

УДК 621.313.

И. А. Бутылин, М. А. Ваганов, Ю. А. Грубман, М. В. Демина, И. А. Пименова
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический
 университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Влияние длины пакета стали статора асинхронного двигателя на его оптимальную поперечную геометрию

Предлагаемая модель асинхронного двигателя позволяет оценить влияние длины пакета стали статора асинхронного двигателя на параметры, характеризующие его оптимальную поперечную геометрию при разных числах пар полюсов. Анализируется влияние длины пакета стали статора в двух вариантах, а именно, непосредственно и в виде относительного параметра, представляющего собой отношение длины пакета стали статора к диаметру его расточки. Показано, что при повышении числа пар полюсов асинхронного двигателя меняется характер влияния уровня магнитных индукций на участках магнитной системы на оптимальное значение относительного диаметра расточки статора.

Длина пакета стали статора, относительный диаметр расточки статора, магнитная индукция в воздушном зазоре, магнитные индукции в сердечниках статора и ротора, число пар полюсов

При анализе фундаментального выражения для функционала F_{M*} , описывающего оптимальную поперечную геометрию асинхронного двигателя [1], относительная длина l_* его пакета стали статора предполагалась постоянной и равной 0.5, что позволило сократить на первом этапе анализа число варьируемых переменных без потери общности в полученном решении. В действительности параметр l_* входит в состав указанного функционала как независимая переменная, что и определяет его полную фундаментальность (в отличие от выражения машинной постоянной), относительно поперечного и продольного сечений активного ядра асинхронного двигателя. Указанное обстоятельство, т. е. представление параметра l_* как независимой переменной, позволяет выбирать при проектировании асинхронного двигателя любое числовое значение l_* , так как при выводе выражения для функционала F_{M*} не было необходимости во введении каких-либо дополнительных ограничивающих допущений относительно l_* . Формально это означает, что мы можем спроектировать асинхронный двигатель как с большим отношением его длины l к наружному диаметру D_{1H} , так и короткий или плоский двигатель в зависимости от требований технического задания, составлен-

ных с учетом его эксплуатационных особенностей. При этом, что вполне естественно, будут меняться и технико-экономические показатели проектируемого двигателя, в частности, например, его показатель качества [2].

По этой причине необходимо располагать прежде всего необходимой информацией о степени возможного влияния относительной длины l_* пакета стали статора асинхронного двигателя на параметры, характеризующие его оптимальную поперечную геометрию, к которым могут быть отнесены: относительный диаметр расточки статора D_{1*} , а также магнитные индукции в воздушном зазоре B_δ и сердечниках B_{c1} , B_{c2} и зубцах B_{31} , B_{32} статора и ротора. Подобная информация будет также полезной при проектировании серий асинхронных двигателей, когда в целях уменьшения числа штампов и, следовательно, снижения себестоимости производства, целесообразно размещать на одном наружном диаметре пакета стали статора D_{1H} несколько пакетов разной длины l .

Функциональный множитель F_{M*} , характеризующий как поперечную, так и продольную геометрию активной зоны асинхронного двигателя, определяется следующим выражением из [1]:

$$F_{M*} = \frac{D_{1*}^4 l_{1*}^2 B_{\delta}^2 \sqrt{k_{\pi 1} k_{\pi 2}}}{\sqrt{\left(k_{\pi 1} l_{1*} + k_{\beta 1} \frac{D_{1*}}{p}\right) \left(l_{1*} + \frac{\pi D_{1*} k_j}{z_2 \sin \frac{\pi p}{z_2}}\right)}} \frac{1}{p}, \quad (1)$$

$$k_{\pi 1} = \frac{1}{4} (k_{c, 31}^2 k'_{z1} + k_{ш, 31}^2 k''_{z1}),$$

$$k_{c, 31} = \left(\frac{1}{D_{1*}} - \frac{B_{\delta}}{p k_{c1} B_{c1}} \right) \sin \frac{\pi}{z_1} - \frac{\pi}{z_1} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{31}},$$

$$k_{ш, 31} = (1 + 2h_{ш1*}) \sin \frac{\pi}{z_1} - \frac{\pi}{z_1} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{31}},$$

