

REFERENCES

1. Volkova O.L. *Vypriyamiteli s kol'tsevyimi i lestnichnymi ventill'nymi skhemami dlya sistem elektrosnabzheniya elektricheskogo transporta* (Rectifiers with ringed and stair gate circuits for electric vehicle power systems), 2011: <http://goo.gl/aXf7LU>.
2. Evdokimov S.A., Shchurov N.I., Volkova O.L., Stepanov A.A. *Elektrotehnika — in Russ. (Electrical Engineering)*, 2011, No. 6, pp. 3–9.
3. Aslan-zade A.G. *Preobrazovaniye skhem mnogofaznykh vypriyamitelei putem vzaimnogo peremeshcheniya smezhnykh ventill'nykh i transformatornykh elementov. Innovatsionnaya energetika 2010* (Transforming the circuits of multiphase rectifiers by mutually shifting the adjacent valve and transformer elements. Innovative Power Engineering 2010) Proc. of the II Scientific-practical conf. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2010, pp. 194–197.
4. Aslan-zade A.G., Evdokimov S.A., Volkova O.L. *Nauchnyi vestnik NGTU (Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University)*, 2011, No. 3, pp. 159–172.
5. Aslan-zade A.G. *Metod skhemotekhnicheskogo peremeshcheniya elementov i skhemy vypriyamitelei, postroennye v rezul'tate*

elementarnykh inzhenernykh preobrazovaniy (The circuit engineering component-based shifting method and the rectifier circuits constructed as a result of elementary engineering transformations) Proc. of the X Scientific-practical conf. «Dynamics of modern science», Sofiya, 2014, vol. 11, pp. 29–30: <http://goo.gl/uaLzNt>

6. Patent RF No. 2569929. *Preobrazovatel' trekhfaznogo peremennogo napryazheniya v postoyannoye* (Converter three-phase alternating voltage into direct)/A.G. Aslan-zade. Bulletin of inventions, 2015, No. 34.
7. Shlyaposhnikov B.M. *Ignitronnye vypriyamiteli dlya tyagovykh podstantsii zheleznykh dorog* (Ignitrons rectifiers for traction substations of railways). Moscow, Tranzheldorizdat, 1947, 736 p.
8. Aslan-zade A.G. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 11, pp. 19–25.
9. A.s. No. 1220086 (SU). *Preobrazovatel' peremennogo napryazheniya (AC converter)* / A.G. Aslan-zade. Bulletin of inventions, 1988, No. 12.
10. Abdulayev A.A., Aslan-zade A.G. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1977, No. 8, pp. 57–63.

* * *

Электричество, 2016, № 10, с. 45–52.

Исследование характеристик базовых вентильно-индукторных электродвигателей тягового привода городского электротранспорта

АНТИПОВ В.Н., ГРОЗОВ А.Д., ИВАНОВА А.В.

Представлены результаты сравнительного исследования магнитной конфигурации и полюсности базовых вентильно-индукторных электродвигателей для метрополитена (160 кВт), троллейбуса (180 кВт). Цель исследований: переход подвижного состава городского электротранспорта на новый, более прогрессивный тяговый реактивный регулируемый привод. Разработка выполнена на принципах блочно-модульного проектирования, что позволяет сохранить установочно-присоединительные размеры применяемых асинхронных двигателей и минимизировать производственные и финансовые затраты. Сравнение различной полюсности двигателя проведено по значению и пульсации вращающего момента и потерям в стали магнитопровода для трехфазной схемы преобразователя. Показано преимущество исполнения вентильно-индукторного двигателя с отношением зубцов статора и ротора 12/8.

Ключевые слова: вентильно-индукторный электродвигатель, тяговый привод, метро, троллейбус, блочно-модульное проектирование, конфигурация магнитопровода

Регулирование частоты вращения электродвигателя является основой энергосбережения во многих технологиях. Монопольное применение коллекторных электродвигателей постоянного тока как единственно регулируемых осталось в прошлом. Частотное регулирование асинхронных и синхронных электродвигателей широко внедрено в промышленность. Применение же реактивного регулируемого электропривода на базе вентильно-индукторного двигателя (ВИД), несмотря на оптимистические оценки [1, 2], в нашей стране по-прежнему остается пока только в перспективе.

Среди электротехнических фирм мира, занятых серийным выпуском ВИД, сегодня лидирует японская компания Nidec Motor Corporation (NMC), которая приобрела американскую фирму Emerson Motor вместе с ее дочерними предприятиями, стоявшими у истоков производства вентильно-индукторного привода [3]. Корпорация NMC выпускает

различные промышленные ВИД, в том числе и по стандарту NEMA, базовой частотой вращения 1000, 1800, 3600 и 4500 мин⁻¹, мощностью 20–420 л.с.

В России Новочеркасским электровозостроительным заводом (НЭВЗ) были изготовлены макетные образцы тяговых ВИД разных мощностей: 340 кВт — для безредукторного привода тепловоза с силовым преобразователем на тиристорах; 720 кВт — для привода тягового агрегата с силовым преобразователем на тиристорах; 350 кВт (тяговый двигатель НТИ-350) — для привода электропоезда на транзисторных IGBT-модулях производства фирмы Hitachi (Япония). Малым предприятием ООО «НПП «Эмертон» в 2008 г. разработан комплект тягового вентильно-индукторного привода для двухосного троллейбуса мощностью 180 кВт [4].

