

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

**Н. М. Максимов**, [maximovnm@susu.ru](mailto:maximovnm@susu.ru)

**И. Н. Головань**, [golovanin@susu.ru](mailto:golovanin@susu.ru)

**В. А. Кушнарёв**, [a55538a@yandex.ru](mailto:a55538a@yandex.ru)

**В. Ф. Бухтояров**, [bvf@chelkom.ru](mailto:bvf@chelkom.ru)

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Роль электрического двигателя в промышленности однозначно высока. Однако, говоря о сложных механизмах, использование электромеханических преобразователей конкретной серии нецелесообразно, ввиду малого энергоэффективности. В технической литературе электроприводками применялся термин “именные” электрические машины, т.е. машины, изготовленные для конкретного технологического механизма, например, именной двигатель главного привода стана 5000 ММК (установленная мощность одного двигателя составляет 12 МВт). Самым распространенным типом является асинхронный ввиду явных преимуществ. Развитие полупроводниковой техники позволяет расширить рамки регулирования и управления АД, что в свою очередь меняет вектор в производстве электрических машин. Главной идеей – создание максимально энергоэффективного электродвигателя путем изменения геометрии статора и ротора, формы напряжения, количества фаз, числа полюсов и т.д. Таким образом, для осуществления имеющейся идеи необходимо произвести исследования области формирования магнитного поля, путем использования параметрической оптимизации и достижения максимального среднеквадратичного момента.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, форма фазного напряжения, параметрическая оптимизация, многофазная обмотка статора, электропривод

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20145, <https://rscf.ru/project/22-29-20145/>.

**Для цитирования:** Повышение энергоэффективности асинхронной электрической машины за счет оптимизации удельных показателей / Н. М. Максимов, И. Н. Головань, В. А. Кушнарёв, В. Ф. Бухтояров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 4. С. 56–65. DOI: 10.14529/power230406

Original article  
DOI: 10.14529/power240106

## INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF AN INDUCTION MOTOR DUE TO OPTIMIZATION OF SPECIFIC INDICATORS

**N. M. Maksimov**, [maximovnm@susu.ru](mailto:maximovnm@susu.ru)

**I. N. Golovan**, [golovanin@susu.ru](mailto:golovanin@susu.ru)

**V. A. Kushnarev**, [a55538a@yandex.ru](mailto:a55538a@yandex.ru)

**V. F. Bukhtoyarov**, [bvf@chelkom.ru](mailto:bvf@chelkom.ru)

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The role of the electric motor in industry is clearly high. However, speaking about complex mechanisms, the use of electromechanical converters of a specific series is impractical due to low energy efficiency. In the technical literature, electric drives used the term “registered” electric machines, i.e. machines manufactured for a specific technological mechanism, for example, the nominal motor of the main drive of the 5000 MMK mill (the installed power of one motor is 12 MW). The most common type is asynchronous due to its obvious advantages. The development of semiconductor technology makes it possible to expand the scope of regulation and control of IM, which in turn changes the vector in the production of electrical machines. The main idea is to create the most energy-efficient electric motor by changing the geometry of the stator and rotor, voltage shape, number of phases, number of poles, etc. Thus, to implement the existing idea, it is necessary to study the region of magnetic field formation by using parametric optimization and achieving the maximum root-mean-square torque.

**Keywords:** induction motor, phase voltage form, parametric optimization, polyphase stator winding, electric drives

**Acknowledgments.** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-20145, [https://rscf.ru/project/22-29-20145](https://rscf.ru/project/22-29-20145/).

**For citation:** Maksimov N. M., Golovan' I. N., Kushnarev V. A., Bukhtoyarov V. F. Increasing the energy efficiency of an induction motor due to optimization of specific indicators. *Bulletin of the South Ural State University*.

**Введение**

Современная промышленность все чаще сталкивается с потребностью в энергоэффективном электроприводе. Самым лучшим решением является использование пары полупроводниковый преобразователь – электрический двигатель. При этом наблюдается увеличение КПД, снижению электрических потерь, а также гибкость управления скорости. Однако главной проблемой в данной коллаборации является неоптимизированная геометрия электропривода, базирующаяся на стандартных шаблонах, принятых советскими инженерами в 20 веке. Геометрия серийных электрических двигателей была рассчитана от питания от сети, с помощью управления через дополнительные электрические устройства.

