

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.04:621.3.072.9

Методика выбора параметров обмотки статора асинхронных двигателей общепромышленного исполнения для частотно-регулируемого электропривода

А.Н. Бирюков¹, С.М. Воронин¹, Е.А. Шумилов¹, Ю.Б. Казаков²

¹ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет» филиал в г. Сызрани, г. Сызрань, Российская Федерация.

²ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» г. Иваново, Российская Федерация. E-mail: E-mail: biryukov-a-n@yandex.ru ; elmash@em.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Выбору параметров обмотки статора частотно-регулируемых асинхронных двигателей уделяется недостаточное внимание. На повышенных частотах обычно применяются специализированные асинхронные двигатели, но возможно и использование двигателей общепромышленного исполнения меньшей мощности, частоты вращения и стоимости без повышения фазного напряжения при измененной обмотке статора. Целесообразно обоснование выбора параметров обмотки статора асинхронных двигателей для частотно-регулируемого электропривода.

Материалы и методы: Параметры асинхронных двигателей с измененными обмотками определены на основе схемных моделей двигателей. Результаты расчетов поверены на полевых электромагнитных моделях методом конечных элементов. Рентабельность модернизации определены методами оценки затрат при капитальном ремонте и методом сравнения стоимостей аналогов.

Результаты: Определены направления выбора параметров обмотки статора частотно-регулируемых асинхронных двигателей. Рассчитаны показатели двигателей при повышенной частоте напряжения для обмотки с увеличенным числом параллельных ветвей, сниженным числом последовательно соединенных витков фазы при сохранении числа полюсов и фазного напряжения. При импульсной модуляции напряжения размеры элементарных проводников должны определяться несущей частотой модуляции. Выполнено сравнение стоимости и массогабаритных показателей асинхронных двигателей общепромышленного исполнения с измененной обмоткой и специализированных аналогов.

Выводы: Установлено, что для асинхронных двигателей, работающих на повышенных частотах, целесообразно увеличение параллельных структур обмотки – параллельных ветвей и элементарных проводников, снижение последовательно соединенных витков фазы при сохранении числа полюсов и фазного напряжения, что позволяет сохранить электрическую прочность изоляции и магнитный поток, повысить мощность и КПД, снизить номинальное и критическое скольжения. При мощности привода более 11 кВт модернизация обмотки двигателей общепромышленного исполнения с числами полюсов 4 или 6 позволяет достичь меньших стоимости и массогабаритных показателей, чем для специализированных аналогов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, обмотка статора, число параллельных ветвей, вольт-частотная характеристика, частотно-регулируемый электропривод.

Method of selecting stator winding parameters of general-purpose induction motors for variable-frequency electric drives

A.N. Biryukov¹, S.M. Voronin¹, E.A. Shumilov¹, Yu.B. Kazakov²

¹Samara State Technical University, Syzran Branch, Syzran, Russian Federation.

²Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation.

E-mail: biryukov-a-n@yandex.ru ; elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background: Not enough attention is currently paid to the choice of stator winding parameters of variable-frequency induction motors. At higher frequencies, specialized induction motors are normally used, but it is also possible to use less powerful general-purpose engines with lower speed and cost without increasing the phase voltage in case of stator winding changes. It is reasonable to justify the choice of stator winding parameters of induction motors of variable-frequency electric drives.

Materials and methods: The parameters of induction motors with altered windings were determined based on the motor model circuits. The calculation results were verified on the electromagnetic field models by the finite element method. The modernization cost-effectiveness was determined by the methods of major repairs costs estimation and by comparing them with the costs of the analogues.

Results: We have determined the directions for selecting stator winding parameters of variable-frequency induction motors and calculated the engine parameters at an increased frequency of voltage for the winding with an bigger number of parallel paths, a smaller number of phase turns connected in series while maintaining the number of poles and phase voltage. In case of voltage pulse modulation, the dimensions of the elementary conductors should be determined by the modulation carrier frequency. We have also compared the costs and mass and dimension parameters of general-purpose induction motors with changed winding and their special-purpose analogues.

Conclusions: It is established that in induction motors operating at higher frequencies, it is advisable to increase the parallel winding structures (parallel paths and elementary conductors), to reduce the number of series-connected phase turns at the same number of poles and phase voltage values, which allows maintaining the electrical strength of insulation and magnetic flux, increases the power and efficiency, and reduces the rated and critical slip. If the drive power is over 11 kW, winding modernization in general-purpose motors with 4 or 6 poles makes it possible to achieve lower cost and weight-and-dimension parameters than in their special-purpose analogues.

Key words: induction motor, stator winding, number of parallel paths, voltage-frequency characteristic, variable-frequency electric drive.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.2.041-049

Введение. К асинхронным двигателям (АД) предъявляются высокие требования по энергоэффективности, уровню шума, величине добавочных потерь и др. Для управления работой АД все чаще применяются преобразователи частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения при несущей частоте модуляции до десятков килогерц. В выходном напряжении ПЧ появляются высоко-частотные временные гармоники.