Реактивный регулируемый привод (РРП) состоит из специальной электрической машины — вентильно-индукторного двигателя, электронного

коммутатора на силовых транзисторных модулях, блока микропроцессорного управления и датчика положения ротора. Принципиальные преимущества РРП: высокие энергетические показатели и технологичность, низкие трудоемкость изготовления и себестоимость электродвигателя; более простые и надежные схема и конструкция силового коммутатора по сравнению с преобразователем частоты для асинхронного привода за счет однополярной коммутации; функциональные возможности для работы в широком диапазоне регулирования частоты вращения и для реализации больших значений момента в зоне низких скоростей. Кроме того, ВИД имеет естественную механическую характеристику как двигатель постоянного тока последовательного возбуждения, что дает дополнительное преимущество при его применении в тяговом электроприводе, для которого такая форма характеристики является оптимальной.

Известны и недостатки РРП: ВИД не могут работать без электронного преобразователя; кроме того, для них не применимы теория вращающегося магнитного поля и хорошо разработанные на ее основе методы расчета вращающихся электрических машин.

В литературе отмечается сложность решения задачи по созданию индукторной машины с высокими техническими показателями. Многочисленными исследованиями второй недостаток практически преодолен. Разработаны также алгоритмы управления, существенно снизившие пульсации электромагнитного момента ВИД [5, 6]. Их применение позволило при работе в замкнутом контуре скорости в первой зоне получить для РРП уровень пульсаций, характерный для регулируемого асинхронного привода. Работающие в России коллективы специалистов в НИИ, вузах и на производстве [7–19] обладают необходимым потенциалом для создания реактивного регулируемого привода.

Достичь высоких технических показателей при разработке РРП, можно только полностью овладев процедурой проектирования, которая существенным образом отличается от традиционной и включает три взаимосвязанных расчетных этапа [16]. Для каждого из них разработаны собственные алгоритмы и программы расчета, базирующиеся на технологиях EXCEL, ELCUT и MATLAB. Авторы, считающие весьма перспективным применение РРП для тягового привода городского транспорта, провели разработку тяговых вентильно-индукторных двигателей троллейбуса – ВИД-180-1485 (180 кВт, 550 В, 1485 мин⁻¹), вагонов метро – ВИД-160-1500 (160 кВт, 750 В, 1500 мин⁻¹), трамвая – ВИД-50-1500 (50 кВт, 275 В, 1500 мин⁻¹) [17, 18]. Разработка выполнена на принципах блоч-

но-модульного проектирования, которое обеспечило минимум производственных и финансовых затрат при переходе на новый более прогрессивный привод.

Блочно-модульное проектирование двигателя означает следующее. Выбирается базовый прототип освоенного промышленностью двигателя, сохраняются все необходимые узлы и детали (корпус, вал, подшипники, щиты и т.д.) за исключением разработанных катушек статора, пакетов статора и ротора, а также небольшой доработки вала. Таким образом, ограничения при разработке накладываются на внешний диаметр пакета статора и внутренний диаметр пакета ротора, размеры которых необходимо сохранить при проектировании листов железа статора и ротора. С точки зрения стоимости преобразователя предпочтение однозначно следует отдать трехфазной схеме, но вопрос о выборе числа полюсов статора и ротора требует отдельного рассмотрения.

В статье даны оценки такого выбора для вентильно-индукторного двигателя вагонов метрополитена ВИД-160-1500 (160 кВт, 750 В, 1500 мин⁻¹). Они будут справедливы также для вентильно-индукторного двигателя троллейбуса ВИД-180-1485 (180 кВт, 550 В, 1485 мин⁻¹), так как оба двигателя могут быть спроектированы на одинаковой геометрии, но при разных числах витков обмотки статора [18]. В [20] проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных вентильно-индукторного двигателя небольшой мощности (0,75 кВт, 3000 мин⁻¹) при двух соотношениях чисел полюсов статора и ротора: 6/4 и 12/8. Сделан вывод: оба варианта пригодны для применения в приводах небольшой мощности, имеют похожие характеристики, однако вариант 12/8 предпочтительнее с точки зрения шума, к тому же имеет более низкое значение температуры перегрева обмотки.

В качестве прототипа при проектировании ВИД для вагонов метрополитена выбран асинхронный тяговый двигатель переменного тока ТАД-4 (170 кВт, 570 В, 50 Гц, 1500/3410 мин⁻¹, 1100 Нм).

