УДК 621.313.13:621.311

**ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИНЦИПА СОВМЕЩЕННЫХ ОБМОТОК
НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ
КАК СРЕДСТВО УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

¹Дуюнов Д.А., ¹Дуюнов Е.Д., ²Теплова Я.О., ³Колдаев В.Д., ⁴Кошлич Ю.А.

¹ООО «АС и ПП», Москва, e-mail: dyunov@yandex.ru;

²ООО «АСпротм», Москва, e-mail: yana.teplova@gmail.com;

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт
электронной техники», Москва, e-mail: koldaev.v@mail.ru;

⁴ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: koshlich@yandex.ru

Статья посвящена исследованию возможностей повышения энергетических и эксплуатационных характеристик электроприводов на базе асинхронных электрических двигателей (АСД). Предложена технология повышения энергоэффективности АСД, основанная на применении новых конструкций так называемых совмещенных обмоток и метода машинного проектирования. Проектирование выполняется на основе компьютерного моделирования и разработки конструктивных решений по результатам анализа моделей и компьютерных симуляций. Предлагаемые решения реализованы на практике. Исследованы результаты сравнительных испытаний образцов серийно производимого двигателя общепромышленного назначения стандартного исполнения и модернизированного двигателя с заменой обмоток. Установлено, что применение решений позволяет существенно улучшать эксплуатационные характеристики двигателя. Выполнено компьютерное моделирование работы серийно выпускаемого асинхронного двигателя в стандартном исполнении, двигателя с совмещенными обмотками (модernизированного) и перепроектированного. Результаты моделирования показали, что модернизация приводит к существенному снижению общих потерь в элементах магнитопровода двигателя, повышению его перегрузочной способности и повышению удельной мощности. Также выявлена целесообразность перепроектирования серийных двигателей в зависимости от режимов работы, области применения и т.д. Установлено снижение энергопотребления для исследуемого двигателя на 12–14%. В целом использование совмещенных обмоток для двигателей, работающих с регулярно меняющейся нагрузкой и при перепадах питающего напряжения, а также их перепроектирование на основе анализа результатов компьютерного моделирования позволяет существенно снижать потребление электроэнергии.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный двигатель, совмещенные обмотки, энергоэффективность, эксплуатационные характеристики привода, компьютерное моделирование

**INDUCTION MOTORS REDESIGN USING THE COMBINED WINDINGS
PRINCIPLE BASED ON COMPUTER MODELS STUDY AS A MEANS
OF IMPROVING THE ENERGY-EFFICIENCY AND PERFORMANCE
CHARACTERISTICS OF ELECTRIC DRIVES**

¹Duyunov D.A., ¹Duyunov E.D., ²Teplova Ya.O., ³Koldaev V.D., ⁴Koshlich Yu.A.

¹«AS & PP» LLC, Moscow, e-mail: dyunov@yandex.ru;

²«ASpromt» LLC, Moscow, e-mail: yana.teplova@gmail.com;

³National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, e-mail: koldaev.v@mail.ru;

⁴The Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Technological
University named after V.G. Shukhov», Belgorod, e-mail: koshlich@yandex.ru

The article is dedicated to the study of ways for improving electric drives based on induction motors (IM) power and performance characteristics. The technology of increasing IM energy effectiveness based on new schemes of so-called combined windings construction and computer-aided design method is proposed. The CAD method is based on computer simulation and construction solutions development using results of computer models and simulations analysis. The results of comparative tests of a standard-produced general industries electric motor with standard design, a modernized motor with the standard windings replaced by the combined ones are studied. The results showed that implementing the proposed solutions allows significantly improve IM performance characteristics. The computer simulation of the mass-produced asynchronous motor in the standard version, the engine with the combined windings (modernized) and the redesigned was carried out. The simulation results showed that modernization leads to a significant reduction in overall losses in motor magnetic circuit elements, increases its overload capacity and the specific power. Also, the practicability of motors redesign is revealed due to the significant possibilities of operational characteristics improving depending on the operation modes, the field of application, etc. A decrease in energy consumption for the engine under study was found to be 12–14%. In general, the use of combined windings for IM operation with a regularly changing load and with variations in the supply voltage, as well as their redesign based on analysis of the computer simulation results, can significantly reduce power consumption.