Таким образом, главной задачей современных производителей электрических двигателей состоит

в оптимизации геометрии. Помимо достижения высоких энергетических показателей так же можно достичь высоких удельных показателей таких как масса и геометрия магнитопровода, уменьшение массы ротора, которое в свою очередь может увеличить быстродействие привода и расширить рамки управления при позиционировании [1,2,3]. Необходимо отметить применения современных материалов в проектировании электродвигателей. Это позволяет сократить потери в стали, улучшить электро-магнитные свойства. Так применения анизотропной стали в производстве ротора в синхронных реактивных машинах позволяет увеличить отношение индуктивностей  $L_d/L_q$  и увеличить тем самым электромагнитный момент, развиваемый двигателем[4].

Так как на сегодняшний день использование асинхронного двигателя широко распространено в промышленности ввиду очевидных преимуществ.

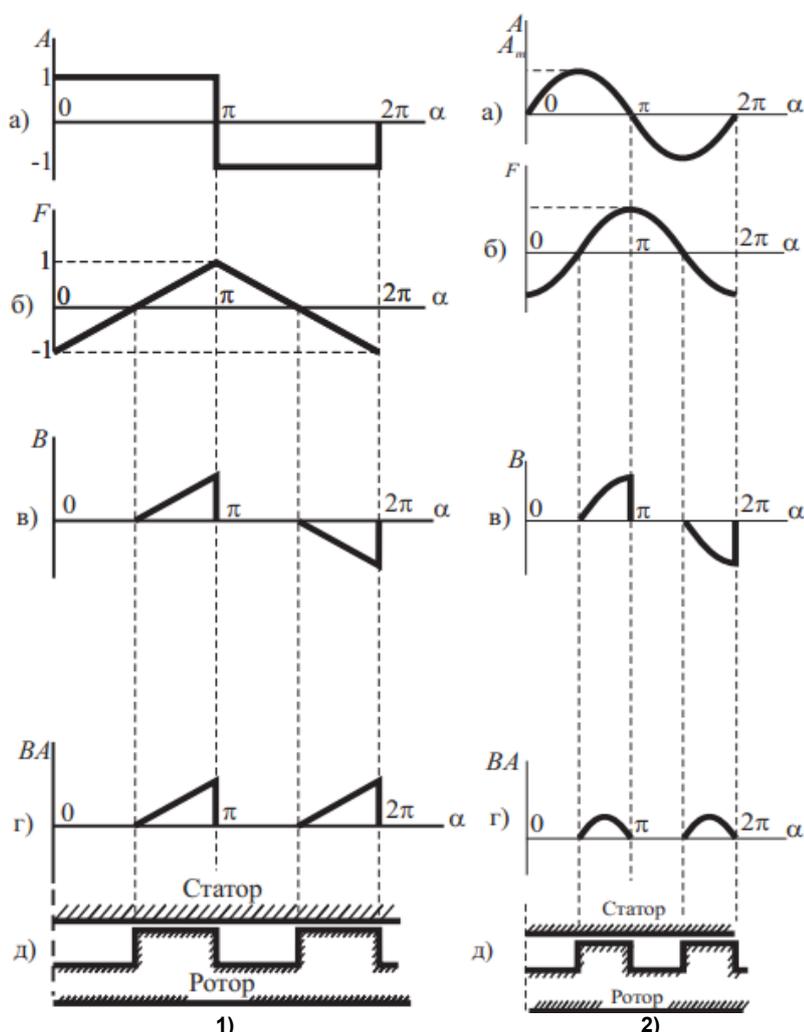


Рис. 1. Диаграммы распределения вдоль окружности расточки статора линейной нагрузки (а), МДС (б), магнитной индукции в зазоре (в) и удельного касательного усилия (г) при заданном положении ротора (д) при прямоугольном (1) и синусоидальном (2) графике линейной нагрузки

Fig. 1. Distribution diagrams along the circumference of the stator bore of linear load (a), MF (b), magnetic induction in the gap (c) and specific tangential force (d) at a given rotor position (e) for rectangular (1) and sinusoidal (2) linear load graph

Однако, не смотря на большой скачок возможностей преобразовательной техники, использование других типов электрических двигателей ограничено. Таким образом, поставлена задача по модернизации конструкции асинхронный двигатель следующим путем:

- выбор формы фазного напряжения, а также выбор количество питающих фаз;
- параметрическая оптимизация геометрии статора, в заданных условиях номинальной работы электродвигателя.