Основные геометрические размеры и параметры ВИД выбираются здесь с помощью программы Microsoft EXCEL. Исходя из опыта проектирования ВИД выбираются как геометрические размеры машины, так и параметры обмотки. Для двигателей городского транспорта рассмотрены варианты с различными соотношениями зубцов статора и ротора (18/12, 12/8) в диапазоне значений диаметра ротора 305÷360 мм. Одинаковыми выбраны внешний диаметр статора 520 мм, активная длина 420 мм и различное число витков обмотки статора – 12 и 8. Основные данные для выбранных вариантов для ВИД-160-1500 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	Значения параметров	
	вариант 1	вариант 2
Число фаз обмотки статора	3	3
Число полюсов статора	12	18
Число зубцов ротора	8	12
Внешний диаметр статора, мм	520	520
Диаметр ротора, мм	360	370
Длина пакета статора, мм	420	420
Воздушный зазор, мм	0,6	0,6
Полюсная дуга статора, град	15	10
Полюсная дуга ротора, град	16	10,5
Ширина полюса статора, мм	47,1	32,3
Ширина полюса ротора, мм	50,1	33,8
Высота спинки статора, мм	33,6	22,7
Высота спинки ротора, мм	31,6	21,7
Глубина пазов статора, мм	47,8	52,7
Глубина пазов ротора, мм	23,6	16,2
Диаметр ротора внутренний, мм	268	268
Число витков катушки	12	8

Для каждого варианта расчета методом численного эксперимента (использовалась программа ELCUT 5.3) определено электромагнитное поле машины при различных значениях тока в согласованном и рассогласованном положениях ротора и статора, а также рассчитаны зависимости магнитного потока от тока машины.

Распределение векторного магнитного потенциала ВИД-160-1500 (для вагонов метрополитена) при согласованном положении ротора и статора и отношении зубцов статора и ротора 12/8 и 18/12 показано на рис. 1, а и б.

Численным методом расчета электромагнитного поля в ELCUT определены магнитные потоки для согласованного и рассогласованного положений ротора в диапазоне токов от 0 до $3I_H$. Вращающий электромагнитный момент вычислен как приращение магнитной коэнергии по углу поворота для различных значений тока: $M = -dW_{mag}^c / d\Theta$.

Расчетные значения параметров для двух вариантов (1 – $N_S/N_R = 18/12$, $m = 3$, $\Theta_{max} = 15^\circ$, $\Delta\Theta = 4,75^\circ$, 2 – $N_S/N_R = 12/8$, $m = 3$, $\Theta_{max} = 22,5^\circ$, $\Delta\Theta = 7^\circ$) представлены в табл. 2.

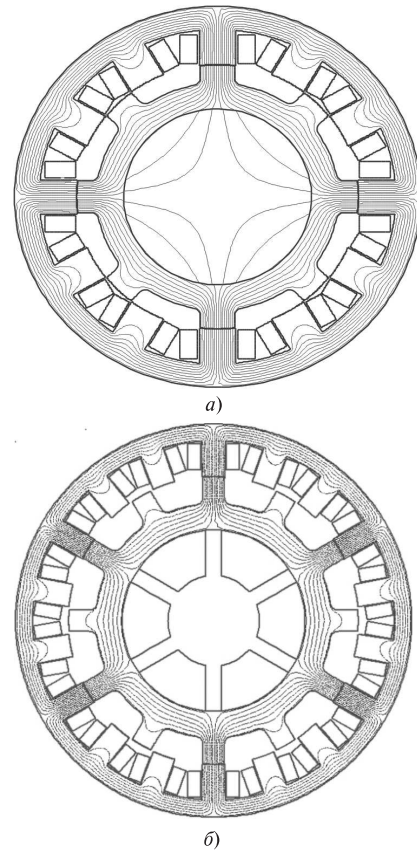


Рис. 1. Распределение векторного магнитного потенциала двигателя ВИД-160-1500 в согласованном положении ротора и статора при отношении зубцов статора и ротора 12/8 (а) и 18/12 (б)

Таблица 2

Параметры	Расчетные значения параметров	
	вариант 1	вариант 2
W	8	12
I_H , А	300	300
F , А	14400	14400
$M_{1,0}$, Н·м	820	1034
$M_{2,0}$, Н·м	1968	2113
$M_{3,0}$, Н·м	2473	2590
L , мГн	8,94	9,77
$\Delta I/I_H$, отн.ед.	2,0	1,8

Технические требования могут быть реализованы при соотношении зубцов статора и ротора 18/12 либо 12/8, причем первый вариант несколько проигрывает по отношению вращающего момента к току. Оценим варианты по значению пульсаций момента и уровню потерь в стали.

Зависимости потокосцеплений двигателя ВИД-160-1500 от фазного тока и угла рассогласования зубцов статора и ротора, полученные расчетом электромагнитного поля в ELCUT, показаны на рис. 2, а (для соотношения 12/8) и б (для соотношения 18/12).

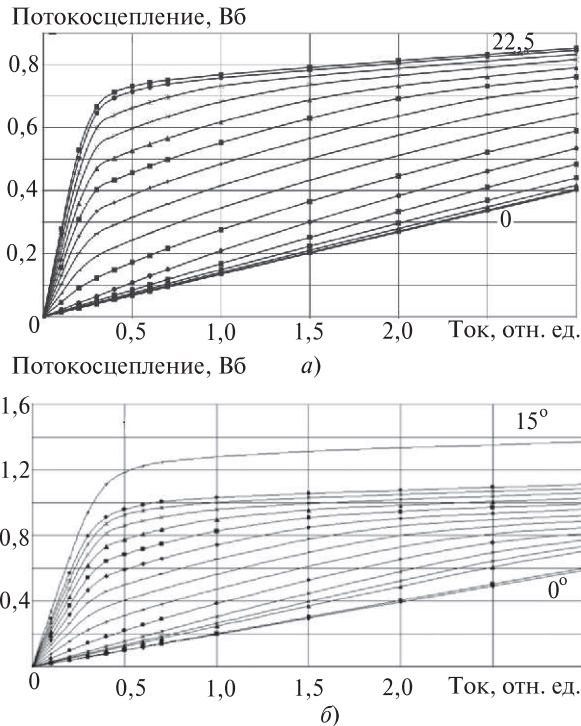


Рис. 2. Зависимость потокоцепления фазы двигателя ВИД-160-1500 от фазного тока и угла рассогласования зубцов статора и ротора: а – 12/8, угол рассогласования от 0 до 22,5° с шагом 1,5°; б – 18/12, угол от 0 до 15° с шагом 1°