Keywords: electric drive, induction motor, combined windings, energy efficiency, drive operational characteristics, computer simulation

В числе ключевых стратегических задач развития экономики выделяют задачи энергосбережения и снижения энергоемкости ВВП (Федеральный закон № 261-ФЗ). Энергосбережение в любой сфере сводится по существу к снижению потерь энергии. Известно, что большая часть потерь (до 90 %) приходится на сферу энергопотребления. Структуру потребителей электроэнергии обобщенно можно представить следующим образом: электроприводы, в первую очередь общепромышленного назначения, – 62 %, электрический транспорт – 9 %, электротермия и электротехнология – 8 %, освещение и прочие потребители – 21 %. Наиболее широко в составе электропривода применяются асинхронные электродвигатели (АД). На сегодняшний день насчитываются тысячи видов и наименований таких машин, применяемых практически во всех областях деятельности. Соответственно, задачи улучшения характеристик АД представляются ключевыми в контексте снижения энергоемкости технологических процессов [1, 2]. Так, в странах Европейского союза Директива ЕС 640/2009, предписывающая соответствие требованиям класса энергоэффективности IE3 (Premium Efficiency), начиная с января 2015 г. распространяется на двигатели номинальной мощностью 7,5–375 кВт и с 2017 г. на двигатели мощностью 0,75–375 кВт [3].

Со времени изобретения АД лишь в течение последних десятилетий технология их изготовления подвергалась модернизации: за рубежом в заметном количестве на фоне мирового годового выпуска более 7 млрд двигателей производятся так называемые энергоэффективные двигатели. Необходимо отметить, что они достигают наилучших характеристик в номинальных режимах при постоянных нагрузке и напряжении питающей трехфазной сети. При этом в условиях реальной эксплуатации большинства электрических приводов значительная часть времени работы АД приходится на переходные процессы. Соответственно, применяемые энергоэффективные АД не могут заменить в большинстве случаев, как правило, более дорогостоящие и менее надежные двигатели постоянного тока.

На сегодняшний день повышение энергоэффективности АД достигается преимущественно за счет увеличения доли новых дорогостоящих электротехнических материалов. В качестве возможных путей решения задач улучшения энергетических и эксплуатационных характеристик АД предлагается применение новых конструкций совмещенных обмоток (СО), при которых схемы обмоток совмещают в себе сое-

динения типов «звезда» и «треугольник» [4, с. 150, 5], а также использование специализированных информационных технологий и компьютерных моделей для проектирования и перепроектирования энергоэффективных электрических машин. Технология СО имеет доказанную эффективность, подтвержденную опытно-промышленной эксплуатацией на предприятиях в РФ модернизированных серийных АД, при этом не утрачивает актуальности необходимость ее развития и создания новых конструктивных решений, удовлетворяющих повышающимся требованиям к качеству технологических процессов [6, с. 12].

На сегодняшний день широко применяются методы математического описания оборудования, расчета и анализа электромагнитных и электромеханических процессов, а также методы решения задач, которые возникают в процессе моделирования и анализа конструкций электроприводов. Одной из центральных задач машинного проектирования АД является моделирование параметров электромагнитных полей с достаточной точностью и достоверностью для разработки конструктивных решений, обеспечивающих улучшение прежде всего моментных характеристик АСД [7, с. 34, 35, 8, с. 43]. Ряд ученых и специалистов считают, что проектирование современных асинхронных двигателей с позиций идеализированной асинхронной машины является недостаточно обоснованным, потому что использование аналитической теории асинхронной машины в некоторых случаях приводит к возникновению существенных погрешностей при проектировании. Для проектирования АД рекомендуют применять аналитическую теорию асинхронной машины с учетом того, что допущения идеализированной машины зачастую могут приводить к наличию значительных погрешностей.