$$k'_{z1} = z_1 \frac{\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{2}{z_1}\right) + \operatorname{ctg} \frac{\pi}{z_1}}{\left(1 + \sin \frac{\pi}{z_1}\right)^2}, \quad k''_{z1} = z_1 \frac{\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{2}{z_1}\right) - \operatorname{ctg} \frac{\pi}{z_1}}{\left(1 - \sin \frac{\pi}{z_1}\right)^2},$$

$$k_{\pi 2} = \frac{1}{4} (k_{ш, 32}^2 k'_{z2} + k_{c, 32}^2 k''_{z2}),$$

$$k_{ш, 32} = \left(1 - \frac{h_{ш2*}}{D_{2H*}} \right) \sin \frac{\pi}{z_2} - \frac{\pi}{z_2} \frac{B_{\delta}}{k_{c2} B_{32}},$$

$$k_{c32} = \left(\frac{D_{2*}}{D_{2H*}} + \frac{B_{\delta}}{p k_{c2} B_{c2}} \right) \sin \frac{\pi}{z_2} - \frac{\pi}{z_2} \frac{B_{\delta}}{k_{c2} B_{32}},$$

$$k'_{z2} = z_2 \frac{\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{2}{z_2}\right) + \operatorname{ctg} \frac{\pi}{z_2}}{\left(1 + \sin \frac{\pi}{z_2}\right)^2},$$

$$k''_{z2} = z_2 \frac{\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{2}{z_2}\right) - \operatorname{ctg} \frac{\pi}{z_2}}{\left(1 - \sin \frac{\pi}{z_2}\right)^2},$$

$$D_{2H*} = D_{2H} / D_{1H}, \quad D_{2*} = D_2 / D_{1H},$$

$$h_{ш1*} = h_{ш1} / D_{1H}, \quad h_{ш2*} = h_{ш2} / D_{1H}.$$

Полная расшифровка всех обозначений в этих выражениях представлена в [1]. Видно, что относительная длина пакета стали статора l_{1*} входит непосредственно только в само выражение (1). В [3] показано, что функциональный множитель F_{M*} является одним из сомножителей общего выражения, определяющего электромагнитный момент асинхронного двигателя. И так как произведение $D_{1*}^2 l_{1*}$ характеризует объем расточки статора двигателя, то, следовательно, в соответствии с выражением (1) при учете $M_{эм} = k_F D_{1H}^5 F_{M*m} F_H$ из [3] оказывается, что электромагнитный момент асинхронного двигателя практически пропорционален квадрату объема расточки статора и при этом пропорционален пятой степени наружного диа-

метра пакета стали статора, что и подтверждается на практике повышением уровня использования активных материалов асинхронных двигателей с увеличением их мощности. Выполним анализ функционального множителя F_{M*} , принимая относительную длину пакета стали статора l_{1*} в качестве независимой переменной. С этой целью определим оптимальные значения относительного диаметра пакета стали статора D_{1*m} и магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta m}$ и соответствующие им оптимальные значения F_{M*m} самого функционального сомножителя F_{M*} для ряда значений l_{1*} . При этом для сохранения общности полученных результатов все расчеты по-прежнему будем выполнять для двух наборов значений магнитных индукций в стальных участках магнитных цепи асинхронного двигателя, перечисленных в табл. 1. Следует также предусмотреть возможность неодинакового влияния относительной длины пакета стали статора l_{1*} на оптимальность поперечной геометрии асинхронного двигателя при разных числах пар полюсов p его обмотки статора и по этой причине все необходимые расчеты будут выполнены для следующих значений числа полюсов $2p = 2; 4; 6; 8; 10; 12$, охватывающих большинство общепромышленных серий асинхронных двигателей.

Таблица 1

Номер строки	B_{31} , Тл	B_{c1} , Тл	B_{32} , Тл	B_{c2} , Тл
1	1.7	1.5	1.7	1.2
2	2.0	1.8	2.0	1.5

Результаты расчетов для наглядности и удобства последующего анализа представлены в табличной в табл. 2 и графической на рис. 1–3 формах. Причем в табл. 2 в столбце номера строк числа 1 и 2 соответствуют номерам строк 1 и 2 табл. 1. И точно также на рис. 1–3 обозначения кривых 1 и 2 соответствуют номерам строк табл. 1.