Обмотка статора – важнейшая часть асинхронного двигателя, определяющая его свойства и характеристики [14]. Применение АД общепромышленного исполнения с числом пар полюсов $p > 2$ и изоляцией обмотки статора (ОС), рассчитанной на номинальное фазное напряжение $U_{\Phi 1N}$ при номинальной частоте $f_{1N} = 50$ Гц, в современных частотно-регулируемых электроприводах (ЧРЭ) может оказаться затруднительным, так как при регулировании частоты вращения (ЧВ) АД вверх по пропорциональному закону, обеспечивающему оптимальные условия работы АД [3, 4]

$$U_{\Phi 1} / f_1 = \text{const}, \quad (1)$$

с повышением f_1 необходимо повышать $U_{\Phi 1}$. Это может оказаться неприемлемым по условиям обеспечения требуемой электрической прочности изоляции ОС при повышении напряжения и/или ограничения максимального напряжения, получаемого из промышленной сети [6]. В этих условиях применяются специальные более дорогие частотно-регулируемые АД с усиленной изоляцией, что удорожает систему в целом.

С повышением частоты индуктивные сопротивления обмоток АД возрастают. Это меняет параметры машины. Для эффективной работы АД в ЧРЭ целесообразна модернизация структуры и схем обмоток статора с учетом особенностей работы со спектром высоко-частотных временных гармоник питающего

напряжения. Поэтому модернизация обмотки статора АД для повышения эффективности ЧРЭ является актуальной.

Теоретическое обоснование. Современные ПЧ имеют диапазон регулирования f_1 и функции свободного управления вольто-частотной характеристикой (ВЧХ), что позволяет менять механические и электромеханические характеристики системы [1]. Однако если многополюсные АД общепромышленного исполнения имеют в ОС небольшое число параллельных ветвей a ($a_{\text{мин}} = 1$), то путем модернизации схемы соединений частей ОС с увеличением a' можно эффективно применять такие АД на повышенных частотах f_1 , но с меньшей степенью повышения $U_{\Phi 1}$ без опасения пробоя изоляции. Это позволяет реализовать ЧРЭ при изменении функции управления $U_{\Phi 1}$ за счет внесения изменения в схему подключения секционных групп фаз ОС серийно выпускаемых АД, повышая ЧВ и мощность.

При повышении f_1 при том же числе пар полюсов p увеличивается синхронная ЧВ двигателя n и ЭДС в витках секционных групп фазы ОС $E_{\text{сг}}$. Пренебрегая падением напряжения на сопротивлении обмотки и считая $E_{\text{сг}} \approx U_{\text{сг}}$, амплитудное значение магнитного потока АД должно быть постоянным:

$$\Phi_m \approx \frac{U_{\text{сг}}}{\pi \sqrt{2} f_1 W_{\text{сг}} k_{\text{об1}}} = \text{const}, \quad (2)$$

где $U_{\text{сг}}$ – напряжение, прикладываемое к одной секционной группе; $W_{\text{сг}}$ – число витков в секционной группе; $k_{\text{об1}}$ – обмоточный коэффициент для статора.

Это приводит к необходимости увеличения числа параллельных ветвей обмотки a пропорционально увеличению f_1 , поскольку

$$U_{\text{сг}} = \frac{a U_{\Phi 1}}{p n_{\text{сл}}}, \quad (3)$$

где $U_{\Phi 1}$ – напряжение фазы статора; $n_{\text{сл}}$ – число слоев ОС.

Так как в двигателях серии АИР толщина пазовой изоляции и изоляции обмоточных проводов в пределах одного и того же диапазона высот вращения не изменяется для АД¹ с различным a , то образующееся превышение межвиткового напряжения не будет критичным. Поэтому если в ОС с $a = 1$ симметричные части обмотки пересоединить на большее a' (в пределах допустимого по числу секционных групп с соблюдением симметрии размещения секций и допустимого увеличения синхронной ЧВ магнитного поля) при сохранении p и увеличить f_1 в кратное количество раз, то результирующая ЭДС и необходимое номинальное $U_{\phi 1}$ останутся неизменными. Таким образом, при повышении f_1 и увеличении a , без изменения $U_{\phi 1}$ снижается число последовательно соединенных витков ОС. При этом ЧВ возрастает, Φ_m не изменяется и, так как $U_{\phi 1}$ остается неизменным, обеспечивается прежняя электрическая прочность изоляции ОС.

ЧРЭ с АД чаще всего настраивается на режим поддержания максимального момента, для чего в диапазоне частот $f_1 \leq f_{1\text{НОМ}}$ реализуется ВЧХ, соответствующая (1). Но в диапазоне частот $f_1 > f_{1\text{НОМ}}$ поддерживается $U_1 = U_{1\text{НОМ}}$, что связано с ограничением максимально возможного напряжения. Кроме того, в ПЧ могут реализовываться разные способы I/R -компенсации [5].