Для решения задач повышения энергоэффективности АД и реализации преимуществ конструкций СО предложена разработка конструктивных решений на основе параметрической оптимизации и расчета характеристик АД в специализированных программных средах. В частности, для расчета, моделирования разработки и проверки конструктивных решений была выбрана среда ANSYS Maxwell. Она позволяет выполнять аналитический расчет характеристик электрической машины с учетом ее типа, геометрических параметров, свойств материалов, параметров обмоток, моделирования напряженности магнитного поля, индукции, магнитного потока и др., использовать параметрический анализ и методы

оптимизации, а также работать с постпроцессором для расчета и оптимизации решений, основанных на анализе создаваемых компьютерных моделей [9]. При моделировании АСД исследуются конструкции обмоток и элементов магнитопровода машины для создания конструктивных решений, обеспечивающих достижение целевых показателей выбранных параметров, а также учитываются результаты промежуточных испытаний создаваемых образцов для доработки моделей и решений [10, с. 47].

Сравнение результатов серии проведенных лабораторных испытаний общепромышленных АСД с результатами анализа моделей тех же машин показало расхождение, не превышающее 1%, что позволило сделать вывод о высокой достоверности методов машинного проектирования, основанных на исследовании компьютерных мо-

делей, создаваемых с помощью выбранного инструментария.

В табл. 1 представлены результаты измерения электрических параметров в ходе сравнительных испытаний АД АИР 71В4 с неизменной заводской трехфазной обмоткой и с разработанной на основе результатов моделирования совмещенной обмоткой статора, выполненных на базе лаборатории БГТУ им. В.Г. Шухова: 1 – АСД заводского исполнения, 2 – модернизированный АСД с СО. В качестве нагрузки к выходной цепи генератора присоединялись автомобильные лампы накаливания, набранные группами для создания нагрузки в (10, 25, 50, 75, 100, 125)% от паспортной номинальной мощности АД (0,75 кВт).

Рис. 1–3 иллюстрируют изменения характеристик АД в результате замены обмоток на совмещенные.

Рис. 1. Графики тока и активной мощности сравниваемых образцов АД

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний АД АИР 71В4 в заводском исполнении и после модернизации

Нагрузка, % от номинальной	0 (без ремня)		10		25		50		75		100		125		Улучшение характеристики, раз
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Ток, А	2,2	1,1	2,2	1,2	2,2	1,25	2,15	1,4	2,2	1,6	2,3	1,8	2,5	2,13	2,00
Активная мощность Р	228	91	331	212	545	433	705	600	890	794	1030	945	1300	1235	2,51
Реактивная мощность ВАр	1520	796	1430	780	1350	753	1283	743	1250	760	1200	770	1158	823	1,91
Полная мощность ВА	1540	800	1470	803	1450	872	1470	954	1527	1104	1585	1217	1748	1490	1,93
Cos φ (коэффициент мощности)	0,14	0,12	0,22	0,26	0,3	0,36	0,47	0,72	0,58	0,72	0,65	0,77	0,74	0,83	1,17

Рис. 2. Графики реактивной мощности и полной мощности сравниваемых образцов АД

Рис. 3. Графики изменения коэффициента мощности сравниваемых образцов АД

Было установлено, что значительное изменение основных характеристик АД № 2 обусловлено непосредственно модернизацией и находится за пределами погрешности измерений. Зафиксировано существенное улучшение характеристик АД практически во всех режимах и рост КПД в более широком диапазоне нагрузок. Результаты позволяют сделать вывод о том, что в процессе реальной эксплуатации привод с модернизированным двигателем позволит получить сокращение энергопотребления в пределах 14–20 % от фактического потребления привода с двигателем в заводском исполнении.