Из данных, приведенных в табл. 2, и из графиков, представленных на рис. 1 и 2, видно, что возрастание относительной l_{1*} , а значит, и абсолютной l_1 длины пакета стали статора сопровождается повышением оптимального значения относительного диаметра расточки D_{1*m} и снижением оптимального значения магнитной индукции $B_{\delta m}$ в воздушном зазоре асинхронного двигателя.

Таблица 2

$2p$	Рассчитываемые величины	Номер строки	l_{1*}							
			0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
2	D_{1m}	1	0.6203	0.6254	0.6285	0.6305	0.6320	0.6331	0.6340	0.6347
		2	0.6160	0.6213	0.6244	0.6265	0.6280	0.6292	0.6301	0.6308
	$B_{\delta m}, \text{Тл}^2$	1	0.5007	0.4974	0.4952	0.4937	0.4926	0.4917	0.4910	0.4904
		2	0.6155	0.6110	0.6082	0.6062	0.6047	0.6035	0.6026	0.6019
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$	1	0.4398	1.9639	3.5769	5.3454	7.2068	9.1282	11.100	13.100
		2	0.9948	2.8893	5.2590	7.8557	10.600	13.400	16.300	19.200
4	D_{1m}	1	0.6487	0.6562	0.6600	0.6623	0.6638	0.6649	0.6657	0.6664
		2	0.6481	0.6558	0.6597	0.6620	0.6636	0.6647	0.6656	0.6662
	$B_{\delta m}, \text{Тл}^2$	1	0.8095	0.8007	0.7961	0.7932	0.7913	0.7898	0.7887	0.7879
		2	0.9664	0.9555	0.9498	0.9463	0.9439	0.9422	0.9408	0.9398
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$	1	1.2642	3.4700	5.9467	8.5423	11.200	13.900	16.600	19.300
		2	1.8020	4.9356	8.4581	12.100	15.900	19.800	23.600	27.500
6	D_{1m}	1	0.6865	0.6944	0.6981	0.7001	0.7015	0.7024	0.7031	0.7037
		2	0.6910	0.6978	0.7009	0.7026	0.7038	0.7046	0.7052	0.7056
	$B_{\delta m}, \text{Тл}^2$	1	0.8693	0.8617	0.8581	0.8560	0.8546	0.8536	0.8529	0.8523
		2	1.0207	1.0120	1.0078	1.0054	1.0038	1.0026	1.0018	1.0011
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$	1	1.3756	3.5609	5.9306	8.3726	10.900	13.300	15.900	18.400
		2	1.9214	4.9782	8.2939	11.700	15.200	18.700	22.200	25.700
8	D_{1m}	1	0.7178	0.7254	0.7286	0.7304	0.7316	0.7324	0.7330	0.7335
		2	0.7210	0.7277	0.7306	0.7322	0.7332	0.7340	0.7345	0.7349
	$B_{\delta m}, \text{Тл}^2$	1	0.8627	0.8571	0.8547	0.8532	0.8523	0.8517	0.8512	0.8509
		2	1.0101	1.0038	1.0010	0.9993	0.9983	0.9976	0.9970	0.9966
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$	1	1.3236	3.3014	5.4029	7.5497	9.7181	11.900	14.100	16.300
		2	1.8391	4.5899	7.5129	10.500	13.500	16.500	19.600	22.600
10	D_{1m}	1	0.7397	0.7467	0.7496	0.7512	0.7522	0.7529	0.7535	0.7538
		2	0.7412	0.7483	0.7512	0.7529	0.7539	0.7546	0.7551	0.7555
	$B_{\delta m}, \text{Тл}^2$	1	0.8501	0.8458	0.8440	0.8430	0.8424	0.8419	0.8416	0.8413
		2	0.9952	0.9904	0.9883	0.9871	0.9864	0.9859	0.9855	0.9852
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$	1	1.2255	2.9756	4.8108	6.6756	8.5544	10.400	12.300	14.200
		2	1.6994	4.1275	6.6738	9.2612	11.900	14.500	17.100	19.700
12	D_{1m}	1	0.7545	0.7609	0.7636	0.7650	0.7659	0.7665	0.7670	0.7673
		2	0.7558	0.7623	0.765	0.7664	0.7673	0.7679	0.7684	0.7687
	$B_{\delta m}, \text{Тл}^2$	1	0.8411	0.8377	0.8363	0.8356	0.8351	0.8348	0.8345	0.8343
		2	0.9851	0.9813	0.9797	0.9788	0.9782	0.9778	0.9776	0.9773
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$	1	1.1333	2.6926	4.3122	5.9523	7.6013	9.2551	10.900	12.600
		2	1.5700	3.7310	5.9758	8.2486	10.500	12.800	15.100	17.400

