

В.С. Петрушин, Л.Я. Беликова, Ю.Р. Плоткин, Р.Н. Еноктаев

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОФАЗНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Обґрунтовано можливість створення модифікацій багатofазних асинхронних двигунів на базі серійних. Розглянуто ряд силових схем регульованих електроприводів, в яких забезпечується багатofазне живлення асинхронних двигунів. Аналізується робота приводів на визначене за величиною і характером навантаження і заданим діапазоном регулювання. В результаті математичного моделювання визначено, що температури прогріву обмоток статорів розглянутих двигунів не перевищують допустимих значень відповідно до класу ізоляції. Виконано порівняння техніко-економічних показників розглянутих схем і двигунів, що дає можливість здійснити прийнятний вибір варіанта. Встановлено закономірності зміни фазних струмів багатofазних двигунів в діапазоні регулювання. Досліджено зміну віброакустичних показників у статичних та динамічних режимах. Визначено зниження цих показників в двигунах з числом фаз, що перевищує три. Бібл. 10, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: багатofазний регульований асинхронний двигун, напівпровідниковий перетворювач частоти, математичне моделювання, регульовальні характеристики, обмотка статора, віброакустичні показники.

Обоснована возможность создания модификаций многофазных асинхронных двигателей на базе серийных трехфазных. Рассмотрен ряд силовых схем регулируемых электроприводов, в которых обеспечивается многофазное питание асинхронных двигателей. Анализируется работа приводов на определенную по величине и характеру нагрузку и заданным диапазоном регулирования. В результате математического моделирования определено, что температуры перегрева обмоток статоров рассматриваемых двигателей не превышают допустимых значений соответственно классу нагревостойкости изоляции. Выполнено сравнение технико-экономических показателей рассматриваемых схем и двигателей, дающее возможность осуществить приемлемый выбор варианта. Установлены закономерности изменения фазных токов многофазных двигателей в диапазоне регулирования. Исследовано изменение виброакустических показателей в статических и динамических режимах. Определено снижение этих показателей в двигателях с числом фаз, превышающим три. Библ. 10, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: многофазный регулируемый асинхронный двигатель, полупроводниковый преобразователь частоты, математическое моделирование, регулировочные характеристики, обмотка статора, виброакустические показатели.

Введение. Многофазные регулируемые асинхронные двигатели (РАД) находят применение в медицинской и бытовой технике, в автомобилестроении, в текстильной промышленности, в системах электродвижения судов [1, 2]. Перспективно их использование в специальных вентиляционных системах и комплексах, где требуется повышенная надёжность двигателя при низком уровне шума и вибрации [3]. У многофазных РАД наблюдается снижение пульсаций момента и скорости на валу двигателя, повышение надёжности при уменьшенных уровнях шума и вибрации. Кроме того, дробление электрической мощности по фазам делает регулировочные характеристики РАД менее критичными к асимметрии по амплитуде и фазе питающего напряжения, что с увеличением числа фаз (m), в конечном итоге, упрощает систему управления и повышает надёжность [4, 5]. Системы электропривода (ЭП) с многофазными РАД реализуются при использовании преобразователя частоты с несколькими автономными инверторами напряжения (АИН), создающего симметричную систему напряжений, имеющую временной сдвиг, равный пространственному сдвигу фаз многофазных двигателей (рис. 1).

Многофазные асинхронные двигатели могут быть созданы на базе серийных трехфазных основного исполнения. В некоторых случаях это реализуется при наличии в трехфазных нескольких параллельных ветвей. Уменьшая их число, получаем многофазную модификацию (вдвое – шестифазную, втрое – девятифазную и т.д.). При этом геометрия активной части, число витков в фазе и сечение обмоточного провода не меняется. Также следует учитывать число пазов на полюс и фазу.