Необходимо отметить, что внесенные изменения ограничивались заменой обмоток статора двигателя № 2: были изменены схема укладки катушек статора и коммутация катушек в соответствии со схемой СО, при этом механическая часть двигателя изменениям не подвергалась.

Помимо возможностей модернизации существующего парка электрических машин в процессе исследования применения СО и реализации их преимуществ также рассматриваются возможности создания новых конструктивных решений и перепроектирования применяемых АД [11, с. 60, 12].

В табл. 2 представлены результаты проведенного моделирования и сравнения (расчетные) работы электродвигателей АД-ММ56А2: в стандартном исполнении (1), перемотанного (2 – модернизированного аналогично упомянутому выше двигателю АИР 71В4) и перепроектированного (3), т.е. подвергнутого как замене схемы обмоток, так и изменению механических частей, в частности геометрических параметров пластин ротора и статора.

Результаты расчетов и анализа моделей говорят о существенном улучшении моментных характеристик модернизированного (перемотанного) и в особенности перепроектированного двигателя, что может быть использовано для снижения энергопотребления и повышения качества технологических процессов в механизмах с переменной производительностью для АД в составе частотно регулируемого привода.

Установлено значительное повышение КПД перепроектированного и модернизированного АСД в широком диапазоне нагрузок, также характерном для электроприводов, работающих преимущественно за пределами номинальных режимов.

Таблица 2

Результаты моделирования работы АД АДММ56А2

Характеристика	№ 1	№ 2	№ 3
Номинальная мощность, кВт		0,18	
Номинальный момент, Н*м		0,66	
Номинальное скольжение, %		13	
Номинальные обороты, об/мин		2610	
Обороты при номинальном моменте, об/мин	2830,22	2847,92 (+0,6%)	2884,49 (+1,9%)
Момент при номинальных оборотах, Н*м	1,19	1,37 (+15,12%)	1,73 (+45,37%)
Пусковой момент, Н*м	1,31	2,12 (+61,83%)	2,92 (+122,9%)
Максимальный момент, Н*м	1,66	2,17 (+30,72%)	2,92 (+75,9%)
КПД при нагрузке 100% номинала стандартного двигателя, %	78,01	87,88 (+9,87)	85,56 (+7,55)
КПД при нагрузке 75% номинала стандартного двигателя, %	77,8	86,76 (+8,96)	82,69 (+4,89)
КПД при нагрузке 50% номинала стандартного двигателя, %	73,2	83,2 (+10)	79,04 (+6,02)
КПД максимальный, %	78,05	88,18 (+10,13)	86,48 (+8,43)

Кроме приведенных, имеется ряд результатов, доказывающих целесообразность и практическую значимость примененных методов машинного проектирования электрических машин, в частности АСД, на основе анализа компьютерных моделей, а также модернизации существующего парка машин [13, с. 45]. В частности, применение СО, а также перепроектированных элементов магнитопровода АД для ряда машин общепромышленного и специального назначения позволило добиться существенного улучшения энергетических и эксплуатационных характеристик, в частности снижения энергопотребления от 12 до 50–60% при той же полезной работе, увеличение срока службы приводов за счет снижения уровня вибраций, снижение уровня электромагнитных помех, генерируемых в сеть, возможность повышения класса энергоэффективности АД и перевода оборудования на использование двигателей меньшей мощности.

Тем не менее следует отметить необходимость и возможность усовершенствования используемых решений. В частности, специалисты отмечают недостаточную изученность частотного механизма управления АД (частотно-регулируемый привод) [13, с. 43], особенно в сетях с тяговыми нагрузками, что снижает надежность энергосистем и эффективность мер по энергосбережению. Результаты моделирования, опытно-промышленной эксплуатации энергоэффективных электроприводов на базе АД с СО и результаты исследования их влияния на питающие сети позволяют сделать также обоснованные предположения о том, что масштабное внедрение таких приводов позволит обеспечить и устойчивость

энергосистем с относительно небольшими издержками за счет снижения уровня генерируемых помех [14, с. 168, 169]. В связи с этим решение задач, связанных с этой проблемой, в совокупности с внедрением методов и средств повышения энергоэффективности электроприводов на базе АД представляется перспективным и актуальным направлением развития электротехнической отрасли.