Решением дифференциальных уравнений в частных производных получены кривые изменения тока фазы и момента. Решение выполнено для двух рассматриваемых конфигураций при угле включения 0° и различной длительности импульса – от значения, при котором кончается одиночная коммутация, до предельного, соответствующего согласованному положению. Формы кривых фазного тока и вращающего момента двигателя для двух значений длительности импульса показаны на рис. 3 при отношении зубцов статора и ротора 12/8 и на рис. 4 при отношении 18/12.

Ниже приведены значения фазных токов и вращающих моментов двигателя ВИД-160-1500 (I_{max} , I_{rms} – максимальное и действующее значения тока фазы; M_{max} , M_{mean} – максимальное и среднее значения вращающего момента двигателя; $K_{п.м}$ – коэффициент пульсации вращающего момента):

для $N_S/N_R = 12/8$

Δ , град	I_{max} , А	I_{rms} , А	M_{max} , Н·м	M_{mean} , Н·м	$K_{п.м}$, %
15,00	355	126,4	1838	600,0	74,0
15,75	355	127,0	1838	623,9	70,8
16,50	355	127,3	1838	646,1	67,1
17,25	355	127,5	1838	664,6	64,1
18,00	355	127,7	1838	674,6	62,1

18,75	355	127,8	1838	688,4	56,0
19,50	355	127,8	1838	699,4	51,7
20,25	355	127,8	1838	707,9	45,7
21,00	355	127,8	1838	714,4	42,1
21,75	355	128,0	1838	719,9	43,1
22,50	355	130,2	1838	724,7	41,2

для $N_S/N_R = 18/12$

Δ , град	I_{max} , А	I_{rms} , А	M_{max} , Н·м	M_{mean} , Н·м	$K_{п.м}$, %
10	306	120,4	1478	562,5	62,7
10,5	306	122,3	1510	591,4	61,4
11	306	124,4	1554	619,9	60,0
11,5	306	126,8	1600	650,3	57,5
12	323	130,6	1672	686,1	52,7
12,5	447	141,9	1826	745,0	42,4
13	643	168,6	2159	809,6	36,7
13,5	900	202,4	2922	891,6	44,2
14	900	210,1	3273	913,0	49,2
14,5	900	221,9	5086	989,1	64,0
15	900	222,8	5086	1032	64,0

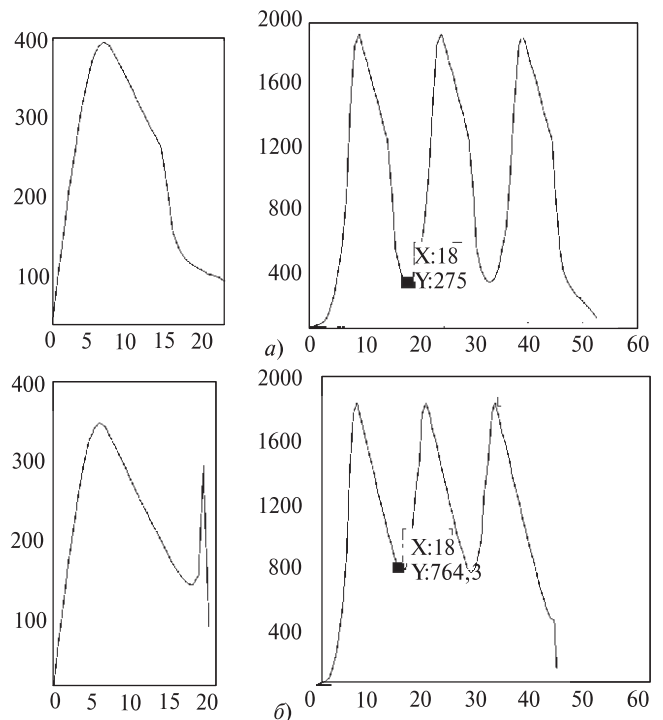


Рис. 3. Кривые изменения фазного тока и вращающего момента двигателя ВИД-160-1500 конфигурации 12/18 в режиме работы 750 В, 1500 мин⁻¹: а – угол включения 0°, выключения 15°; б – угол включения 0°, выключения 22,5°