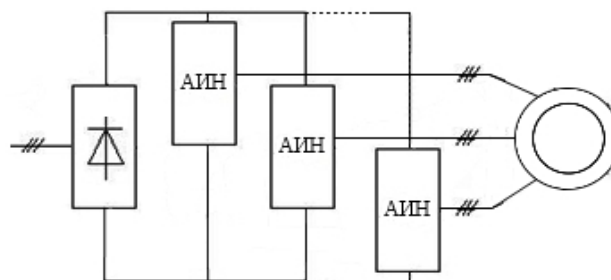


Рис. 1. Схемы регулируемых ЭП с многофазными РАД

В случае невозможности такого решения задачи необходимо менять число эффективных витков в фазе w_ϕ и сечение провода d_w . Используя выражение $w_\phi = \frac{Z_1 \cdot U_n}{2 \cdot m \cdot a}$ за счет варьирования числа параллельных ветвей (a), количества проводников в пазу (U_n) и числа витков добиваются сохранения значения магнитного потока. При этом следует выполнять проверку коэффициента заполнения паза [6].

Постановка задачи. Для формирования моделей электроприводов с многофазными РАД следует ввести ряд исходных данных, определяющих как функциональные свойства, так и массогабаритностоимостные показатели. Последние дают возможность рассмотреть экономические аспекты различных вариантов ЭП. Массогабаритностоимостные показатели многофазных преобразователей частоты условно увеличиваются на 30 % при переходе от трехфазного к шестифазному исполнению, на 60 % при переходе к девятифазному и т.д. За счет увеличения затрат на

© В.С. Петрушин, Л.Я. Беликова, Ю.Р. Плоткин, Р.Н. Еноктаев

производство учитывается изменение стоимостей многофазных двигателей.

Для сопоставления вариантов ЭП необходимо использовать определенные показатели, в том числе среднечастотный КПД [7], который отражает энергетику РАД во всем заданном диапазоне регулирования от n_1 до n_2 и определяется как эквивалентный усредненный для этого диапазона.

$$\eta_{срАД} = \frac{1}{n_2 - n_1} \int_{n_1}^{n_2} \eta_{АД}(n) dn.$$

Обобщенный критерий приведенных затрат привода (ПЗ) учитывает стоимость изготовления и затраты на эксплуатацию. В связи с тем, что затраты зависят от КПД и коэффициента мощности, обобщенный критерий приведенных затрат имеет различные значения в разных точках диапазона и целесообразно определять диапазонное значение этого критерия, т.е. эквивалентное усредненное для всего диапазона.

Следует отметить, что при работе РАД в составе современных частотно-регулируемых электроприводов из-за близости коэффициента мощности привода к 1 из выражения критерия ПЗ электропривода может быть исключена составляющая, соответствующая стоимости компенсации реактивной энергии. Тогда

$$ПЗ_{ЭП} = сер [1 + T_n(k_a + k_o)] + C_{аЭП},$$

где $сер$ – полная стоимость электропривода, которая складывается из стоимости РАД и преобразователя, у.е.; $C_{аЭП} = C_{сае} P_{1ЭП} (1,04 - \eta_{срЭП})$ – стоимость потерь электроэнергии за год, у.е.; T_n – нормативный срок окупаемости двигателя, лет; k_a – доля затрат на амортизационные отчисления; k_o – доля затрат на обслуживание при эксплуатации двигателя; $C_{сае}$ – коэффициент, учитывающий стоимость потерь активной энергии, представляющий собой произведение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии в течении срока службы двигателя (0,1 у.е. за кВт·ч), числа часов работы двигателя в течении года (2100), числа лет работы до капитального ремонта (5 лет) и коэффициента относительной загрузки двигателя (принято 1); $P_{1ЭП}$ – потребляемая приводом активная мощность, кВт; $\eta_{срЭП}$ – среднечастотный КПД привода. Для регулируемых асинхронных двигателей значения $T_n = 5$ лет, $k_a = 0,065$, $k_o = 0,069$ принимаются такими же, что и для общепромышленных АД [8].

Результаты исследований. Моделирование регулируемых электроприводов (РЭП) с совместным рассмотрением преобразователей, двигателей и нагрузок [9] позволяет осуществлять программный продукт DimasDrive [10], разработанный на кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета.