Реализация в современных ПЧ функции управления видом ВЧХ позволяет в диапазоне $f_1 \leq f_{1\text{НОМ}}$ настраивать программируемую зависимость $U_1 = F(f_1)$. Для рассматриваемой модернизации достаточно изменения коэффициента соотношения U_1/f_1 (рис. 1), а параметры I/R -компенсации скорректировать в функции автоопределения электрических параметров двигателя [7].

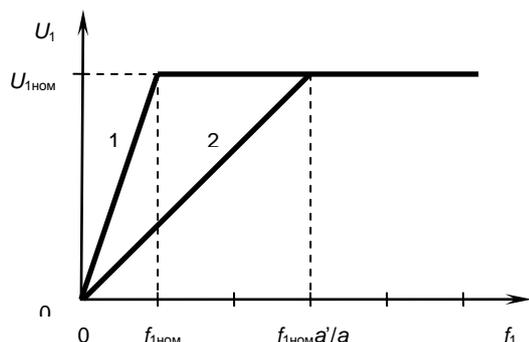


Рис. 1. ВЧХ ПЧ при $U_1/f_1 = \text{const}$: 1 – при стандартной настройке; 2 – при кратном уменьшении соотношения U_1/f_1 на величину a'/a

Применение ШИМ с несущей частотой до 40 кГц вызывает в обмотках АД волновые процессы и перенапряжения. Поэтому обмотка частотно-регулируемого АД должна иметь более надежную изоляцию и более высокую степень пропитки.

Для исследования были выбраны АД серии АИР, в которых в независимости от по-

люсности обмотки применяются подшипники с ЧВ не менее 3000 об/мин² [2]. Для АД АИР160S6 ($p = 3$) с синхронной $n = 1000$ об/мин при модернизации на повышенную $n = 3000$ об/мин возможно пересоединение симметричных частей ОС и образование $a' = 3$ при сохранении неизменным p . Это является допустимым исходя из условия симметрии электрических параметров параллельно соединяемых ветвей, поскольку у соседних полюсов разная высота укладки в пазы по слоям.

Так как сечение проводников ОС в модернизируемых АД и требования к допустимой плотности тока остаются неизменными, а общий ток фазы пропорционален a' , номинальная мощность машины $P_{\text{НОМ}}$ может быть увеличена в кратное число раз. При этом может потребоваться изменение сечения проводов соединения концов секционных групп, концов фаз и диаметра шпилек (или болтов) выводного устройства.

Номинальный момент на валу двигателя $M_{\text{НОМ}}$ при работе на повышенной мощности и повышенной $n_{\text{НОМ}}$ в условиях незначительных изменений номинального скольжения $s_{\text{НОМ}}$ остается практически таким же, как и до модернизации [6]:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P'_{\text{НОМ}}}{\omega'_{\text{НОМ}}} = \frac{a' P_{\text{НОМ.0}}}{2\pi a' n_{\text{НОМ.0}}} = \frac{p P_{\text{НОМ}}}{2\pi f_1 (1 - s_{\text{НОМ}})}. \quad (3)$$

Увеличение f_1 в a'/a раз при снижении числа витков последовательно соединенных в фазе ОС в a' раз и образованием a' параллельных ветвей приводит к уменьшению индуктивных сопротивлений эквивалентной схемы замещения в a' раз, уменьшению активного сопротивления обмотки статора и приведенного активного сопротивления ротора в a'^2 раз. При том же $U_{\phi 1}$ максимальный момент двигателя M_{max} сохраняется тем же:

$$M_{\text{max}} \approx \pm \frac{pm_1 U_{\phi 1}^2}{2\omega'_{\text{1}} X'_{\text{к}}} = \pm \frac{pm_1 U_{\phi 1}^2}{4\pi (a' f_1) \left(\frac{X_{\text{к}}}{a'}\right)} = \pm \frac{pm_1 U_{\phi 1}^2}{4\pi f_1 X_{\text{к}}}. \quad (4)$$

M_{max} может изменяться из-за изменения индуктивного сопротивления $X_{\text{к}}$ при насыщении зубцовых зон, что может быть ограничено уставкой ПЧ по максимальному току [5, 6]. Критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ снижается в a' раз, и следовательно, при $M_{\text{НОМ}}$ пропорционально снизится номинальное скольжение $s_{\text{НОМ}}$. Поэтому используемые диаметры вала АД будут оставаться соответствующими требованиям по механической прочности и изменения диаметров не требуется. Допустимый прогиб вала на $n \approx 3000$ об/мин не превышает размера, соответствующего минимальной величине воздуш-

² Петриков Л.В., Корначенко Г.Н. Асинхронные электродвигатели: Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация / Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.

ного зазора для машин серии АИР, поэтому расточка магнитопровода не нужна.

При работе АД при повышенных f_1 и n возрастают шумы и вибрации [8], однако при правильном подборе соотношения числа пазов статора и ротора изменение шумов и вибраций будет ограниченным.