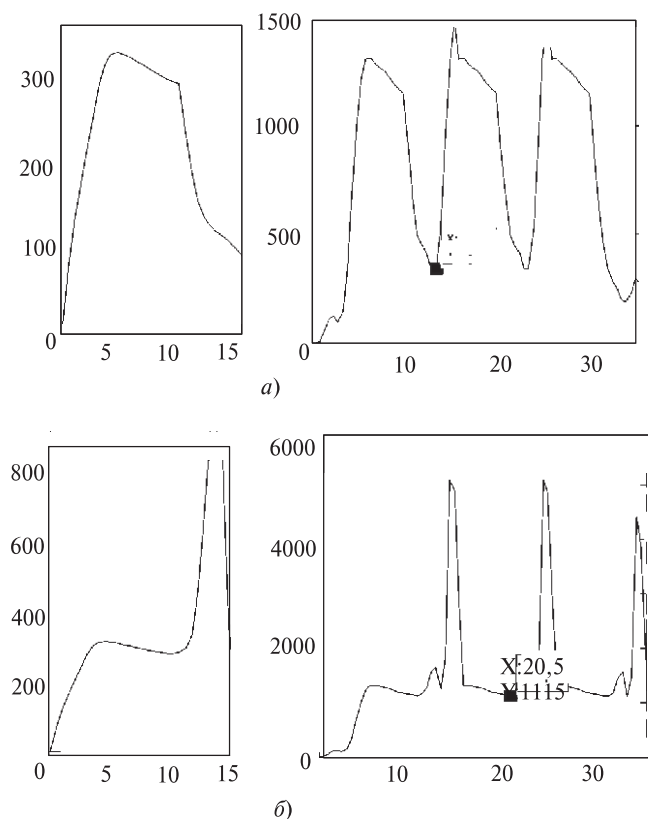


Рис. 4. Кривые изменения фазного тока и вращающего момента двигателя ВИД-160-1500 конфигурации 18/12 в режиме работы 750 В, 1500 мин⁻¹: а — угол включения 0°, выключения 10°; б — угол включения 0°, выключения 15°

На рис. 5 дано сравнение двигателя ВИД-160-1500 при отношении зубцов статора и ротора 12/8 (кривые 1) и 18/12 (кривые 2) по значениям среднего вращающего момента, действующего тока фазы и коэффициента пульсации момента. Кривые построены в зависимости от относительной ширины импульса, причем угол включения соответствует рассогласованному положению, а за базовое значение ширины импульса принято значение при угле выключения в согласованном положении.

В диапазоне относительных значений ширины импульса от 0,67 до 0,8 для обеих конфигураций зубцов значения действующего фазного тока и среднего момента примерно одинаковы, причем конфигурация 18/12 имеет примерно на 10% меньшую пульсацию момента: 62,7–52,7% вместо 74–62,1%.

В диапазоне относительных значений ширины импульса от 0,8 до 1,0 для конфигурации 18/12 характерны резкое возрастание максимального тока и момента и увеличение пульсаций момента. Работа двигателя ВИД-160-1500 при отношении зубцов статора и ротора 18/12 в этой области будет характеризоваться низким КПД.

Таким образом, ВИД-160-1500 при отношении зубцов статора и ротора 18/12 имеет незначитель-

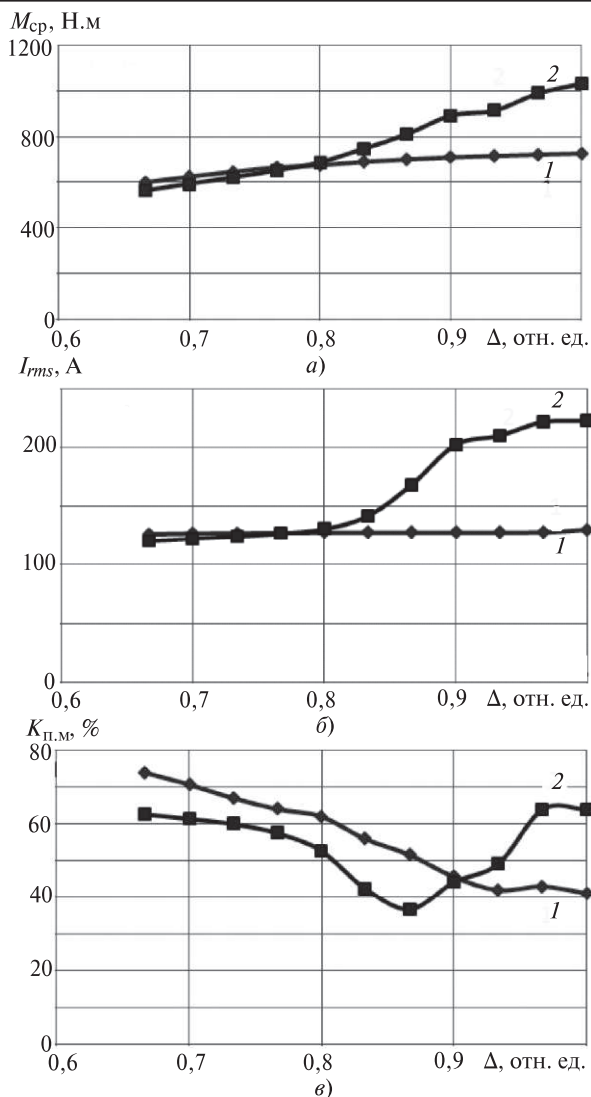


Рис. 5. Сравнение двигателя ВИД-160-1500 конфигурации 12/8 (кривые 1) и 18/12 (кривые 2) по значениям: а — среднего вращающего момента; б — действующего тока фазы; в — коэффициента пульсации момента

ные преимущества по пульсациям момента, но ограничен по регулированию шириной импульса.