В качестве базового двигателя выбран трехфазный двигатель 4A200M6, работающий с частотным преобразователем Altivar 58HD33N4 (3650 у.е., 34 кг, $\eta_{np} = 0,94$). За счет изменения обмоточных данных выполнены шестифазная (число витков $w_1 = 114$, число параллельных ветвей $a = 2$, сечение эффективного проводника $q_{эф} = 1,76 \text{ мм}^2$, диаметр изолированного обмоточного провода $d_{np} = 1,585 \text{ мм}$) и двенадцати

(число параллельных ветвей $a = 1$, при остальных данных одинаковых с шестифазной) модификации.

Рассматривался закон частотного управления $U/f = \text{const}$. В качестве нагрузки использовалась тяговая нагрузка, $P_{нагр} = 18 \text{ кВт}$ с максимальным моментом 140 Н·м. При заданной постоянной по величине нагрузке, требуемый диапазон регулирования (200 – 1600 об/мин) в системах РЭП может быть обеспечен рассматриваемыми двигателями.

Регулировочные характеристики, представляющие собой зависимости изменения электрических, энергетических, тепловых, механических, виброакустических величин от числа оборотов, могут быть получены при использовании семейств характеристик, в том числе и механических, при различных параметрах регулирования, на которые накладываются характеристики нагрузочного механизма. На рис. 2 представлено семейство механических характеристик и заданной нагрузки, соответствующие РЭП с трехфазным РАД. Семейства механических характеристик для РЭП с шести и двенадцати фазными двигателями имеют аналогичный вид.

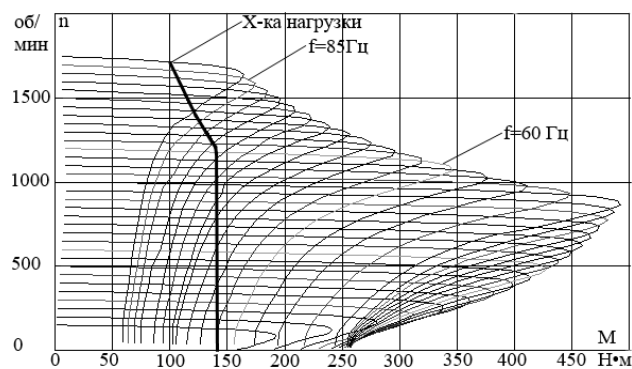


Рис. 2. Семейство механических характеристик

При данном сочетании механических характеристик и нагрузки наблюдается трехзональность. В пределах каждой зоны имеет место однообразное изменение механических характеристик и характеристики нагрузки. Температуры перегревов обмоток статоров рассматриваемых двигателей не превышают допустимых классом нагревостойкости F значений, при выбранной нагрузке в заданном диапазоне регулирования.

На рис. 3 представлены некоторые регулировочные характеристики рассматриваемых РЭП, представляющие собой зависимости изменения потребляемого двигателями тока и виброакустических показателей электромагнитной природы от числа оборотов.

В табл. 1 приведены значения показателей рассмотренных РЭП, к числу которых относятся среднечастотные КПД ($\eta_{ср}$) и приведенные затраты ($ПЗ_{ср}$), а также массогабаритостойкостные показатели как двигателей, так и приводов.

Может быть выполнен расчет стоимости потерь активной энергии за год.

$$C_a = C_a \cdot T_{сод} \cdot K_3 \cdot P_{мех} \cdot (1 + 0,04 - \eta_{РЭП}) / \eta_{РЭП},$$

где $C_a = 0,1$ у.е. – цена за 1 кВт·ч; $T_{сод} = 2100$ – число часов работы РЭП в году; K_3 – коэффициент загрузки (принимается равным 1,0); 0,04 – относительная величина потерь в распределительной сети потребителя.

