  и  $Z_2$  – число витков на зубце и число зубцов на внутреннем статоре. Полная магнитодвижущая сила (МДС) трех фаз обмотки якоря исходной машины:  $F = wZI = 144 \cdot 27 \cdot 10 = 38880$  Ампер-витков; машины по рис. 4:  $F = (w_1Z_1 + w_2Z_2) \cdot I = (72 \cdot 27 + 72 \cdot 27) \cdot 10 = 38880$  Ампер-витков; машины по рис. 8:  $w_1Z_1I_1 + w_2Z_2I_2 = 72 \cdot 27 \cdot 10 + 108 \cdot 18 \cdot 10 = 38880$  Ампер-витков. Таким образом, амплитуда тока и полная МДС во всех вариантах одинаковая. Ширина ножки зубца внутреннего ротора вы-

брана из соотношения:  $b_2 = (b_1 Z_1) / Z_2 = 27 \cdot 8 / 18 = 12$  мм. Электромагнитный момент в полученной машине показан на рис. 9.

Как видно по графикам на рис. 9, момент внутреннего ротора – 18,1 Нм, момент внешнего ротора – 21,3 Нм, суммарный момент – 39,4 Нм, пульсации – 15,1 Нм. Соответственно, при добавлении ярма и изменении числа зубцов на внутреннем ста-

торе значение среднего момента практически сохранилось, а пульсации увеличились в 6,3 раза. Оптимизация магнитной системы по рис. 8 позволит снизить пульсации при сохранении среднего значения момента.

Роторы магнитной системы на рис. 8 могут также быть расположены встречно, как показано на рис. 10.