Изменение подключения секций ОС, подразумевающее увеличение a' , влечет за собой следующие основные виды производимых работ: разбор корпуса без выпрессовки подшипников; демонтаж проводов соединения концов обмотки к болтам или шпилькам коробки выводов; выявление мест перехода обмотки на следующую секционную группу в каждой фазе; обеспечение разрыва на требуемых участках непрерывной обмотки; освобождение краев обмоточного провода от изоляции; пайка или сварка образовавшихся концов с проводами выводов обмотки или соединительными наконечниками; крепление провода и бандажирование. Для двигателей АИР средней и большой мощности требуется изменение коробки выводов, а также проверка соответствия болтов крепления к установочной поверхности. Модернизация АД заканчивается сборкой и испытаниями [9].

При частоте 50 Гц в обмотке статора используются элементарные проводники диаметром (высотой) не более 2,5 мм – соотнесено с глубиной проникновения электромагнитной волны

$$h = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu}} \quad (5)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала, Ом·м; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость материала, о.е.

При несущей частоте ШИМ 10–40 кГц, т.е. в 200–800 раз выше частоты 50 Гц, размер таких проводников оказывается много больше глубины проникновения электромагнитной волны. Это приводит к сильно выраженному вытеснению высших гармоник тока на поверхность проводника, что эквивалентно увеличению его активного сопротивления и ведет к дополнительным потерям в обмотке, повышенному энергопотреблению и перегреву обмотки. Коэффициент Фильда – коэффициент увеличения активных потерь за счет вытеснения тока в проводниках обмотки статора АД при частотах уже 500 Гц, может превышать 2 [15].

Число элементарных (параллельно включенных) проводников в одном эффективном проводнике обмотки статора АД обычно не превышает 10–12. Снижение тока параллельной ветви и, соответственно, сечения эффективного проводника можно добиваться увеличением числа параллельных ветвей обмотки. При том же числе элементарных проводников в одном эффективном сечении элементарного

проводника будет пропорционально снижаться. Однако увеличение числа параллельных ветвей обмотки статора возможно только до определенных пределов, определяемых числом симметричных частей обмотки, и обычно не превышает 6.

Снижения отрицательного проявления эффекта вытеснения тока на поверхность паза, заключающегося в возникновении циркуляционных токов между параллельно включенными проводниками, находящихся в разных магнитных условиях по высоте паза, можно добиваться транспозицией проводников. Но для АД транспозиция проводников обмотки не выполняется.

Таким образом, для эффективного применения в частотно-регулируемом электроприводе асинхронных двигателей общепромышленного исполнения с увеличенной частотой питающего напряжения может оказаться целесообразной модернизация схемы обмотки статора с увеличением числа параллельных структур обмотки (числа параллельных ветвей и числа элементарных проводников в одном эффективном), снижением числа последовательно соединенных витков фазы при сохранении числа пар полюсов и величины фазного напряжения, что позволит сохранить электрическую прочность изоляции обмотки статора и величину магнитного потока, повысить мощность двигателя и КПД, снизить номинальное и критическое скольжения.

Методы исследования. Для определения параметров выпускаемых серийно АД в условиях ограниченной информации в справочных материалах и получения новых характеристик при внесении изменений в параметры АД использовалась система проектирования по схемным моделям АД с короткозамкнутым ротором, базирующаяся на известной методике [10]. Для проверки результатов математических расчетов использовалось моделирование электромагнитного состояния модернизированного АД методом конечных элементов [11]. Для оценки рентабельности проводимой модернизации использовался метод оценки затрат при капитальном ремонте АД [12], а также метод сравнения стоимости выбираемых АД серии АИР до вмешательства в схему ОС [4, 9].

Моделировалась и анализировалась модернизация схемы обмотки статора АД АИР160S6 с изменением $P_{ном}$ от 11 до 33 кВт и кратного увеличения синхронной n с 1000 об/мин при $f_1 = 50$ Гц до 3000 об/мин при $f_1 = 150$ Гц. Для определения характеристик модернизируемого АД в расчетный модуль внеслись необходимые изменения. Для уточнения результатов математических расчетов по схемным моделям осуществлялась их проверка на полевых конечноэлементных электромагнитных моделях модернизированного АД.

Результаты исследования. Результаты расчета рабочих характеристик модернизированного АД в сравнении с исходным двигателем АИР160S6 до модернизации, а также с аналогами АД с синхронной $n = 3000$ об/мин и мощностью, близкой к расчетной мощности, приведены в таблице.

Расчитанные электромагнитные и электромеханические параметры АД с модернизированной схемой ОС соответствуют теоретическим предпосылкам. Изменение коэффициента Филльда [10] не оказало существенного влияния на величину сопротивления ОС и не

столь существенно, как предполагалось, повлияло на активное сопротивление обмотки ротора, что, в свою очередь, значительно уменьшило величины $S_{НОМ}$ и $S_{КР}$ и, как следствие, величину тепловых потерь в обмотках при работе в пределе номинальной мощности.