Однако в соответствии с данными табл. 2 в достаточно широком диапазоне вариации l_{1*} от 0.25 до 2.0 указанные изменения D_{1*m} и $B_{\delta m}$ совсем незначительны. Так, например, если за базу принять значение $l_{1*} = 0.75$, то отклонение D_{1*m} не превысит 1.5 %, а для магнитной индукции отклонение будет в пределах 1 %. С точки зрения практики это означает, что длина пакета стали статора двигателя при прочих равных условиях, по существу, не влияет на оптимальность поперечной геометрии асинхронного двигателя. Из этого следует, что действительно возможно на одном штампе реализовать два-три двигателя разной мощности за счет изменения длины пакета практически без ухудшения каких-либо потребительских свойств или качества двигателя.

Увеличение значений магнитных индукций на участках магнитной цепи двигателя, т. е. в сердечниках B_{c1}, B_{c2} и зубцах B_{31}, B_{32} статора и ротора приводит к повышению оптимальных значений магнитной индукции $B_{\delta m}$ в воздушном зазоре (кривые 2 на рис. 2), что полностью согласуется с результатами, полученными при $l_{1*} = 0.5$ в [4].

Несколько своеобразным оказывается влияние магнитных индукций B_{c1}, B_{c2} и B_{31}, B_{32} на оптимальное значение относительного диаметра ротора статора D_{1*m} в зависимости от числа полюсов $2p$ двигателя при изменении относительной длины пакета стали статора l_{1*} . Так, в двух полюсных двигателях (рис. 1, а) увеличение значений B_{c1}, B_{c2} и B_{31}, B_{32} приводит к незначительному

