

3. <http://www.abb.com/product/us/9AAC132742.aspx?country=RU>
4. Timofeyev V.N., Pervukhin M.V., Khatsayuk M.Yu. *Induktsionnyi nagrev – in Russ. (Induction heating)*, 2012, No. 4 (22), pp. 15–20.
5. [http://www.altek-al.com/products/electromagnetic\\_furnace\\_stirring-asp/](http://www.altek-al.com/products/electromagnetic_furnace_stirring-asp/).
6. Vol'dek A.I. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Leningrad, Publ. «Energiya», 1974, 840 p.
7. Olendorf F. *Edinaya teoriya mashin s vrashchayushchimsya polem, ch. I* (Unified theory of machines in a rotating field, part I), 1930, vol. XXIV, No. 2.
8. Vainberg G.S. *Elektrichestvo – in Russ (Electricity)*, 1958, No. 2, pp. 40–46.
9. Baake E., Barglik D., Lupi S., Nikanorov A., Pavlov E., Pavlov S., Pervukhin M., Timofeyev S., Khatsayuk M., Yakovich A. *MGD tekhnologii v metallurgii. Intensivnyi kurs. Spetsializatsiya IV*. (VHD technologies in metallurgy. Intensive course. Specialization IV). St. Petersburg, Publ. St. Petersburg State, 2013, 250 p.
10. Vol'dek A.I. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskiye mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom* (The induction MHD machines with liquid metal working fluid). Leningrad, Publ. «Energiya», 1970, 272 p.
11. Yorob'yev N.N. *Teoriya ryadov* (Series theory). Moscow, Publ. «Nauka», 1986, 408 p.

\* \* \*

*Электричество*, 2017, № 1, с. 44–47.

## Сравнение энергетических характеристик вентильно-индукторного и асинхронного электроприводов мощностью 15 кВт

ПАХОМИН С.А., КРАЙНОВ Д.В., РЕДНОВ Ф.А., КОЛОМЕЙЦЕВ В.Л.,  
ПРОКОПЕЦ И.А., МАКАРОВ Л.Н.

*Представлены результаты сравнительных испытаний вентильно-индукторного привода (ВИП, 15 кВт, 300 мин<sup>-1</sup>) и серийного асинхронного двигателя с аналогичными параметрами при питании от сети и от преобразователя частоты (ПЧ). Двигатели выполнены в одинаковом корпусе АИР160S2. Результаты испытаний, выполненных в Ярославле на специализированном оборудовании испытательного центра ОАО «ELDIN», показали, что применение электромеханической стали толщиной 0,35 мм марки 2412 позволяет повысить КПД ВИП на 2,5–3% в сравнении с аналогичным приводом, двигатель которого выполнен из стали толщиной 0,5 мм марки 2212; КПД асинхронного привода при питании от ПЧ на 8–9% ниже по сравнению с КПД ВИП (сталь 2412, Δ = 0,35 мм). При питании от ПЧ КПД асинхронного привода снижается на 3,5% в сравнении с режимом работы непосредственно от сети 50 Гц.*

*Ключевые слова: вентильно-индукторный привод, асинхронный двигатель, энергоэффективность, сравнительный анализ*

Вентильно-индукторный привод (ВИП), в основе которого индукторный двигатель с зубчатым ротором без обмотки и зубчатый статор с концентрическими катушками, в последние десятилетия активно разрабатывается и внедряется [1]. Однако при этом ощущается недостаток публикаций по сравнению характеристик ВИП и традиционных электроприводов; опубликованные материалы, как правило, базируются на расчётных данных [2, 3].

В 2002–2004 гг. при выполнении государственной программы по внедрению энергоэффективных электроприводов в соответствии с контрактом с Ростовской областной администрацией были спроектированы вентильно-индукторные электроприводы мощностью 7,5; 15; 22; 30 и 55 кВт, 3000 мин<sup>-1</sup> для привода насосов системы водоснабжения многоэтажных зданий (результаты испытаний в реальных условиях эксплуатации на объектах ЖКХ ВИП мощностью 7,5 кВт представлены в [4]). Более 20 изготовленных ВИП были установлены на станциях Ростовского Горводоканала.

Заказ на изготовление вентильно-индукторных двигателей (ВИД) мощностью 15 и 30 кВт был раз-

мещён на профильном предприятии ОАО «Ярославский электромашиностроительный завод» (ОАО «ELDIN»), специализирующемся на серийном выпуске асинхронных электродвигателей. В процессе изготовления двигателей на заводе по согласованию с его руководством в декабре 2003 г. были проведены сравнительные испытания электропривода с ВИД мощностью 15 кВт, 3000 мин<sup>-1</sup> и асинхронного двигателя с аналогичными паспортными данными; оба двигателя выполнены в одинаковых корпусах с одинаковой системой охлаждения. Внешние диаметры магнитопроводов статоров обоих типов машин были одинаковыми и равными 272 мм, длина магнитопровода статора по воздушному зазору АД – 110 мм, у ВИД (в связи с более короткими лобовыми частями катушек она увеличена до 120 мм. Размеры воздушных зазоров (ВИД – 0,4 мм, АД – 0,8 мм) соответствуют рекомендациям [5] (для двухполюсного АД при диаметре расточки 150 мм рекомендуется зазор 0,6±0,7 мм, для многополюсного АД – примерно 0,3 мм, как реально выполнимый по механическим требованиям).