С использованием результатов полевых расчетов рассчитаны рабочие и механические характеристики АД при $U_{НОМ}$ и $f_1 = 150$ Гц. Отклонение полученных результатов, по сравнению с представленными в таблице данными, составило не более 2,6 %, для КПД – 0,5 %.

Сравнение показателей АД до и после модернизации обмотки статора и с аналогами

Показатели			Марка электродвигателя			
			АИР160S6	АИР160S6 ПЧ150	АИР160S6	АИР160S6
Число параллельных ветвей	a_1	3	1	3	2	2
Частота питающей сети	f_1	150	50	150	50	50
Номинальная мощность	$P_{НОМ}$	33	11	33	30	37
Синхронная частота вращения	n	3000	1000	3000	3000	3000
Номинальная частота вращения	$n_{НОМ}$	2967	970	2967	2950	2950
Номинальное скольжение	$S_{НОМ}$	0,011	0,03	0,011	0,017	0,017
Максимальная частота вращения	$n_{МАКС}$	7500	7500	7500	7500	6000
Номинальное значение КПД	$\eta_{НОМ}$	0,944	0,875	0,944	0,914	0,915
Номинальное значение $\cos \varphi$	$\cos \varphi_{НОМ}$	0,76	0,82	0,76	0,9	0,88
Масса	G	116	116	116	170	230
Момент инерции	J	0,05	0,05	0,05	0,07	0,14
Стоимость электродвигателя	C	~40,0	26,7	~40,0	41,3	51,8
Периметр поперечного сечения ребер станины	P_p	0,64	0,32	0,64	–	–
Превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды (класс F)	ΔT	116,9	109,8	116,9	–	–

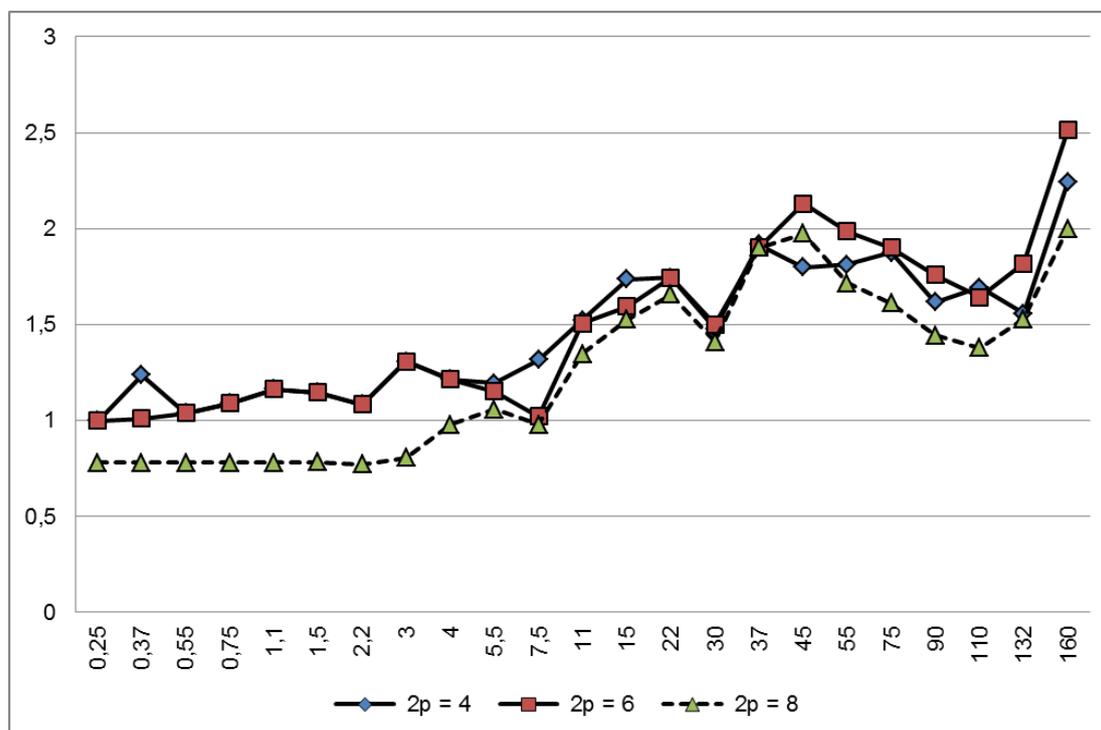


Рис. 2. Соотношение стоимости серийно выпускаемого АД серии АИР и аналогичного АД меньшей мощности и частоты вращения до модернизации схемы ОС

Общий объем работ по модернизации АД с изменением схемы ОС с учетом улучшения охлаждения при выполнении их сторонними организациями составляет 50–60 % от начальной стоимости АД [9]. При наличии собственного ремонтного производства цена модернизации АД уменьшается. Поэтому нижней границей рентабельности предлагаемой модернизации АД с изменением схемы ОС по капитальным вложениям при выполнении ее сторонними организациями или за счет своего ремонтного производства можно считать соотношение стоимости обычно выбираемых АД серии АИР и их аналогов меньшей мощности и n до вмешательства в схему ОС (рис. 2) равным $1,5 \pm 0,1$.