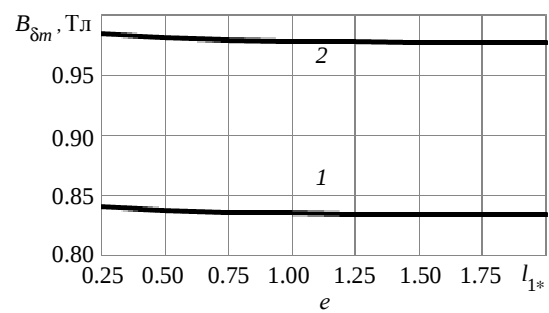
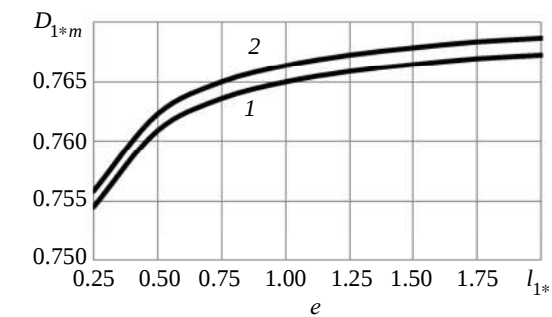
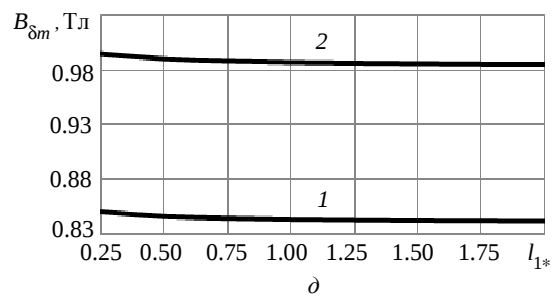
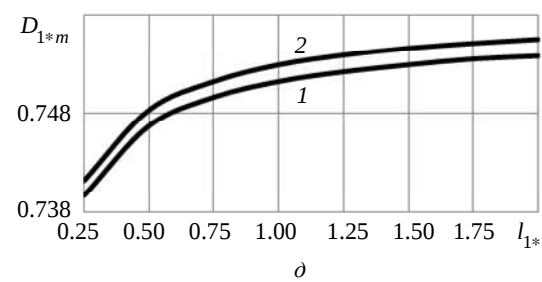
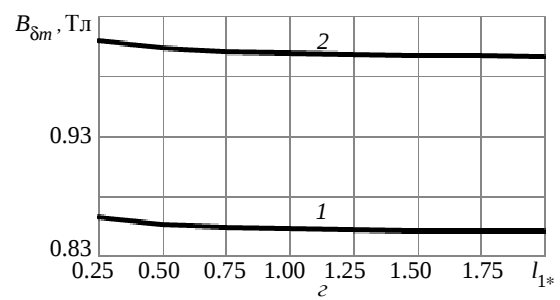
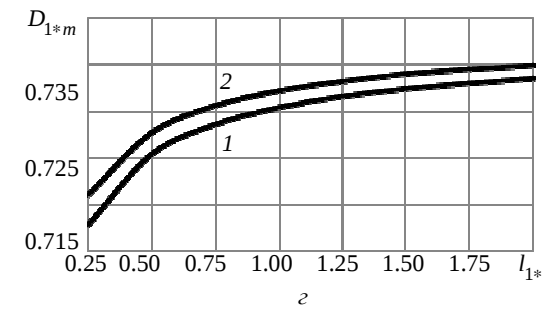
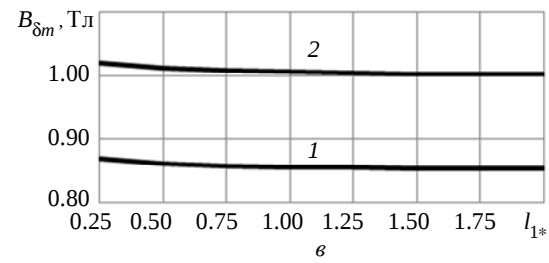
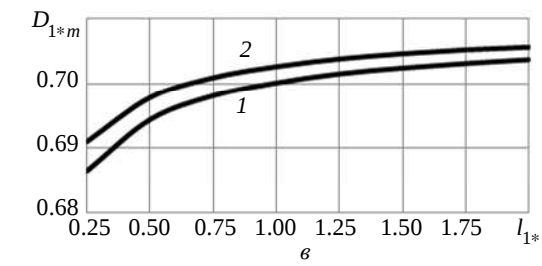
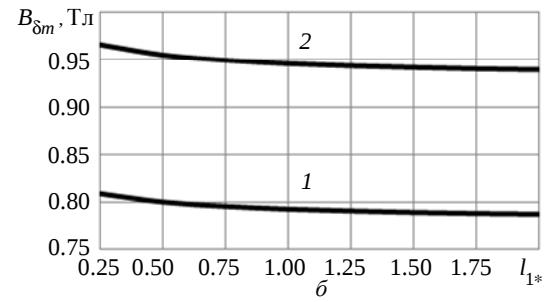
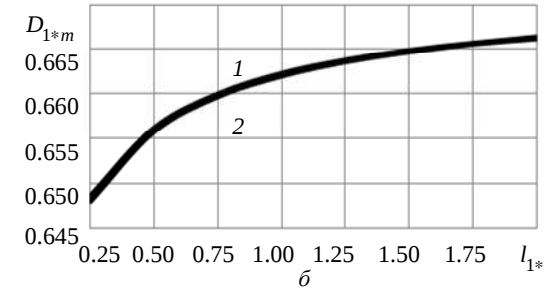
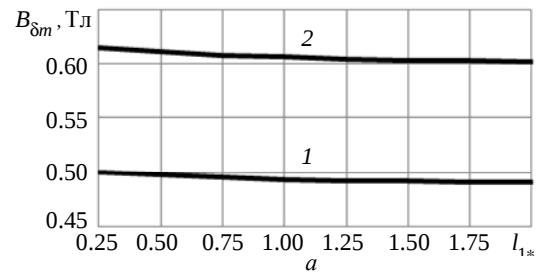
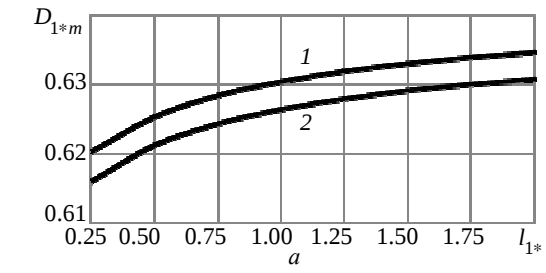