Номинальный режим работы двигателя ВИД-160-1500 при отношениях зубцов статора и ротора как 12/8, так и 18/12 может быть достигнут при изменении угла включения. Расчетные данные возможных режимов включения для получения номинального момента приведены ниже. Они ясно показывают преимущества выбора отношения зубцов статора и ротора, равного 12/8.

Значения фазных токов и вращающих моментов для номинального режима работы двигателя ВИД-160-1500 при различных соотношениях зубцов статора и ротора приведены в табл. 3.

Оценка потерь в стали для сравниваемых вариантов проведена по методу обобщенного уравнения Стейнметца GSE [21]. Как показано в [22], при расчетах потерь в стали ВИД следует отдать предпочтение именно этому методу как наиболее физи-

Таблица 3

$\Theta_{\text{вкл}}$, град	$\Theta_{\text{отк}}$, град	Δ , град	I_{max} , А	I_{rms} , А	M_{max} , Н·м	M_{mean} , Н·м	$K_{\text{пм}}$, %
$N_S/N_R = 12/8$							
-1,5	19,50	21,00	441	166,5	2376	1044	39,1
-1,5	20,25	21,75	441	166,7	2376	1023	32,2
-1,5	21,00	22,50	441	167,6	2376	1043	29,0
$N_S/N_R = 18/12$							
-0,5	13,00	13,50	900	229,2	2970	1036	40,6
-0,5	13,50	14,00	900	235,4	3080	1052	40,6

Таблица 4

Область двигателя	Результаты расчета					
	$N_S/N_R = 12/8$			$N_S/N_R = 18/12$		
	Индукция, Тл	Частота, Гц	Потери, Вт	Индукция, Тл	Частота, Гц	Потери, Вт
Зубцы статора	2,09	200,00	1149,2	2,11	300	2251,3
Спинка статора	1,56	200,00	4585,8	1,57	300	5541,6
Зубцы ротора	1,96	300,00	533,0	2,01	450	659,9
Спинка ротора	1,46	25,00	1850,7	1,50	25	3135,2
Магнитопровод			8118,8			10214,0

чески обоснованному для широкого диапазона частоты перемагничивания. Результаты расчета сопоставлены в табл. 4.

Разница в значениях потерь в стали для рассматриваемых вариантов весьма значительная: потери для отношения зубцов статора и ротора, равного 18/12, больше на 2,1 кВт, что дает выигрыш более 1% по КПД для варианта 12/8.

Таким образом, при внедрении регулируемого реактивного привода в качестве тягового для подвижного состава городского электротранспорта (метро, трамвай, троллейбус) следует отдать предпочтение варианту с отношением зубцов статора и ротора 12/8.

Тяговые двигатели ВИД-180-1485, ВИД-160-1500 и ВИД-50-1500 для троллейбуса, вагонов метрополитена и трамвая могут работать только в составе регулируемых электроприводов РРП-550-180, РРП-750-160 и РРП-550-50. При разработке силового коммутатора реактивных регулируемых приводов для городского транспорта выбрана трехфазная схема управления двигателем, при которой фазная обмотка питается через асимметричный мост, состоящий из двух IGBT-транзисторов и двух диодов. К вагону метрополитена подведена шина постоянного тока 750 В, но учтена возможность повышения напряжения в процессе эксплуатации до 900 В.

В качестве силового элемента схемы выбран интеллектуальный силовой модуль фирмы Mitsubishi типа PM400DSA120, который допускает напряжение между коллектором и эмиттером 1200 В и длительный коллекторный ток при температуре 25 °С – 400 А. Интеллектуальный модуль имеет встроенные драйверы. Для создания силовой схемы одной фазы необходимы два интеллектуальных силовых модуля, причем один из транзисторов модуля работает в качестве обратного диода. Силовой коммутатор оснащен автоматическим выключателем емкостью 3300 мкФ, датчиками тока типа HAS200, источником питания 220/24 В типа DRA05-24. Схемы управления реактивными регулируемыми приводами РРП-750-160 и РРП-550-180 построены на базе микроконтроллера M269-2-Kit-C232 и датчика положения RSI 503 фирмы Leine&Linde.

Вентильно-индукторный двигатель выполненного проекта отличается высоким уровнем параметров за счет применения современных методов расчета и проектирования и оптимизации вариантов исполнений.

В ВИД достигается экономия активных материалов до 30%, используются лишь недефицитные и недорогие материалы, изготовление двигателя отличается высокой технологичностью и низкой трудоемкостью (простая конфигурация магнитной системы, отсутствие коллектора, беличьей клетки,

постоянных магнитов, машинная намотка катушек).