Список литературы

1. Fleiter T., Eichhammer W., Schleich J. Energy efficiency in electric motor systems: Technical potentials and policy approaches for developing countries // United Nations Industrial Development Organization. – 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.retawprojects.com/uploads/energy_efficiency_in_electric_motor_system.pdf (дата обращения: 28.02.2018).
2. Brodd K. Advanced Energy Selected for Accredited Motor Repair Pilot Program [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.advancedenergy.org/2015/07/22/advanced-energy-selected-for-accredited-motor-repair-pilot-program/> (дата обращения: 20.03.2018).
3. ГОСТ ИЕС 60034-30-1-2016. Машины электрические вращающиеся. Часть 30-1. Классы КПД двигателей переменного тока, работающих от сети (код IE). – М.: Стандартинформ, 2017. – 18 с.
4. Schreicher L., Bendl J., Chomat M. Analysis of properties of induction machine with combined parallel star-delta stator winding // Maszyne Elektryczne – Zeszyty Problemowe. – 2017. – vol. 113, no. 1. – P. 147–153.
5. Пат. 2507664 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 К 3/28, Н 02 К 17/12. Малошумный асинхронный двигатель / Агриков Ю.М., Дуюнов Д.А., Блинов В.Л., Яковлев И.Н.; заявитель и патентообладатель ООО «АС и ПП». – № 2011151274/07; заявл. 14.12.2011; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5. – 3 с.
6. Разработка метода повышения энергоэффективности электрических приводов на базе асинхронных двигателей с совмещенными обмотками / Д.А. Дуюнов [и др.] // Оборотный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2017. – № 2. – С. 11–17.
7. Оптимизация ряда интеллектуальных энергосберегающих асинхронных двигателей с совмещенными обмотками с 100 и 132 габариты / К.А. Змиева [и др.] //

Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 3. – С. 32–37.

8. Булатов Л.Н. Динамическая модель асинхронной машины с прямым обращением к конечно-элементной модели магнитного поля / Л.Н. Булатов, А.И. Тихонов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – № 1. – С. 40–44.

9. Базовый курс. Задачи моделирования электрических машин в ANSYS Maxwell 2D/3D: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cae-expert.ru/education/bazovyy-kurs-zadachi-modelirovaniya-elektricheskikh-mashin-v-ansys-maxwell-2d3d> (дата обращения: 20.04.2018).

10. Морозов К. Новый асинхронный двигатель для транспорта / К. Морозов // ProТранспорт. – 2014. – № 5. – С. 46–47.

11. Кононенко К.Е. Основной резерв повышения энергоэффективности асинхронных двигателей с корот-

козамкнутым ротором / К.Е. Кононенко, А.В. Кононенко, С.В. Крутских // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 54–60.

12. Пат. 2568672 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 К 17/12, Н 02 К 3/28. Малошумный энергоэффективный электропривод / Агриков Ю.М., Дуюнов Д.А., Дуюнов Е.Д., Блинов В.Л., Яковлев И.Н.; заявитель и патентообладатель ООО «АС и ПП». – № 2014132978/07; заявл. 11.08.2014; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32. – 3 с.

13. Дейнего В.Н. Изменение обмоток асинхронных электродвигателей – потенциал обеспечения надежности электросетей / В.Н. Дейнего, Д.А. Дуюнов, В.Ф. Иванов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2015. – № 2(29). – С. 42–49.

14. Schreicher L., Bendl J., Chomat M. Effect of combined stator winding on reduction of higher spatial harmonics in induction machine // Electrical Engineering. – 2017. – vol. 99, no. 1. – P. 161–169.