Рис. 1

Рис. 2

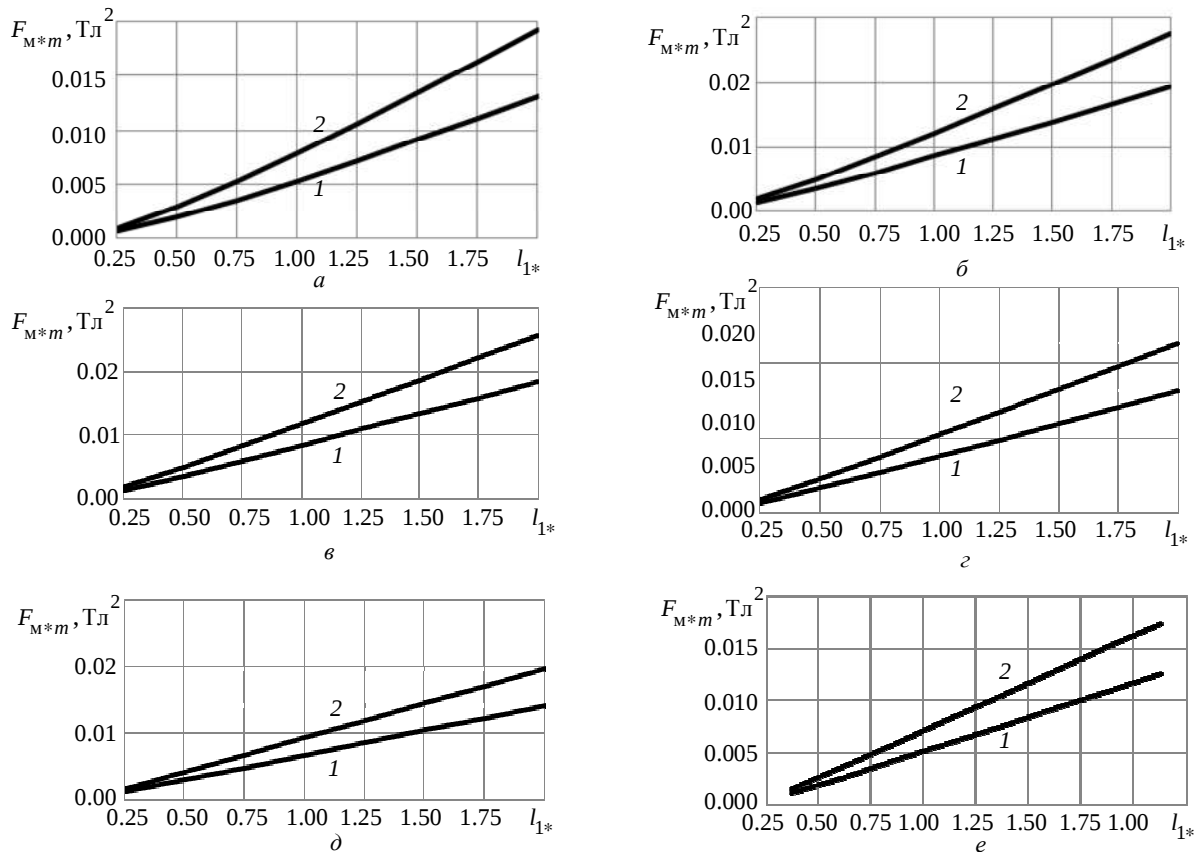


Рис. 3

снижению D_{1*m} (кривая 2 располагается ниже кривой 1), в четырех полюсных двигателях (рис. 1, б) кривые 1 и 2 практически совпадают, а при $2p \geq 6$ (рис. 1, в–е) кривые 2 располагаются выше кривых 1, т. е. повышение значений $B_{с1}$, $B_{с2}$ и $B_{з1}$, $B_{з2}$ имеет своим следствием незначительное возрастание значений относительного диаметра D_{1*m} . Это обстоятельство в [4] отмечено не было.