Предлагаемый электромеханический преобразователь на основе вентильно-индукторного двигателя для городского транспорта имеет более высокий КПД, лучшие показатели надежности и пониженное значение махового момента инерции по сравнению с тяговыми электроприводами, находящимися в эксплуатации как с коллекторными двигателями постоянного тока, так и асинхронными. Расчеты показывают значительный экономический эффект при замене двигателей ДК117М, ДК211 и ТАД-3, ТАД-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Н.Ф. Перспективы применения вентильно-индукторного электропривода в современных технологиях. — Электротехника, 1997, № 2, с. 7–9.
2. Ахунов Т.А., Макаров Л.Н., Бычков М.Г., Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод — перспективы применения. — Приводная техника, 2001, № 2, с. 14–17.
3. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт. — Электротехника: сетевой электронный научный журнал, 2015, т. 2, № 3, с. 23–33.
4. Коломейцев В.Л., Пахомин С.А., Крайнов Д.В., Пахомин Л.С., Прокопец А.И., Реднов Ф.А. Вентильно-индукторный электропривод троллейбуса. — Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014, 7–9 октября 2014 г., Саранск. Изд-во Мордовского университета, 2014, т. 2, с. 200–205.
5. Виноградов А.Б. Вентильно-индукторный электропривод с минимизацией пульсаций электромагнитного момента. — М.: НТЦ Электропривода «Вектор», 7 с.
6. Красовский А.Б., Бычков М.Г. Исследование пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе. — Электричество, 2001, № 10, с. 33–43.
7. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. — М.: Изд-во Московского энергетического института, 2003, 71 с.
8. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Инженерная методика проектирования индукторной машины для вентильно-индукторного двигателя. — Электричество, 2007, № 10, с. 24–32.
9. Бычков М.Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — М.: Изд-во МЭИ, 1999, 38 с.
10. Красовский А.Б. Имитационные модели в теории и практике вентильно-индукторного электропривода: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — М.: Изд-во МЭИ, 2004, 40 с.
11. Пахомин С.А. Развитие теории и практика проектирования энергосберегающих вентильно-индукторных электроприводов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Новочеркасск, 2001, 40 с.
12. Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А. Развитие теории и создание новых конструкций индукторных машин. — Изв. вузов. Электромеханика, 2005, № 2, с. 6–9.
13. Коломейцев Л.Ф., Бибииков В.И., Пахомин С.А., Коломейцев Г.В. Применение реактивных индукторных машин на транспорте. — Изв. вузов. Электромеханика, 2008, № 1, с. 69–72.
14. Никифоров Б.В., Пахомин С.А., Птах Г.К. Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов. — Электричество, 2007, № 2, с. 34–38.
15. Щербаков В.Г. Результаты разработок и проблемы создания бесколлекторного привода для железнодорожного подвижного состава. — Электротехника, 2001, № 3, с. 37–39.
16. Антипов В.Н., Грозов А.Д. Методология проектирования вентильно-индукторного электродвигателя. Проблемы создания и эксплуатации новых типов энергетического оборудования. — СПб: ОЭЭП РАН, 2004, вып. 6, с. 85–98.
17. Антипов В.Н., Грозов А.Д. Перспективные электромеханические преобразователи энергии для городского транспорта. Межвузовский тематический сборник научных трудов «Электромеханические преобразователи энергии». — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2014, с. 6–11.
18. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Разработка базовых вентильно-индукторных электродвигателей тягового привода для городского электротранспорта (метро, трамвай, троллейбус). — Сб. трудов конф. «Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроения», Москва, 3 декабря 2015 г. — Москва: ВНИИКП, с. 102–109.
19. Овчинников И.Е. Электромагнитный момент и механические характеристики вентильного двигателя с реактивным ротором. — Изв. вузов. Приборостроение, 2002, т. 45, № 8, с. 5–11.
20. Andrada P., Blaque B., Martinez E., Perat J.I., Sanchez J.A., Torrent M. Performance comparison of switched reluctance motors with 6/4 and 12/8 magnetic structures. — ICEM 2002, p. 168.
21. Reinert J., Brockmeyer A., De Doncker R.W. Calculation of losses in ferro and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation. — IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, vol. 37(4), pp. 1055–1061.
22. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Сравнение различных методов расчета потерь в стали вентильно-индукторных двигателей. — Электричество, 2016, № 6, с. 41–46.

[06.06.2016]

А в т о р ы : Антипов Виктор Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) в 1963 г. Защитил докторскую диссертацию в 1989 г. Ведущий научный сотрудник Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН).

Грозов Андрей Дмитриевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1979 г. Научный сотрудник ИХС РАН.

Иванова Анна Владимировна окончила математико-механический факультет Ленинградского государственного университета в 1979 г. Защитила кандидатскую диссертацию в 1989 г. Старший научный сотрудник ИХС РАН.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 10, pp. 45–52.

Studying the Characteristics of Basic Converter-fed Inductor Electric Motors for Traction Drives of Urban Electric Vehicles

ANTIPOV Viktor Nikolayevich (Russian Academy of Sciences (RAS), Institute of Silicate Chemistry (ISCh), St. Petersburg, Russia) — Leading scientist, Dr. Sci. (Eng.)

GROZOV Andrei Dmitriyevich (RAS, ISCh, St. Petersburg, Russia) – Scientist

IVANOVA Anna Vladimirovna (RAS, ISCh, St. Petersburg, Russia) – Senior scientist, Cand. Sci. (Eng.)