Внесение изменений в конструкцию АД на стадии его производства заводом-изготовителем будет соответствовать нижней границе рентабельности $1,15 \pm 0,05$ [9].

Для частотно-регулируемого АД [16], предназначенного для работы от ПЧ с ШИМ напряжения, целесообразно выполнять обмотку статора из токопроводящих жгутов, состоящих из множества элементарных изолированных проводников, опрессованных в общую витковую изоляцию и закрученных на определенный угол либо подвергнутых транспозиции по высоте паза. Диаметр каждого элементарного проводника не должен превышать двойной глубины проникновения электромагнитного поля для гармоник, соответствующих несущей частоте ШИМ. Это устраняет эффект вытеснения высших гармоник тока на поверхность проводника и возрастание омического сопротивления, при этом дополнительные потери в обмотке не возрастают.

Обсуждение. Анализ полученных данных (см. таблицу и рис. 2) показывает, что модернизация схемы обмотки статора АД серии АИР с увеличением числа параллельных ветвей обмотки, кратным снижению числа последовательно соединенных витков фазы, при сохранении числа пар полюсов, при пропорциональном увеличении частоты питающего напряжения и неизменном фазном напряжении позволяет сохранить величину магнитного потока, повысить мощность АД и его КПД, снизить номинальное и критическое скольжения.

Выявлено, что при расчетной мощности электропривода не менее 11 кВт подобная модернизация схемы обмотки статора АД меньшей мощности с $2p = 4$ или $2p = 6$ позволяет достичь стоимости АД меньшей, чем стоимость АД с $n \approx 3000$ об/мин. Модернизация схемы обмотки статора для АД с $2p = 8$ по стоимостным показателям менее эффективна и актуальна в диапазоне мощностей 37–75 кВт.

Для АД АИР160S6 модернизация схемы обмотки статора с увеличением в три раза числа параллельных ветвей обмотки и повышением частоты напряжения до 150 Гц с изме-

нением параметров ВЧХ может обеспечить повышение номинального КПД АД до 3 %, по сравнению с его аналогами на ту же частоту вращения, что объясняется уменьшением $S_{ном}$. По сравнению с аналогами, по мощности и частоте вращения АИР160S6ПЧ150 имеет меньшие массогабаритные показатели и оценочную стоимость, что важно для повышения быстродействия.

К недостаткам модернизации схемы обмотки статора АД АИР160S6 можно отнести несколько сниженный $\cos \varphi$, что менее приоритетно, чем более высокий КПД [10], и повышенный перегрев ОС, требующий увеличения интенсивности охлаждения. В таблице рассмотрен вариант с увеличением в 2 раза площади ребер охлаждения за счет монтажа пристроенных радиаторов и нанесением на площади соприкосновения теплопроводящей мастики. Возможны и другие методы улучшения охлаждения [9, 13].

Выводы. Модернизация схем обмотки статора АД с увеличением числа параллельных ветвей и элементарных проводников обмотки, кратным снижению числа последовательно соединенных витков фазы, при сохранении числа пар полюсов, при пропорциональном увеличении частоты питающего напряжения и неизменном фазном напряжении позволяет эффективно применять АД общепромышленного исполнения на повышенных частотах в частотно-регулируемом электроприводе при сохранении электрической прочности изоляции обмотки статора и величины магнитного потока, повысить мощность АД и КПД, снизить номинальное и критическое скольжения. При мощности электропривода не менее 11 кВт подобная модернизация схемы обмотки статора АД общепромышленного исполнения с $2p = 4$ или $2p = 6$ меньшей мощности позволяет достичь меньших массогабаритных показателей и стоимости модернизированного АД. Модернизация схемы обмотки статора для АД общепромышленного исполнения с $2p = 8$ по стоимостным показателям целесообразна в диапазоне мощностей 37–75 кВт.

Обмотку статора АД, предназначенного для работы от ПЧ с ШИМ напряжения, целесообразно выполнять из множества элементарных изолированных проводников с транспозицией по высоте паза. Диаметр каждого элементарного проводника не должен превышать двойной глубины проникновения электромагнитного поля для гармоник, соответствующих несущей частоте ШИМ. Это устраняет эффект вытеснения высших гармоник тока на поверхность проводника и возрастание омического сопротивления, при этом дополнительные потери не возрастают.