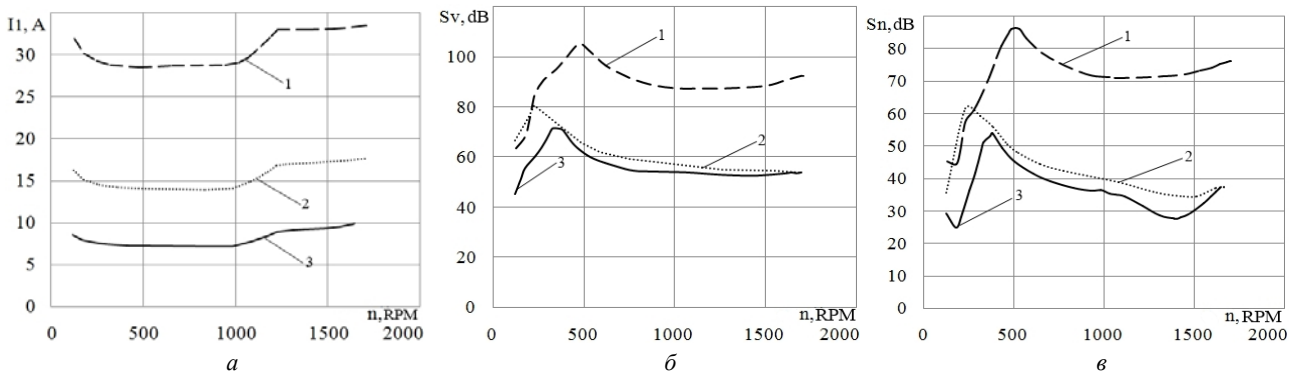


Рис. 3. Изменение потребляемого тока (а), виброскорости (б) и шума электромагнитной природы (в) в диапазоне регулирования: 1 – РЭП с серийным трехфазным АД, 2 – РЭП с шестифазным АД, 3 – РЭП с двенадцати фазным АД

Таблица 1
Сравнение показателей различных РЭП

РЭП	С 3-х фазным РАД	С 6-ти фазным РАД	С 12-ти фазным РАД
$\eta_{сд}$ АД, %	82.97	82.41	81.70
$\eta_{сд}$ РЭП, %	81.34	80.79	80.10
$ПЗ_{сд}$ АД, у.е.	5729	5844	6034
$ПЗ_{сд}$ РЭП, у.е.	11991	13935	17779
Стоимость АД, у.е.	1994	2016	2069
Масса АД, кг	254	254	254
Объем АД, дм ³	19	19	19
Масса РЭП, кг	288	298	318
Объем РЭП, дм ³	56	101	275
Стоимость РЭП, у.е.	5644	6761	9004

Таблица 2
Сравнение стоимостей потерь активной энергии различных РЭП

РЭП	С 3-х фазным РАД	С 6-ти фазным РАД	С 12-ти фазным РАД
$\eta_{сд}$ РЭП, %	81.34	80.79	80.10
Стоимость потерь активной энергии за год, у.е.	1001	1036	1073

Выполнено сопоставление рассмотренных вариантов РЭП по стоимости потерь активной энергии за год (табл. 2).

Также выполнено моделирование для каждого схемного решения РЭП при работе на заданную тахограмму (2 с. – 200 об/мин, 2 с. – 600 об/мин, 2 с. – 1200 об/мин) с учетом переходных процессов.

На рис. 4 показаны изменения токов, виброскоростей и шумов электромагнитной природы при работе рассматриваемых двигателей на заданную тахограмму.