Выбор оптимальной формы питающего напряжения обусловлено достижением максимальной производительности машины. С учетом развития управления электродвигателей, в частности ПЧ-АД, открывается возможность по созданию любой формы питающего напряжения.

### Методы и способы исследования

У каждой формы фазового напряжения есть свои достоинства и недостатки: синусоида имеет плавное нарастание напряжение, что исключает перенапряжение. Выделяют две основные формы: синусоидальная и прямоугольная форма. Каждая из форм имеет свои достоинства и недостатки. Так синусоидальная форма имеет плавное изменение значений напряжения и тока, не имеет перенапряжений, скачков тока, которые негативно влияют на работу электромеханических преобразователей. Однако, система управления осложняется созданием синусоидальной формы тока с помощью ШИМ и т.д. В этом случае предпочтение можно отдать прямоугольной форме тока. Это позволит улучшить массогабаритные показатели электро механической части электропривода. Чтобы убедиться в правильном выборе формы напряжения и тока обратимся к диаграммам распределения линейной нагрузки, индукции, удельного касательного усилия. При этом возьмем идеальную электрическую машину, у которой ротор идеальную неявнополюсную конструкцию, а обмотка статора создает равномерную линейную нагрузку.

Если пространственную волну линейной нагрузки  $A$  принять идеальной прямоугольной формы (рис. 1-1 а), то зависимость МДС опишется ло-маной (рис. 1-1 б), индукция в воздушном зазоре – дискретной кривой (рис. 1-1 в), а удельная касательная сила – кривой (рис. 1-1 г). Эти зависимости изображены, когда ротор двигателя занимает положение, соответствующее максимальному электромагнитному моменту (рис. 1-1.д).

Когда пространственная волна линейной нагрузки  $A$  имеет синусоидальную форму (рис. 1-2 а), то зависимость МДС описывается косинусоидой (рис. 1-2 б), индукция в воздушном зазоре – дискретной кривой (рис. 1-2 в) и удельная касательная сила – кривой (рис. 1-2 г).

В результате при равных среднеквадратичных токах электродвигатель с синусоидальной формой линейной нагрузки развивает меньший электро-

магнитный момент. Это можно судить по формулам, представленным ниже, которые характеризуют электромагнитный момент для каждой из форм:

$$M = RQ = 2RL \int_{\pi/2}^{\pi} \left(-1 + \frac{2\alpha}{\pi}\right) \cdot 1 \cdot d\alpha = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$M = RQ = 2RL \int_{\pi/2}^{\pi} \left(-\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha\right) \cdot \sqrt{2} \sin \alpha d\alpha = \frac{4}{\pi}$$

Сопоставляя величины электромагнитного момента при прямоугольной пространственной волне линейной нагрузки и синусоидальной, видим, что в первом случае электродвигатель развивает удельный электромагнитный момент больше в 1,23 раза. Таким образом, прямоугольная форма питающей сети предпочтительнее для исследуемого синхронного реактивного двигателя.

Переход к прямоугольной форме тока улучшает энергетические показатели электропривода, однако при этом появляются коммутационные пульсации момента, вызванные мгновенным переключением обмоток. Соответственно, чем меньше число фаз, тем дальше ротор отклоняется от оптимальной точки угловой характеристики. В этой связи оптимальным является число фаз, равное 6. При увеличении числа фаз схема значительно усложняется и удорожается. При меньшем же числе фаз заметно увеличиваются коммутационные пульсации момента, что сильно сказывается на нагреве машины. В идеальном случае, когда число фаз привода равно бесконечности, оптимальной формой тока является прямоугольник. Однако в реальном случае ток не может мгновенно изменить направление, т.к. это станет причиной перенапряжений. Особенно заметно это проявится на большей частоте коммутации. Таким образом, принимается число фаз равное 6.