Список литературы

1. **Удут Л.С., Чернышев А.Ю., Гусев Н.В.** Разработка и моделирование асинхронных электроприводов со скалярным управлением // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 3. – С. 43–49.
2. **Борисов Ю.С., Некрасов А.И., Некрасов А.А.** Анализ ресурсов подшипниковых узлов электродвигателей, применяемых сельскохозяйственным производством // Вестник ВИЭСХ. Сер. Энергетика и электротехнологии в сельском хозяйстве. – 2009. – Вып. 1(4). – С. 107–114.
3. **Аспекты** разработки асинхронного электротехнического комплекса шахтных контактно-аккумуляторных электровозов / О.Н. Юрченко, И.О. Синчук, Э.С. Гузов и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 1, № 8. – С. 5.
4. **Бульхина Р.Р.** Снижение стоимости частотно-регулируемого асинхронного электропривода при изменении функции управления напряжением и за счет минимальных конструктивных изменений в асинхронном двигателе меньшей мощности и частоты вращения // Молодежная наука – XXI веку: материалы VI межмуниципальной молодежной науч.-практич. конф. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – С. 27–28.
5. **Панов С.И., Рубцов В.И.** Совершенствование скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода с улучшенными динамическими характеристиками // Символ науки. – 2017. – № 5. – С. 41–48.
6. **Соколовский Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 272 с.
7. **Калачев Ю.Н.** К вопросу определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя // Труды IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – Пермь, 2016. – С. 352–355.
8. **Шубов И.Г.** Шум и вибрация электрических машин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 208 с.
9. **Бульхина Р.Р.** Анализ необходимых конструктивных изменений при модернизации асинхронного двигателя на увеличение частоты вращения и мощности // Молодежная наука: вызовы и перспективы: [Электронный ресурс]: Материалы I Региональной науч.-практич. конф. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – С. 59–61.
10. **Проектирование** электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. проф. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2015. – 767 с.
11. **Уточнение** интегральных параметров вентильного двигателя с постоянными магнитами на основе моделирования магнитного поля методом конечных элементов / В.Е. Высоцкий, Р.Г. Горшков, Е.А. Шумилов, Д.О. Чуянов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Физико-математические науки. – 2011. – № 3. – С. 145.
12. **Борисов Ю.С., Некрасов А.И., Марчевский С.В.** Условия рентабельности капитального ремонта электродвигателей // Вестник ВИЭСХ. – 2014. – № 1. – С. 68–72.
13. **Новые** конструктивные решения для асинхронных с короткозамкнутым ротором энергоресурсосберегающих регулируемых электродвигателей /
- О.Н. Парфенович, А.С. Третьяков, И.В. Соколов, О.А. Капитонов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2011. – № 1. – С. 110–119.
14. **Ванурин В.Н.** Статорные обмотки асинхронных электрических машин: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2014. – 176 с.
15. **Исследование** многополюсного асинхронного тягового частотно-регулируемого двигателя / В.Я. Беспалов, А.Б. Красовский, М.В. Панихин, В.Г. Фисенко // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 5. – 14 с. doi: 10.7463/0514.0709521.
16. **Патент** на полезную модель RU № 166064 U1. Обмотка якоря асинхронного двигателя / Ю.Б. Казаков, Н.К. Швецов (Россия). Заявка № 2016112514/07 от 01.04.2016. Опубл. 10.11.2016. Бюл. № 31.

References

1. Udut, L.S., Chernyshev, A.Yu., Gusev, N.V. Razrabotka i modelirovanie asinkhronnykh elektroprivodov so skalyarnym upravleniem [Development and modeling of induction electric drives with scalar control]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2015, no. 3, pp. 43–49.
2. Borisov, Yu.S., Nekrasov, A.I., Nekrasov, A.A. Analiz resursov podshipnikovyykh uzlov elektrodvigatelay, primenyaemykh sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Analysis of bearing life of electric drive units used in agricultural industry]. *Vestnik VIESKh. Energetika i elektrotekhnologii v sel'skom khozyaystve*, 2009, issue 1(4), pp. 107–114.
3. Yurchenko, O.N., Sinchuk, I.O., Guzov, E.S., Shokarev, D.A., Skapa, E.I. Aspekty razrabotki asinkhronnogo elektrotekhnicheskogo kompleksa shakhtnykh kontaktno-akkumulyatornykh elektrovozov [Aspects of developing an induction electric motor unit of mining trolley- and battery-powered locomotives]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, 2015, vol. 1, no. 8, p. 5.
4. Bulkhina, R.R. Snizhenie stoimosti chastotno-reguliruemogo asinkhronnogo elektroprivoda pri izmenenii funktsii upravleniya napryazheniem i za schet minimal'nykh konstruktivnykh izmeneniy v asinkhronnom dvigatele men'shey moshchnosti i chasto-ty vrashcheniya [Reduction of the cost of variable-frequency induction electric drives by changing the voltage control function and introducing minimum changes to the induction drives of lower power and speed]. *Materialy VI mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Molodezhnaya nauka – XXI veku»* [Proceedings of the VI International youth scientific and practical conference «Youth science – to the XXI century»]. Samara: Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2016, pp. 27–28.
5. Panov, S.I., Rubtsov, V.I. Sovershenstvovanie skalyarnogo upravleniya chastotno-reguliruemogo asinkhronnogo elektroprivoda s uluchshennymi dinamicheskimi kharakteristikami [Improvement of scalar control of variable-frequency induction electric drives with advanced dynamic characteristics]. *Simvol nauki*, 2017, no. 5, pp. 41–48.
6. Sokolovsky, G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Variable-frequency AC electric drives]. Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2006. 272 p.
7. Kalachev, Yu.N. K voprosu opredeleniya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo