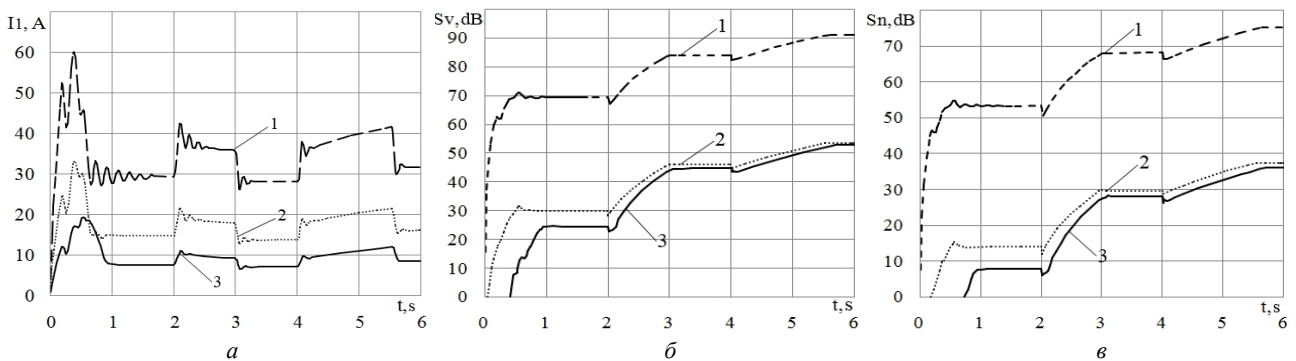


Рис. 4. Изменение потребляемого тока (а), виброскорости (б) и шума электромагнитной природы (в) в диапазоне регулирования: 1 – РЭП с серийным трехфазным АД, 2 – РЭП с шести фазным АД, 3 – РЭП с двенадцати фазным АД

Выводы.

1. Потребляемый ток многофазных РАД уменьшается пропорционально числу фаз по сравнению с током трехфазного двигателя.
2. Значительное снижение виброакустических показателей электромагнитной природы наблюдается при переходе от трёхфазного к многофазным РАД. Это снижение неравномерно и в начальной части диапазона минимально, а также наблюдаются резонансные явления. Кроме того, для рассматриваемых РЭП разница между этими показателями шести и две-

надцатифазных РАД не столь существенна. В силу этого при данной проектной задаче следует отдать предпочтение шести фазному РЭП, так как двенадцатифазный значительно дороже, тяжелее и объёмней при практически равных энергетических показателях.

3. Сравнение стоимостей потерь активной энергии за год рассматриваемых РЭП позволило сделать вывод, что РЭП с трехфазным АД имеет несколько лучшие показатели относительно других рассматриваемых вариантов.

4. Результаты моделирования динамических зависимостей потребляемого тока, вибростороности и шума электромагнитного происхождения подтверждают закономерности, выявленные в статических режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дацковский Л.Х., Роговой В.И. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе // *Электротехника*. – 1996. – №10. – С. 20-24.
2. Соустин Б.П. Многофазный инверторный асинхронный электропривод // *Наука производству*. – 2000. – №3. – С. 10-16.
3. Сидельников Б.В. Шестифазные частотно-регулируемые асинхронные двигатели большой мощности // *Известия РАН. Энергетика*. – 2000. – №3. – С. 31-38.
4. Мустафа Т.М., Волков С.В., Ершов А.М., Сенцов Ю.М., Минаев Г.М. Преобразователь частоты для гребного электродвигателя // *Электротехника*. – 2014. – №1. – С. 46-54.
5. Голубев А.Н., Игнатенко С.В. Влияние числа фаз статорной обмотки асинхронного двигателя на его виброшумовые характеристики // *Электротехника*. – 2000. – №6. – С. 28-31.
6. Голубев А.Н., Зыков В.В. Математическая модель асинхронного двигателя с многофазными обмотками статора и ротора // *Электротехника*. – 2003. – №7. – С. 35-40.
7. Петрушин В.С. Диапазонные критерии оптимальности при проектировании регулируемых асинхронных двигателей // *Труды Одесского политехнического университета*. – 2001. – №1(13). – С. 81-86.
8. Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // *Электромашинобудовання та електрообладнання*. – 2001. – №56. – С. 51-54.
9. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Учебное пособие. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 320 с.
10. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт «DIMASDrive». Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). – К.: Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