В случае оптимизации геометрии электрического двигателя необходимо определить метод оптимизации. Электромагнитный момент, создаваемый магнитным полем, зависит от гармонического спектра магнитодвижущих сил, а точнее векторного произведения:

$$M_i = \frac{m}{2R} |F_{Ai} F_{Bi}| = \frac{m}{R} S_i, \quad (2)$$

где,  $m$  – число фаз,  $R$  – магнитное сопротивление потоку в электрической машине,  $F_{Ai} F_{Bi}$  – амплитудные значения  $i$  гармоник МДС, создаваемых обмотками, расположенными над полюсом и над межполюсными промежутком соответственно,  $S_i$  – площадь треугольника, образованного векторами-слагаемыми,  $F_{Ai} F_{Bi}$  и  $F_i$  – вектором суммой [3]. Как правило, чтобы увеличить эффективность электрического преобразователя – минимизировать потери в активной части. Для этого воспользуемся критерием, предложенным Усыниным Ю.С.[2]:

$$q = \sum \frac{Q_i}{M_i}, \quad (3)$$

где  $Q_i$  – затраты на активные материалы.

В затраты на активные материалы входят весовые коэффициенты, которые в свою очередь

**Максимов Н. М., Головань И. Н., Кушнарёв В. А., Бухтояров В. Ф. Повышение энергоэффективности асинхронной электрической машины за счет оптимизации удельных показателей**

характеризуются отношением внутреннего и внешнего диаметра статора машины, количества фаз, число пар полюсов, а формы питающего напряжения. Таким образом, задачей оптимизацией в случае представленного критерия является достижение минимального значения  $q$  путем подбора соотношений между массами железа, меди и т.д.

За опытную модель в качестве исследований принят асинхронный электрических двигатель с короткозамкнутым ротором. Номинальные параметры представлены в таблице 1.

**Таблица 1**  
**Технические параметры исследуемого электрического двигателя**

Параметр	Значение
Мощность, кВт	1000
Номинальное напряжение, В	660
Частота	50
Номинальный ток, А	1085
Номинальная частота вращения, об/мин	990
КПД	0,96
cosφ	0,84

**Исследование и анализ математической модели**

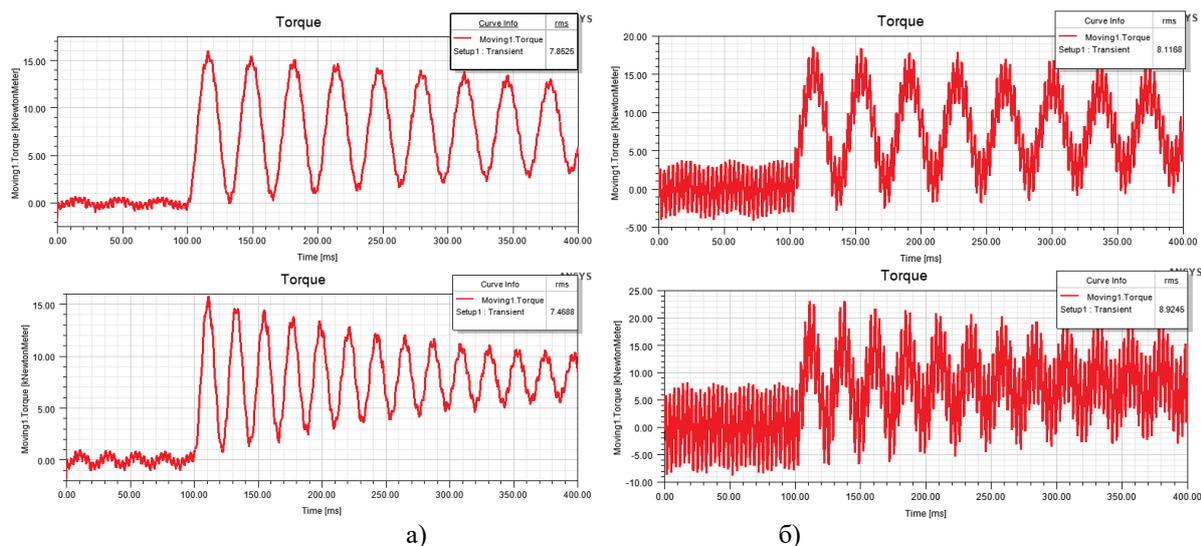
В программной среде ANSYS Electronics Desktop создана математическая модель с геометрией и номинальными параметрами представленного электрического двигателя.