dvigatelya [On determining parameters of the induction motor equivalent circuit]. *Trudy IX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016* [Collected works of the XI International (XX All-Russian) conference on automated electric drives AED-2016 (AEP-2016)]. Perm', 2016, pp. 352–355.

8. Shubov, I.G. *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin* [Noise and vibration of electric machines]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1986. 208 p.

9. Bulkhina, R.R. Analiz neobkhodimykh konstruktivnykh izmeneniy pri modernizatsii asinkhronnogo dvigatelya na uvelichenie chastoty vrashcheniya i moshchnosti [Analysis of design changes required for modernization of induction drives]. *Materialy I Regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Molodezhnaya nauka: vyzovy i perspektivy»* [Proceedings of the 1st regional scientific and practical conference «Youth Science: challenges and prospects»]. Samara, Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2017, pp. 59–61.

10. Kopylov, I.P., Klovov, B.K., Morozkin, V.P., Tokarev, B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electric Machine Design]. Moscow, Yurayt, 2015. 767 p.

11. Vysotsky, V.E., Gorshkov, R.G., Shumilov, E.A., Chuyanov, D.O. Utochnenie integral'nykh parametrov ventil'nogo dvigatelya s postoyannymi magnitami na osnove modelirovaniya magnitnogo polya metodom konechnykh elementov [Correction of integral parameters of inverter-fed drives with permanent magnets by modelling magnetic field by the finite element

method]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2011, no. 3, pp. 145.

12. Borisov, Yu.S., Nekrasov, A.I., Marchevsky, S.V. Usloviya rentabel'nosti kapital'nogo remonta elektrodvigatelye [Conditions ensuring cost-effectiveness of electric drive major repairs]. *Vestnik VIESKh*, 2014, no. 1, pp. 68–72.

13. Parfenovich, O.N., Tretyakov, A.S., Sokolov, I.V., Kapitonov, O.A. Novye konstruktivnye resheniya dlya asinkhronnykh s korotkozamknutym rotorom energoresursosberegayushchikh reguliruemyykh elektrodvigatelye [New design solutions for energy-efficient controlled induction motors with a squirrel-cage rotor]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2011, no. 1, pp. 110–119.

14. Vanurin, V.N. *Statornye obmotki asinkhronnykh elektricheskikh mashin* [Stator windings of induction electric machines]. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo «Lan'», 2014. 176 p.

15. Bespalov, V.Ya., Krasovskiy, A.B., Panikhin, M.V., Fisenko, V.G. Issledovanie mnogopolysnogo asinkhronnogo tyagovogo chastotno-reguliruemogo dvigatelya [A study of multi-polar variable-frequency induction traction drives]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2014, no. 5. 14 p. doi: 10.7463/0514.0709521.

16. Kazakov, Yu.B., Shvetsov, N.K. *Obmotka yakorya asinkhronnogo dvigatelya* [Induction motor armature winding]. Patent RF na poleznuyu model' RU, no. 166064 U1, 2016.

Бирюков Алексей Николаевич,

ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет» филиал в г. Сызрани, старший преподаватель кафедры электромеханики и промышленной автоматизации, телефон (8464) 98-39-58, e-mail: biryukov-a-n@yandex.ru

Biryukov Aleksei Nikolayevich,

Samara State Technical University, Syzran branch, Senior Lecturer of the Electromechanics and Industrial Automation Department, telephone (8464) 98-39-58, e-mail: biryukov-a-n@yandex.ru

Воронин Станислав Михайлович,

ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет» филиал в г. Сызрани, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и промышленной автоматизации, телефон (8464) 98-39-58.

Voronin Stanislav Mikhailovich,

Samara State Technical University, Syzran branch, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electromechanics and Industrial Automation Department, telephone (8464) 98-39-58.

Шумилов Егор Алексеевич

ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет» филиал в г. Сызрани, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и промышленной автоматизации, телефон (8464) 98-39-58, e-mail: shumilov_e_a@mail.ru

Shumilov Egor Alekseyevich,

Samara State Technical University, Syzran branch, Senior Lecturer of the Electromechanics and Industrial Automation Department, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electromechanics and Industrial Automation Department, telephone (8464) 98-39-58, e-mail: shumilov_e_a@mail.ru

Казаков Юрий Борисович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики,

телефон (4932) 26-97-06.

Kazakov Yuri Borisovich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor of the Electromechanics Department,

telephone (4932) 26-97-06.