REFERENCES

1. Datskovskii L.X., Rogovoi V.I. Current status and trends in asynchronous variable frequency drives. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 1996, no.10, pp. 20-24. (Rus).
2. Soustin B.P. Single-phase inverter asynchronous electric. *Nauka proizvodstva – Science production*, 2000, no.3, pp. 10-16. (Rus).
3. Sidelnikov B.V. Six-phase variable-frequency high power asynchronous motors. *Izvestiya RAN. Energetika – News Russian Academy of Sciences. Energetics*, 2000, no.3, pp. 31-38. (Rus).
4. Mustafa T.M., Volkov S.V., Ershov A.M., Sentsov Yu.M., Minaev G.M. Frequency converter for the propeller motor. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2014, no.1, pp. 46-54. (Rus).
5. Golubev A.N., Ignatenko C.B. Influence of the number of phases of the stator winding of the induction motor on its vibration characteristics. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2000, no.1, pp. 28-31. (Rus).
6. Golubev A.N., Zykov V.V. A mathematical model of a multi-phase induction motor stator and rotor windings. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2003, no.7, pp. 35-40. (Rus).
7. Petrushin V.S. Range of optimality criteria for the design of controlled asynchronous motors. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2001, no.1(13), pp. 81-86. (Rus).
8. Petrushin V.S. These costs asynchronous motors in the drive frequency for different control laws. *Elektromashinostoenie i*

elektrooborudovanie – Electrical Engineering and Electric Equipment, 2001, no.56, pp. 51-54. (Rus).

9. Petrushin V.S. *Asinhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode: Uchebnoe posobie* [Induction motors in adjustable electric: Textbook]. Odessa, Nauka i tehnika Publ., 2006. 320 p. (Rus).

10. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Jakimec A.M. *Programmyy produkt «DIMASDrive»*. *Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinhronnykh korotkozamknutykh dvigatelej sistem reguliruemogo elektroprivoda* [Program performance analysis, selection and design of asynchronous cage motors controlled drive systems]. Patent UA, no.4065. (Ukr).

Поступила (received) 27.11.2015

Петрушин Виктор Сергеевич¹, д.т.н., проф.,

Беликова Людмила Яковлевна¹, к.т.н., доц.,

Плоткин Юрий Романович², к.т.н., проф.,

Еноктаев Ростислав Николаевич¹, аспирант,

¹Одесский национальный политехнический университет,

65044, Одесса, пр. Шевченко, 1,

тел/phone +380 048 7058494,

e-mail: victor_petrushin@ukr.net, Conda@ukr.net,

rostik-enok@inbox.ru

²HWR Berlin,

Alt Friedrichsfelde 60, 10315 Berlin, Germany,

тел/phone +49 (0)30 30877-2443,

e-mail: juriy.plotkin@hwr-berlin.de

V.S. Petrushin¹, L.Y. Belikova¹, Y.R. Plotkin², R.N. Yenkoaiev¹

¹Odessa National Polytechnic University,

1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.

²HWR Berlin,

Alt Friedrichsfelde 60, 10315 Berlin, Germany.

Comparison of adjustable high-phase order induction motors' merits.

Purpose. Development of mathematical models of adjustable electrical drives with high-phase order induction motors for their merits analysis at static and dynamical modes. **Methodology.** At the mathematical modeling main kinds of physical processes taking place in the high-phase order induction motors are considered: electromagnetic, electromechanical, energetic, thermal, mechanical, vibroacoustic ones. Besides, functional as well as mass, frame and value indicators of frequency converters are taking into account which permits to consider technical and economical aspects of the adjustable induction electrical drives. Creation of high-phase order induction motors' modifications in possible on the base of a stock 3-phase motors of basic design. Polyphase supply of induction motors is guaranteed by a number of the adjustable electrical drives' power circuits. **Results.** Modelling of a number of adjustable electrical drives with induction motors of different phase number working on the same load by its character, value and required adjustment range is carried out. At the utilization of the family of characteristics including mechanical ones at different adjustment parameters on which loading mechanism's characteristics are superimposed regulation curves representing dependences of electrical, energetic, thermal, mechanical, vibroacoustic quantities on the motors' number of revolutions are obtained. **Originality.** The proposed complex models of adjustable electrical drives with high-phase order induction motors give a possibility to carry out the grounded choice of the drive's acceptable variant. Besides, they can be used as design models at the development of adjustable high-phase order induction motors. **Practical value.** The investigated change of vibroacoustic indicators at static and dynamical modes has been determined decrease of these indicators in the drives with number of phase exceeding 3. References 10, tables 2, figures 4.

Key words: adjustable high-order induction motor, semiconductor frequency converter, mathematical modelling, regulation curves, stator winding, vibroacoustic indicators.