Исследования проводятся в следующих условиях: на обмотки статора от источника тока будет подан ток равного значения и частоты. Для того чтобы ускорить время переходного процесса, частота вращения вала двигателя ровняется номинальной скорости вращения. После установивше-

гося переходного процесса холостого хода, производится наброс нагрузки, равной номинальному моменту электрического двигателя. Цель данного эксперимента – рассмотреть скорость затухания колебаний в контуре скорости и напряжения, зафиксировать амплитуды электромагнитного момента, наводимого напряжения и т.д. Полученные результаты представлены на рисунке 2

В зависимости от полученных данных в случае с трапецидальной формой тока появляются пульсации электромагнитного момента. Наблюдается наглядная тенденция увеличения числа и амплитуды пульсаций с увеличением числа фаз. Это происходит из-за бросков напряжения, наводимого в обмотках статора. На рисунке изображены переходные процессы напряжения в обмотках статора для трех фазной и шести фазной обмоток. Как видно из рисунков в 6-фазном исполнении амплитуда пульсации достигает до 1,6кВ, что напрямую влияет на электромагнитный момент, так как момент прямо пропорционально зависит от квадрата напряжения [6,7].

На следующем этапе произведен параметрический анализ, позволяющий варьировать пользовательский параметр в определенной области данных. Для этого необходимо рассматривать электромагнитную систему в статике. Для исследования спроектированы обмотки машины в момент максимальной амплитуды тока в момент времени. В этом случае определяется оптимальное отношение варьируемого параметра к электромагнитному параметру машины. В качестве варьируемого параметра приняты параметры статорного зубца и величина диаметра статоры. Параметры ротора в этом случае не учитываются, так как рассматривается АД с короткозамкнутой обмоткой



**Рис. 2. Переходные процессы момента при постоянном синусоидальном (а) и трапецидальном (б) токе для трех и шести фаз**

**Fig. 2. Transient torque processes at constant sinusoidal (a) and trapezoidal (b) current for three and six phases**

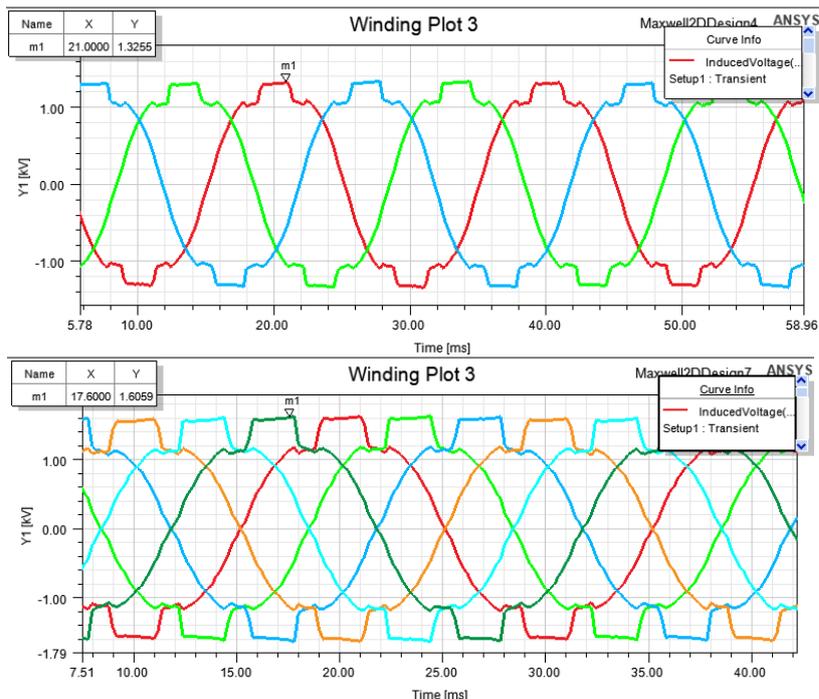


Рис. 3. Пульсации напряжения в обмотках статора при трапецидальном токе  
Fig. 3. Voltage ripple in the stator windings with trapezoidal current