По данным табл. 2 на рис. 3 графически представлены зависимости оптимальных значений функционального множителя момента F_{M*m} , соответствующие оптимальным значениям D_{1*m} и $B_{\delta m}$, рассчитанным для конкретных значений l_{1*} , в зависимости от относительной длины l_{1*} , т. е. $F_{M*m} = f(l_{1*})$ при фиксированных значениях числа полюсов двигателя $2p = 2; 4; 6; 8; 10; 12$ (рис. 3, а–е соответственно) и для двух наборов значений магнитных индукций на участках магнитной цепи из табл. 1 (как и на рис. 1 и 2 обозначения кривых 1 и 2 соответствуют номерам строк табл. 1).

Из табл. 2 видно, что независимо от числа полюсов двигателя увеличение длины пакета стали статора его сопровождается возрастанием функции момента, а следовательно, увеличением самого момента и мощности двигателя. Из рис. 3 следует, что при малых значениях относительной длины l_{1*} зависимость близка к квадратичной, но уже при $l_{1*} > 0.75$ зависимость становится практически линейной. Повышение магнитных индукций на участках магнитной цепи двигателя обуславливает увеличение F_{M*m} , что согласуется с практикой. При всех числах полюсов двигателя графики зависимости $F_{M*m} = f(l_{1*})$ имеют больший наклон при больших значениях магнитных индукций (кривые 2).

Более сложным оказывается влияние числа полюсов асинхронного двигателя на его электромагнитный момент. Так, при переходе от двухполюсных двигателей к четырехполюсным происходит возрастание функции момента F_{M*m} . При $2p = 4$ и 6 величина F_{M*m} достигает максимума и при дальнейшем увеличении числа полюсов двигателя функция F_{M*m} уменьшается, что, во-первых, согласуется с результатами, полученными

Таблица 3

2p	Номер строки	l _{1*}							
		0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
2	1	0.4398	1.9639	3.5769	5.3454	7.2068	9.1282	11.100	13.100
	2	0.9948	2.8893	5.2590	7.8557	10.600	13.400	16.300	19.200
4	1	1.2642	3.4700	5.9467	8.5423	11.200	13.900	16.600	19.300
	2	1.8020	4.9356	8.4581	12.100	15.900	19.800	23.600	27.500
6	1	1.3756	3.5609	5.9306	8.3726	10.900	13.300	15.900	18.400
	2	1.9214	4.9782	8.2939	11.700	15.200	18.700	22.200	25.700
8	1	1.3236	3.3014	5.4029	7.5497	9.7181	11.900	14.100	16.300
	2	1.8391	4.5899	7.5129	10.500	13.500	16.500	19.600	22.600
10	1	1.2255	2.9756	4.8108	6.6756	8.5544	10.400	12.300	14.200
	2	1.6994	4.1275	6.6738	9.2612	11.900	14.500	17.100	19.700
12	1	1.1333	2.6926	4.3122	5.9523	7.6013	9.2551	10.900	12.600
	2	1.5700	3.7310	5.9758	8.2486	10.500	12.800	15.100	17.400

ми в [4], и, во-вторых, свидетельствует о снижении степени использования материалов в объеме активного ядра двигателя в многополюсных асинхронных двигателях.

В целях большей наглядности на базе табл. 2 построена табл. 3, в которой представлены только значения функции момента в зависимости от l_{1*} при разных числах полюсов двигателя и для двух наборов значений магнитных индукций на участках магнитной цепи (строки 1 и 2 из табл. 1).