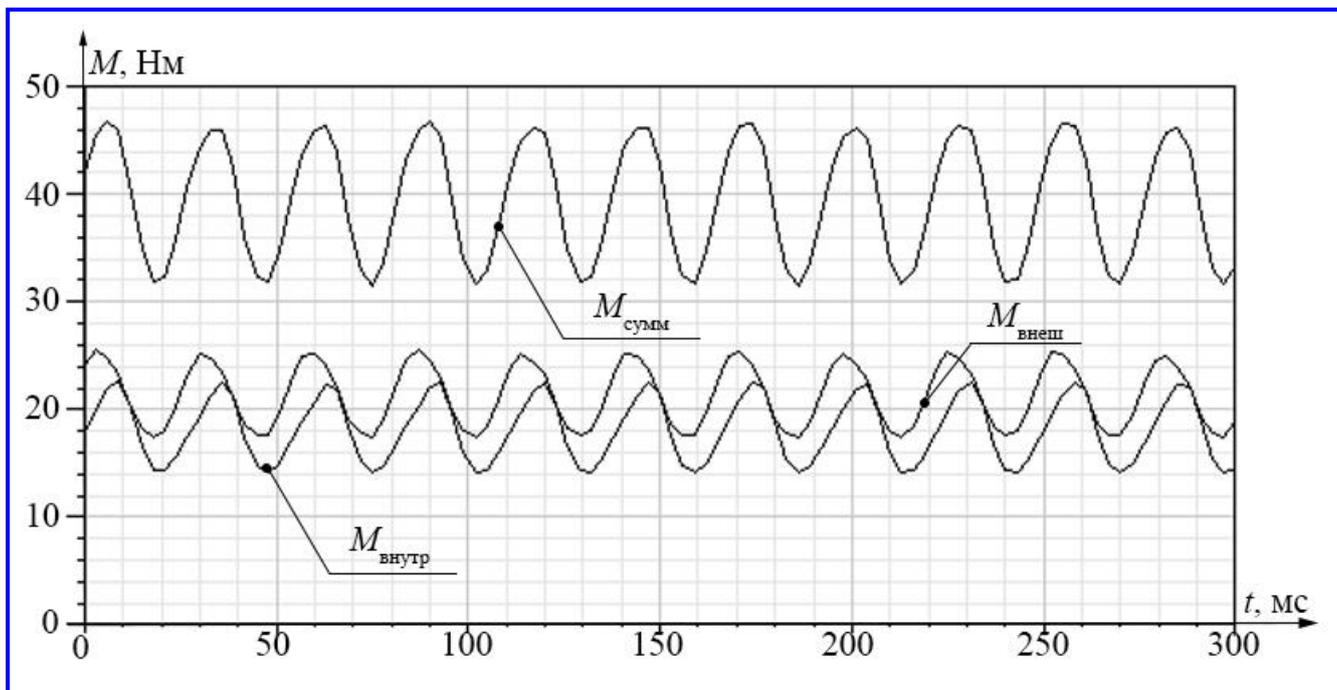


Рис. 9. Момент машины, приведенной на рис. 8

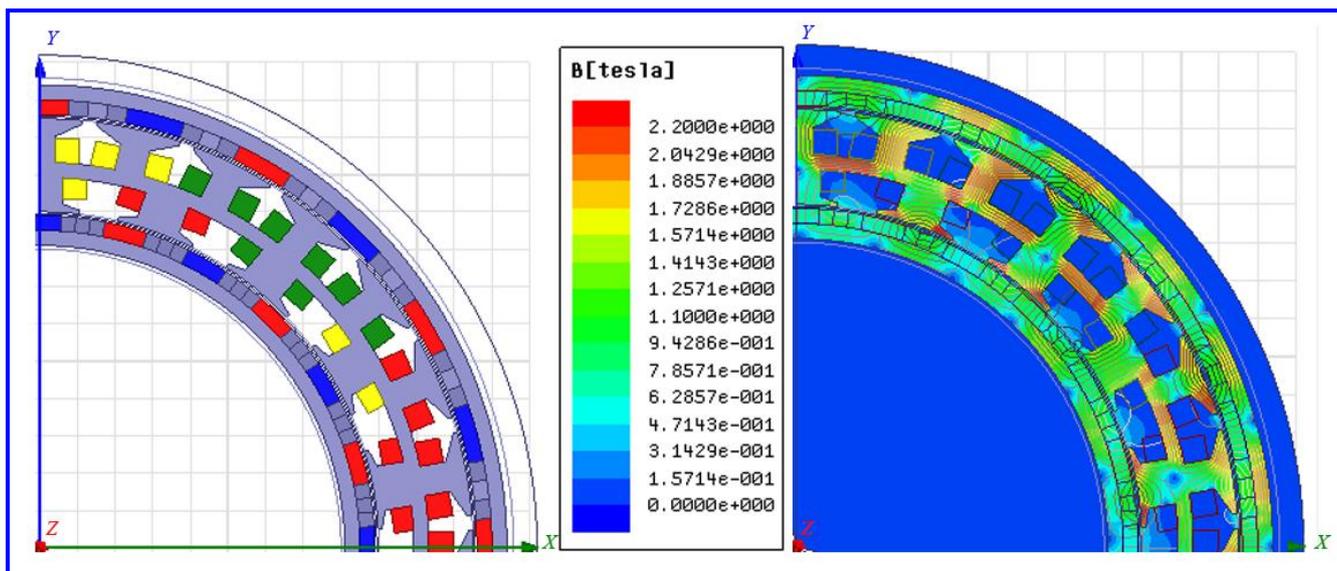


Рис. 10. Модель и результаты расчета магнитного поля машины с разным числом зубцов на внутренней и внешней частях статора при встречном положении роторов

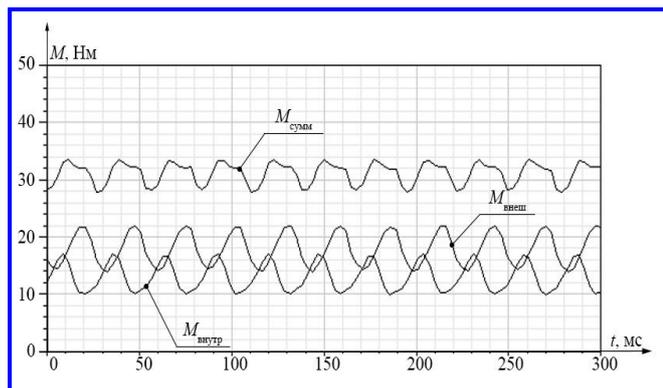


Рис. 11. Момент машины, приведенной на рис. 10

Графики момента для этого варианта показаны на рис. 11. Момент внутреннего ротора – 13,2 Нм, момент внешнего ротора – 17,9 Нм, суммарный момент – 31,2 Нм, пульсации – 5,7 Нм. При встречном расположении роторов величина момента уменьшилась, а форма стала более гладкой.

#### Выводы

1. При добавлении ярма и сохранении числа зубцов на внутренней и внешней частях статора момент практически не изменился. Плотность тока при этом увеличилась.

Поступила в редакцию 19.04.2022

Андрей Борисович Захаренко, начальник отдела,  
доктор технических наук, доцент, т.: 366-26-44, e-mail: otde118@mcc.vniiem.ru.  
Александр Каренович Надкин, старший научный сотрудник,  
кандидат технических наук, т.: 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.  
(АО «Корпорация ВНИИЭМ»).

## INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF A SYNCHRONOUS MOTOR WITH TWO INDUCTORS AND PERMANENT MAGNETS ARRANGED ACCORDING TO HALBACH SCHEME WITH VARIOUS STATOR OPTIONS

A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin

The design of two-rotor synchronous motors with permanent magnets without a frame yoke has become widely used. This machine is used as a motor-wheel for light vehicles drive. To analyze its optimality, the authors of this article consider the options of two-rotor synchronous motors with permanent magnets having a complete Halbach scheme and various stator configurations: yokeless, with a yoke and the same number of teeth on the external and internal parts, with a yoke and different number of teeth on the external and internal parts. The considered stator modifications add complexity to the design on the one hand, but on the other hand may facilitate the improvement of torque or reduce its pulsations.

**Key words:** magnetoelectric machine, electromagnetic torque, Halbach scheme.

#### References

1. Patent of invention No. 2771993 Russian Federation. Electrical machine with a rotor developed according to Halbach scheme: No. 2020133981: appl. dated 15.10.2020 / Dashko O. G., Zakharenko A. B., Zenin S. B., Litvinov V. N. – Bull. No. 14. – p. 10.

2. Optimization of designing of a low-speed permanent magnet motor with two inductors for motor-wheels drive / A. B. Zakharenko, A. F. Avdonin // Electrical engineering, – 1999. – No. 12. – Pp. 6 – 13.

***Andrei Borisovich Zakharenko**, Head of Department, Doctor of Technical Sciences,  
Associate Professor, tel.: +7 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.  
**Aleksandr Karenovich Nadkin**, Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences,  
tel.: +7 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.  
(JC «VNIEM Corporation»).*