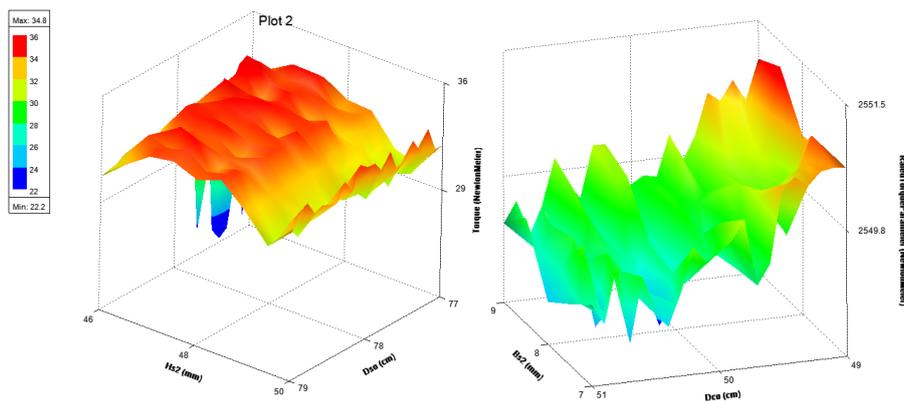


Рис. 4. Зависимость электромагнитного момента от высоты паза статора и внешнего диаметра статора для трехфазной обмотки: а) трапецидальная форма тока; б) синусоидальная форма тока  
Fig. 4. Dependence of the electromagnetic torque on the height of the stator slot and the outer diameter of the stator for a three-phase winding: a) trapezoidal current shape; b) sinusoidal current shape

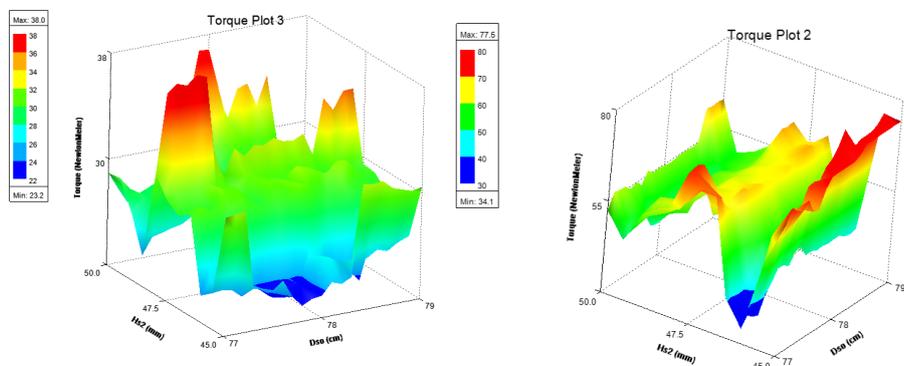


Рис. 5. Зависимость электромагнитного момента от высоты паза статора и внешнего диаметра статора для шестифазной обмотки: а) трапецидальная форма тока, б) синусоидальная форма тока  
Fig. 5. Dependence of the electromagnetic torque on the height of the stator slot and the outer diameter of the stator for a six-phase winding: a) trapezoidal current shape, b) sinusoidal current shape

### **Вывод**

Анализ полученных результатов областей параметрической оптимизации геометрии по двум основным параметрам статора показал, что в случае оптимизации для трапециевидальной формы напряжение результат оптимизации не очевиден. Наблюдается разброс полученных данных, которые не позволяют определить вектор оптимизации геометрии, что впоследствии подтверждает теорию необходимости пересмотреть конструкцию обмотки, соединение катушечных групп и также формы ротора двигателя. Для предложенной конструкции использование трапециевидальной формы напряжения не целесообразно и не энергоэффективно.

В случае с синусоидальной формой напряжения наблюдается четкая тенденция по уменьше-

нию пазовой зоны статора. В случае изменения спинки статора необходимо понимать, в каких условиях работает электрический двигатель. Необходимо отметить, что для улучшения данных показателей ведет к увеличению диаметра статора, что в свою очередь приведет к увеличению массогабаритных показателей и как следствие ухудшению удельного отношения массы к мощности.

Увеличение числа фаз в статорной обмотке в обоих случаях показывает положительную тенденцию по быстродействию переходного процесса. Время переходного процесса для двигателя с 6 фазной обмоткой сокращается в 2 раза (рис.2), перерегулирование для двух исполнений остается неизменным и составляет 87%. Данное завышенное значение обусловлено ограничением тока статора в ходе исследования.