Вентильный индукторный двигатель был спроектирован в трёхфазном исполнении с 12 полюсами на статоре и 8 зубцами на роторе из электротехнической стали марки 2412 толщиной  $\Delta = 0,35$  мм. Для исследования влияния толщины стали на энергоэффективность ВИП были изготовлены и испытаны в двух вариантах: при одинаковых размерах магнитопровод одного из ВИД был выполнен из стали марки 2412,  $\Delta = 0,35$  мм, другого – из стали марки 2212,  $\Delta = 0,5$  мм.

В процессе испытаний на специализированном оборудовании испытательного центра ОАО «ELDIN» были определены рабочие характеристики – зависимость потребляемой мощности  $P_1$ , момента  $M$ , мощности на валу  $P_2$ , КПД  $\eta$  при разных значениях частоты вращения  $n = 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500$  мин<sup>-1</sup> для ВИД мощностью 15 кВт, 3000 мин<sup>-1</sup>. Для сравнения на том же испытательном оборудовании были определены рабочие характеристики асинхронного двигателя (АД) АИР160S2 (заводской номер № 1234347) с такими же параметрами при питании от промышленной сети 50 Гц и преобразователя частоты (ПЧ) UNI SP3402.

Полученные опытные данные при номинальной частоте вращения 3000 об/мин приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

Характеристики ВИП (сталь 2212,  $\Delta = 0,5$  мм)

$P_1$ , кВт	$M$ , Н·м	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %
1,607	2,1	3000	0,66	41
4,298	10,0	3000	3,141	73,1
8,025	20,3	3000	6,377	79,46
11,325	30,0	3000	9,424	83,21
14,715	40,6	3000	12,754	86,67
18,075	50,0	3000	15,707	86,9
21,450	59,7	3000	18,754	87,43

Таблица 2

Характеристики ВИП (сталь 2412,  $\Delta = 0,35$  мм)

$P_1$ , кВт	$M$ , Н·м	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %
1,422	2,0	3001	0,628	44,16
4,059	10,2	3001	3,206	78,98
7,845	20,6	3001	6,473	82,51
11,070	30,2	3001	9,490	85,73
14,175	40,2	3001	12,632	89,12
17,880	50,0	3001	15,712	87,87
20,850	60,0	3001	18,854	90,43

Таблица 3

## Характеристики АД АИР160S2 при питании от ПЧ UNI SP3402

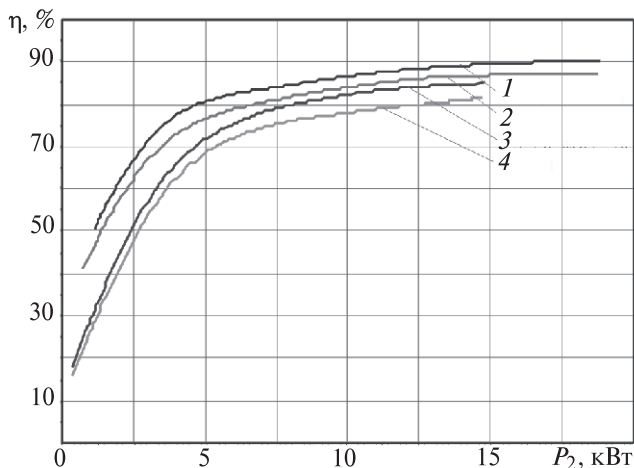
$P_1$ , кВт	$M$ , Н·м	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$f$ , Гц	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %
1,980	1,0	3002	50	0,314	15,9
5,197	10,3	3004	50,3	3,239	62,3
8,550	20,3	3007	50,5	6,391	74,8
12,240	30,2	3009	50,7	9,515	77,7
15,825	40,2	3010	50,9	12,670	80,1
18,060	47,8	2945	50,5	14,740	81,6

Таблица 4

## Характеристики АД АИР160S2 при питании от сети 380 В

$P_1$ , кВт	$M$ , Н·м	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %
4,027	1,0	2996	3,137	78,0
4,815	10,0	2991	3,132	65,0
8,145	20,3	2981	6,337	77,8
11,400	30,0	2972	9,336	81,9
14,775	40,2	2963	12,472	84,4
17,445	48,0	2955	14,852	85,1
18,000	50,2	2952	15,517	86,2

Представленные в таблицах зависимости КПД ВИП, изготовленных из разной электротехнической стали, и серийного АД при питании от ПЧ и сети 50 Гц приведены на рисунке. Превышение температуры обмоток ВИП в номинальном режиме составило для двигателей из стали 2412 (0,35 мм) – 51 °С, из стали 2212 ( $\Delta = 0,5$  мм) – 79 °С; минимальный пусковой момент 90 Н·м.