В наибольшей степени повышение магнитных индукций B_{c1} , B_{c2} и B_{31} , B_{32} (строки 2) сказывается на увеличении F_{M*m} в двухполюсных двигателях и при малых значениях относительной длины l_{1*} . С возрастанием числа полюсов $2p$ и относительной длины l_{1*} влияние указанных магнитных индукций ослабевает, так как с увеличением числа полюсов в соответствии с выражениями (1) снижается влияние этих индукций на коэффициенты $k_{п1}$ и $k_{п2}$. Из табл. 3 также видно, что с увеличением относительной длины l_{1*} по своей эффективности четырех- и шестиполюсные двигатели меняются местами. Так, при $l_{1*} < 0.75$ четырехполюсные двигатели имеют меньшие значения функции F_{M*m} и, следовательно, уступают шестиполюсным, но уже при $l_{1*} \geq 0.75$ значения функции F_{M*m} для четырехполюсных двигателей становятся больше, повышая их эффективность в части использования объема активного ядра.

Преобразованное выражение для электромагнитного момента асинхронного двигателя, приведенное, например, в [3], имеет вид $M_{эм} = k_F D_{1H}^5 F_{M*m} F_H$, где F_H представляет собой параметрический сомножитель, зависящий от но-

минального скольжения и перегрузочной способности двигателя, а в состав коэффициента k_F входят только постоянные величины. Как было показано, функциональный множитель F_{M*m} существенно зависит от относительной длины l_{1*} пакета стали статора.

Возможны два варианта оценки влияния длины пакета стали статора асинхронного двигателя на степень использования объема активного ядра двигателя относительно его электромагнитного момента. Во-первых, это непосредственное изменение длины пакета стали статора l_1 при фиксированном наружном диаметре пакета стали статора D_{1H} . И применительно к этому случаю был выполнен весь предшествующий анализ влияния длины l_{1*} на оптимальную поперечную геометрию асинхронного двигателя безотносительно к значению электромагнитного момента $M_{эм}$ двигателя. Во-вторых, когда $M_{эм} = \text{const}$, при изменении длины l_1 необходимо пересчитывать наружный диаметр D_{1H} , имея в виду изменение значения функционального множителя F_{M*m} . В рассматриваемой статье ограничимся только первым вариантом.

В результате выполненных исследований и расчетов установлено:

1. Длина пакета стали статора l_1 практически не влияет на оптимальность поперечной геометрии синхронного двигателя (оптимальное значение относительного диаметра расточки статора незначительно возрастает при увеличении длины l_1 и точно также амплитуда магнитной индукции в воздушном зазоре незначительно снижается).

2. Независимо от числа полюсов увеличение длины пакета стали статора сопровождается возрастанием функции момента, а значит, и самого момента и мощности двигателя.

3. При $l_{1*} < 0.75$ четырехполюсные двигатели имеют меньшие значения функции F_{M*m} и, сле-

довательно, уступают шестиполюсным, но уже при $l_{1*} \geq 0.75$ значения функции F_{M*m} для четырехполюсных двигателей становятся больше, повышая их эффективность в части использования объема активного ядра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов М. А., Пантюхов Д. С. Оптимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре асинхронного двигателя // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 2. С. 31–38.

2. Ваганов М. А., Пименова И. А. Оптимальные значения магнитных индукций в магнитной цепи асинхронных двигателей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 10. С. 38–44.

3. Основы расчета общепромышленных асинхронных двигателей / М. А. Ваганов, В. Ф. Матюхов, И. А. Пименова, Г. Н. Суменкова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 6. С. 55–61.

4. Ваганов М. А., Пименова И. А. Влияние числа полюсов асинхронного двигателя, а также числа пазов статора и ротора на его оптимальную поперечную геометрию // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 1. С. 63–69.

I. A. Butylin, M. A. Vaganov, Yu. A. Grubman, M. V. Demina, I. A. Pimenova
Saint Petersburg state electrotechnical university «LETI»

Effect of the length of the stator of the asynchronous packet began the motor on its optimum lateral geometry

The proposed model of the induction motor to evaluate the effect of packet length steel stator induction motor on the parameters characterizing its optimum lateral geometry with different numbers of pole pairs. The influence of the length of the steel stator package in two versions, namely, myself and a relative parameter, which is the ratio of the length of the packet to the steel stator diameter of the bore. It is shown that the rose-shenii number of pole pairs of the induction motor is changing the nature of the influence of the level of magnetic induction in the areas of the magnetic system at the optimum value of the relative diameter of the stator bore.

The packet length steel stator, the relative diameter of the stator bore, the magnetic induction in the air gap, the magnetic induction in the stator and rotor cores, the number of pairs of poles