### **Список литературы**

1. Выбор силовых элементов электропривода стана холодной прокатки труб ХПТ-450 ПАО "ЧТПЗ" / И. Ю. Холодили, А. В. Коржов, М. А. Григорьев [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 102-109. – DOI 10.14529/power210412
2. Система электропривода стана прокатки труб ПАО "ЧТПЗ" / Н. М. Максимов, Н. В. Савостеенко, В. А. Кушнарёв, Д. Ю. Хрюкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 76-82. – DOI 10.14529/power220308
3. Коржавин, М. Е. Система электроприводов механизмов поворота и подачи трубы стана ХПТ-250 / М. Е. Коржавин, Е. С. Чупин, М. А. Григорьев // Электротехника. – 2020. – № 5. – С. 8-12.
4. Параметрическая оптимизация синхронного электропривода с улучшенными массогабаритными показателями / А. Н. Горожанкин, М. А. Григорьев, А. М. Журавлев, Д. А. Сычев // Электротехника. – 2015. – № 12. – С. 19-22.
5. Optimisation of new types of electromechanical converters for mechanisms with fan-type loads / N. V. Savosteenko, K. D. Semenova, D. Yu. Khriukin, N. M. Maksimov // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. – 2022. – Vol. 22, No. 1. – P. 89-96. – DOI 10.14529/power220110.
6. Горожанкин, А. Н. особенности синтеза синхронных реактивных и индукторных электрических машин / А. Н. Горожанкин, А. В. Коржов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 81-91. – DOI 10.14529/power220208
7. Сравнительная оценка способов питания СДПМ в режиме вентильного двигателя / С. Г. Воронин, Д. А. Курносов, Н. В. Клиначев, Н. Ю. Кулева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 52-61. – DOI 10.14529/power220306

### **References**

1. Parametric optimization of a synchronous electric drive with improved weight and size parameters / A. N. Gorozhankin, M. A. Grigoriev, A. M. Zhuravlev, D. A. Sychev // *Electrical engineering*. – 2015. – No. 12. – P. 19-22.
2. Electric drive system of the pipe rolling mill of PJSC "ChTPZ" / N. M. Maksimov, N. V. Savosteenko, V. A. Kushnarev, D. Yu. Khryukin // *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. – 2022. – T. 22, No. 3. – P. 76-82. – DOI 10.14529/power220308
3. Korzhavin, M. E. A Power Drive System for Pipe Rotation and Delivery Mechanisms of a KhPT-250 Cold Rolling Mill / M. E. Korzhavin, E. S. Chupin, M. A. Grigor'ev // *Russian Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 91, No. 5. – P. 298-301. – DOI 10.3103/S1068371220050065.
4. Selection of power elements of the electric drive of the cold pipe rolling mill KhPT-450 PJSC "ChTPZ" / I. Yu. Kholodilin, A. V. Korzhov, M. A. Grigoriev [etc.] // *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. – 2021. – T. 21, No. 4. – P. 102-109. – DOI 10.14529/power210412
5. Optimisation of new types of electromechanical converters for mechanisms with fan-type loads / N. V. Savosteenko, K. D. Semenova, D. Yu. Khriukin, N. M. Maksimov // *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. – 2022. – Vol. 22, No. 1. – P. 89-96. – DOI 10.14529/power220110.
6. Gorozhankin, A. N. Features of the synthesis of synchronous reluctance and inductor electrical machines / A. N. Gorozhankin, A. V. Korzhov // *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. – 2022. – T. 22, No. 2. – P. 81-91. – DOI 10.14529/power220208

7. Comparative assessment of power supply methods for PMSM in the switching motor mode / S. G. Voronin, D. A. Kurnosov, N. V. Klinachev, N. Yu. Kuleva // *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering.* – 2022. – Т. 22, No. 3. – P. 52-61. – DOI 10.14529/power220306

***Информация об авторах***

**Максимов Никита Максимович**, аспирант, кафедра электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; maximovnm@susu.ru

**Головань Игорь Николаевич**, аспирант, кафедра электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; golovanin@susu.ru

**Кушнарев Виктор Александрович**, студент, кафедра техники, технологий и строительства, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; a55538a@yandex.ru.

**Бухтояров Василий Федорович**, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; bvf@chelkom.ru

***Information about the authors***

**Nikita M. Maksimov**, Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; maximovnm@susu.ru.

**Igor' N. Golovan'**, Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; golovanin@susu.ru.

**Victor A. Kushnarev**, Bachelor Student, Department of Engineering, technology and construction, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; a55538a@yandex.ru

**Vasiliy F. Bukhtoyarov**, Dr. of Tech. Sc., Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; bvf@chelkom.ru

*Статья поступила в редакцию 20.09.2023; одобрена после рецензирования 15.10.2023; принята к публикации 15.10.2023.*

*The article was submitted 20.09.2023; approved after review 15.10.2023; accepted for publication 15.10.2023.*