Коэффициент полезного действия: 1 – ВИП,  $\Delta = 0,35$  мм; 2 – ВИП,  $\Delta = 0,5$  мм; 3 – АД от сети 380 В; 4 – АД с ПЧ

**Выводы.** 1. Применение электротехнической стали толщиной 0,35 мм марки 2412 позволяет повысить КПД ВИП на 2,5–3% в сравнении с аналогичным приводом, двигатель которого выполнен из стали толщиной 0,5 мм марки 2212.

2. КПД привода на базе серийного асинхронного двигателя при питании от ПЧ на 8–9% ниже по сравнению с КПД ВИП (сталь 2412,  $\Delta = 0,35$  мм).

3. При питании от ПЧ КПД асинхронного привода снижается на 3,5% в сравнении с режимом работы АД непосредственно от сети 50 Гц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А., Бибииков В.И., Коломейцев Г.В. Применение реактивных индукторных машин на транспорте. — Изв. вузов. Электромеханика, 2008, № 1, с. 69–72.

2. David G. Dorrell, Andrew M. Knight, Mircea Popescu, Lyndon Evans, David A. Station Comparison of Different Motor Design Drives for Hybrid Electric Vehicles: [http://www.motor-design.com/cmsAdmin/uploads/ecce\\_2010\\_hybridvehicles.pdf](http://www.motor-design.com/cmsAdmin/uploads/ecce_2010_hybridvehicles.pdf) (дата обращения: 01.06.2016).

3. Голландцев Ю.А. Сравнение механических характеристик асинхронных и вентильных индукторно-реактивных двигателей. — Информационно-управляющие системы, 2006, № 6, с. 50–53.

4. Рожицкий Д.Б., Баталова Е.В., Филаткин М.С. Результаты испытаний реактивного индукторного привода насосного агрегата с регулируемой частотой вращения в системах тепло- и водоснабжения. — Энергосбережение, 2005, № 2, с. 38–42.

5. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов/Под ред. И.П.Копылова, 3-е изд. — М.: Высшая школа, 2002, 757 с.

[25.07.2016]

*Авторы:* Пахомин Сергей Александрович окончил в 1983 г. электромеханический факультет Ново-

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 1, pp. 44–47.*

черкасского политехнического института (НПИ). В 2001 г. защитил докторскую диссертацию «Развитие теории и практика проектирования энергосберегающих вентильно-индукторных электроприводов». Профессор кафедры «Электромеханика и электрические аппараты» Южно-Российского государственного политехнического университета (ЮРГПУ).

Крайнов Дмитрий Викторович окончил в 1991 г. электромеханический факультет НПИ. В 2001 г. защитил кандидатскую диссертацию «Вентильно-индукторный электропривод. Алгоритмы и микропроцессорные системы управления». Доцент кафедры «Электромеханика и электрические аппараты» ЮРГПУ.

Реднов Фёдор Александрович окончил в 1983 г. электромеханический факультет НПИ. В 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию «Трехфункциональный односторонний линейный индукторный двигатель». Ведущий инженер ООО «ЭМТЕХ».

Коломейцев Владимир Леонидович окончил в 1983 г. электромеханический факультет НПИ. Заместитель директора по новой технике ООО «ЭМТЕХ».

Прокопец Игорь Александрович окончил в 1985 г. электромеханический факультет НПИ. Заместитель директора по производству ООО «ЭМТЕХ».

Макаров Лев Николаевич окончил в 1961 г. электромеханический факультет Ивановского энергетического института. В 2006 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка и освоение высокоэффективной конкурентоспособной серии асинхронных машин». Генеральный конструктор ООО «РУСЭЛПРОМ».

## Comparison of the Power Performance Characteristics of the 15 kW Converter-fed Inductor and Asynchronous Electric Drives

PAKHOMIN Serguei Aleksandrovich (South-Russian State Polytechnic University (SRSPU), Novocherkassk, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

KRAINOV Dmitrii Viktorovich (SRSPU, Novocherkassk, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

REDNOV Fedor Aleksandrovich (Limited Liability Company (LLC) «EMTEX», Novocherkassk, Russia) — Leading engineer, Cand. Sci. (Eng.)

KOLOMEITSEV Vladimir Leonidovich (LLC «EMTEX», Novocherkassk, Russia) — Deputy director

PROKOPETS Igor' Aleksandrovich (LLC «EMTEX», Novocherkassk, Russia) — Deputy director

MAKAROV Lev Nikolayevich (LLC «RUSELPROM», Moscow, Russia) — General designer, Dr. Sci. (Eng.)

The article presents the results from comparative tests of the 15 kW 300 min<sup>-1</sup> converter-fed inductor drive (CFID) and the serially produced asynchronous motor with similar parameters that take power supply from a network and a frequency converter (FC). The motors are made in the same Type AIR160S2 casing. The drives were tested on the dedicated equipment at the JSC ELDIN testing center in the city of Yaroslavl. The test results have shown that the use of 0.35 mm thick Grade 2412 electromechanical steel in the CFID allows its efficiency to be improved by 2.5–3% as compared with the similar drive equipped with the motor made using 0.5 mm thick Grade 2212 steel. It has also been shown that the efficiency of the asynchronous drive taking power supply from the FC is by 8–9% lower than the efficiency of the motor