Results from a comparative study of the magnetic configuration and pole number in the basic converter-fed inductor electric motors for subway trains (160 kW) and trolleybuses (180 kW) are presented. The aim of the study is shifting the rolling stock of urban electric vehicles for using new more advanced controlled reluctance traction drives. The development is performed based on the unit-modular principles, an approach that makes it possible to keep the same installation and connection dimensions of the used induction motors and minimize the production and financial costs. The pole numbers of different motor designs are compared in terms of the torque value and pulsation, and power loss in the magnetic core steel for the converter three-phase circuit arrangement. The advantage of the converter-fed inductor motor design with the stator to rotor teeth number ratio equal to 12/8 is shown.

Key words: converter-fed inductor electric motor, traction drive, subway, trolleybus, unit-modular designing, magnetic core configuration

REFERENCES

1. Il'inskiy N.F. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1997, No. 2, pp. 7–9.
2. Akhunov T.A., Makarov L.N., Bychkov M.G., Il'inskiy N.F. *Privodnaya tekhnika – in Russ. (Drive Technology)*, 2001, No. 2, pp. 14–17.
3. Ptakh G.K. *Elektrotehnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal – in Russ. (Electrical Engineering: power electronic scientific journal)*, 2015, vol. 2, No. 3, pp. 23–33.
4. Kolomeitsev V.L., Pakhomin S.A., Krainov D.V., Pakhomin L.S., Prokopets A.I., Rednov F.A. *Trudy VIII Mezhduнародnoi (XIX Vserossiiskoi) konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* (Proc. of the VIII Intern. (XIX All-Russian) conf. on automated electric). Saransk, 7–9 oct. 2014. Publ. Mordoviya University, vol. 2, pp. 200–205.
5. Vinogradov A.B. *Ventil'no-induktornyi elektroprivod s minimizatsiyey pul'satsii elektromagnitnogo momenta* (Valve inductor electric minimizing electromagnetic torque ripple). Moscow, Scientific and Technical Centre «Vektor», 7 p.
6. Krasovskii A.B., Bychkov M.G. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2001, No. 10, pp. 33–43.
7. Kuznetsov V.A., Kuz'michev V.A. *Ventil'no induktornye dvigateli* (Valve inductor drives). Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 2003, 71 p.
8. Kuznetsov V.A., Kuz'michev V.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2007, No. 10, pp. 24–32.
9. Bychkov M.G. *Osnovy teorii, upravleniye i proektirovaniye ventil'no-induktorного elektroprivoda: Avtoref. dis.... D-ra tekhn. nauk* (Basic theory, control and design valve-inductor drive. Authors abstract of Dr. Sci. (Eng.)). Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 1999, 38 p.
10. Krasovskii A.B. *Imitatsionnye modeli v teorii i praktike ventil'no-induktorного elektroprivoda: Avtoref. dis....Dr. tekhn. nauk.* (Simulation models in the theory and practice of valve-inductor drive. Authors abstract of Dr. Sci. (Eng.)). Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 2004, 40 p.
11. Pakhomin S.A. *Razvitiye teorii i praktika proektirovaniya energosberegayushchikh ventil'no-induktornykh elektroprivodov: Avtoref. diss.... Dr. tekhn. nauk* (Development of the theory and practice of desing energy-efficient valve-inductor drives. Authors abstract of Dr. Sci. (Eng.)). Novocherkassk, 2001, 40 p.
12. Kolomeitsev L.F., Pakhomin S.A. *Izv. vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 2005, No. 2, pp. 6–9.
13. Kolomeitsev L.F., Bibikov V.I., Pakhomin S.A., Kolomeitsev G.V. *Izv. vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 2008, No. 1, pp. 69–72.
14. Nikiforov B.V., Pakhomin S.A., Ptakh G.K. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2007, No. 2, pp. 34–38.
15. Shcherbakov V.G. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2001, No. 3, pp. 37–39.
16. Antipov V.N., Grozov A.D. *Problemy sozdaniya i ekspluatatsii novykh tipov energeticheskogo oborudovaniya* (Problems of creation and operation of new types of power equipment). St. Petersburg, Branch of Russian Academy of Sciences, 2004, iss. 6, pp. 85–98.
17. Antipov V.N., Grozov A.D. *Mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov «Elektromekhanicheskiye preobrazovately energii»* (Interuniversity thematic collection of scientific papers «Electromechanical energy converters»). Omsk State University of Railway Engineering, 2014, pp. 6–11.
18. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Sbornik trudov konf. «Aktual'nye voprosy i perspektivy razvitiya elektromashinostroeniya»* (Proc. of the conf. «Actual problems and development perspectives of the electric machine»), Moscow, 3 December 2015. Moscow, All-Russia Scientific Institute of the Cable Industry, pp. 102–109.
19. Ovchinnikov I.E. *Izv. vuzov. Priborostroeniye – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Instrument-making)*, 2002, vol. 45, No. 8, pp. 5–11.
20. Andrada P., Blanque B., Martinez E., Perat J.I., Sanchez J.A., Torrent M. Performance comparison of switched reluctance motors with 6/4 and 12/8 magnetic structures. — ICEM 2002, p. 168.
21. Reinert J., Brockmeyer A., De Doncker R.W. Calculation of losses in ferro and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation. — IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, vol. 37(4), pp. 1055–1061.
22. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 6, pp. 41–46.