



ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.363+06
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-60-69
EDN: ZVLMML

А. В. КАШУБА
А. В. ШЕВКУНОВА

Ростовский государственный
университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрен энергоэффективный вентильно-индукторный электропривод применительно к электрическому подвижному составу. Он полностью удовлетворяет таким требованиям, как хорошие регулировочные свойства, высокая энергоэффективность и эксплуатационная надежность. Научная и техническая ценность результатов работы заключается в разработке алгоритма управления тяговым вентильно-индукторным двигателем, обеспечивающим снижение действующего тока при обеспечении необходимой мощности. Расчеты были произведены посредством специализированных взаимодействующих друг с другом программ FEMM и MATLAB. Материалы данного исследования представляют практическую ценность для повышения эксплуатационных и технико-экономических показателей электроподвижного состава.

Ключевые слова: вентильно-индукторный электродвигатель, алгоритм, угол управления, оптимальность, тепловые потери, форма тока, электромагнитный момент.

Введение. Электрические машины преобразуют энергию, существующую в одной форме, в другую, необходимую для конкретного использования. Они играют важную роль в быту, на производстве и в промышленности. Несмотря на то, что асинхронные двигатели и двигатели с постоянными (редкоземельными) магнитами являются наиболее используемыми в передовых технологиях [1, 2], тем не менее вентильно-индукторные двигатели (ВИД) обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами электродвигателей. ВИД отличаются относительно низкой стоимостью, надежной

и простой конструкцией, отказоустойчивостью и способностью работать при высоких скоростях вращения или температурах. Кроме того, независимая электрическая изоляция фаз, выгодно отличает их от других конкурирующих двигателей с точки зрения надежности. Помимо индивидуальной изоляции фазы, отсутствие постоянных магнитов в их конструкции и конструкция их роторов без обмоток являются двумя дополнительными особенностями, которые отличают их от других машин.

Непрерывное развитие в области силовых электронных устройств сделало вентильно-индуктор-

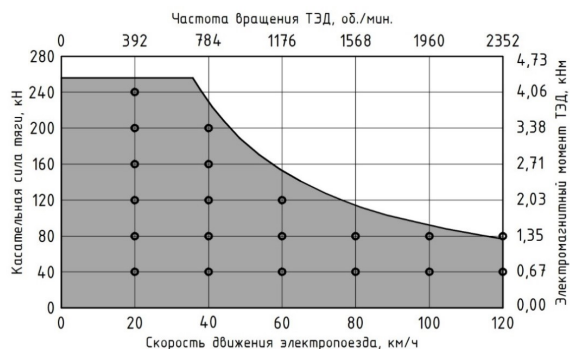


Рис. 4. Тяговая характеристика электропоезда ЭС-1

теристики послужили основой для расчета оптимальных углов управления.

Тяговый двигатель должен стабильно обеспечивать силу тяги электропоезда в достаточно широком диапазоне скоростей. Для расчета оптимальных углов управления ВИД были использованы характерные точки под графиком тяговой характеристики электропоезда ЭС-1 (рис. 4), выражающие сочетание различных частот вращения тягового электродвигателя и различных величин электромагнитного момента на его валу.

Для расчета частот вращения ТЭД $n_{ТЭД}$ в соответствии с определёнными значениями скорости движения электропоезда V_{gv} была использована следующая формула:

$$n_{ТЭД} = \frac{V_{gv} \cdot i_{рег} \cdot 30}{3,6 \cdot r_k \cdot \pi}, \quad (1)$$

где V_{gv} — скорость движения электропоезда, км/ч;
3,6 — коэффициент перевода скорости движения из единиц [км/ч] в единицы [м/с];

$i_{рег}$ — передаточное отношение редуктора, принимается $i_{рег} = 3,4$;

r_k — радиус колеса, принимается $r_k = 0,46$ м, что соответствует максимальному диаметру колеса 920 мм (табл. 1);

$\frac{30}{\pi}$ — коэффициент перевода частоты вращения ТЭД из единиц [рад/с] в единицы [об./мин].

На рис. 5 приведены введенные обозначения.

Выполнив соответствующие расчеты по формуле (1) для различных значений скорости движения электропоезда V_{gv} , получаем результаты, приведенные в табл. 1.

Для расчета электромагнитного момента на валу ТЭД M_{ϑ} в соответствии с определёнными значениями касательной силы тяги электропоезда F_k была использована следующая формула:

$$M_{\vartheta} = \frac{F_k \cdot r_k}{N_{ТЭД} \cdot i_{рег}}, \quad (2)$$

где F_k — касательная сила тяги электропоезда, кН;

$N_{ТЭД}$ — количество тяговых двигателей на один электропоезд, принимается $N_{ТЭД} = 8$.

При использовании формулы (2) электромагнитный момент M_{ϑ} будет иметь размерность [кН·м]. Выполнив соответствующие расчеты для различных значений касательной силы тяги электропоезда F_k , получаем результаты, приведенные в табл. 2.

При расчете оптимальных углов управления ТЭД вентильно-индукторного типа в качестве целевой функции ζ выступало выражение:

Таблица 1

Значения частот вращения ТЭД, соответствующие различным значениям скоростей движения

V_{gv} , км/ч	0	20	40	60	80	100	120
$n_{ТЭД}$, об./мин	0	392	784	1 176	1 568	1 960	2 352

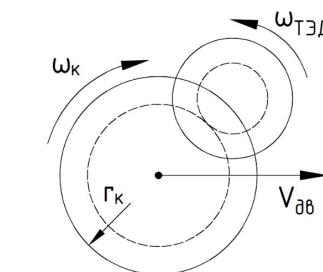


Рис. 5. Кинематическая схема тягового привода

Таблица 2

Значения электромагнитного момента ТЭД, соответствующие различным значениям касательной силы тяги

F_k , кН	0	40	80	120	160	200	240	280
M_{ϑ} , кН·м	0	0,67	1,35	2,03	2,71	3,38	4,06	4,73

$$\zeta(I_g) = I_g \rightarrow \min, \quad (3)$$

где I_g — действующее значение тока фазы, А.

Параметрами оптимизации являлись угол включения θ_{on} и угол выключения θ_{off} фазы.

Таким образом, целью оптимизации являлся расчет таких углов управления ВИД, которые обеспечивали бы для каждой частоты вращения необходимый уровень электромагнитного момента при минимально возможном действующем значении тока фазы.

Форма тока фазы (т.е. зависимость тока фазы от положения ротора) во многом определяет характеристики ВИМ. Форма тока фазы зависит от множества факторов: частота вращения, напряжение питания, активное сопротивление катушек, индуктивность катушек, геометрия магнитной системы. Перечисленные факторы служили при расчетах исходными данными, а углы управления ВИД — варьируемыми параметрами.

В основу расчета формы тока положено уравнение:

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{1}{L_{dk}(i_k, \theta)} \cdot \left(u_k - i_k R - \omega \cdot \frac{\partial \psi_k(i_k, \theta)}{\partial \theta} \right), \quad (4)$$

где i — ток k -ой фазы, А;

t — время, с;

L_d — дифференциальная индуктивность k -ой фазы, Гн;

θ — угловое положение ротора, эл. град.;

u — напряжение k -ой фазы, принимается $u = 1450$ В;

R — активное сопротивление фазной обмотки, принимается $R = 0,024$ Ом;

ω — угловая скорость ротора, рад/с; определяет по формуле (5);

ψ — потокосцепление k -ой фазы, Вб.

$$\omega = \frac{V_{gb} \cdot i_{peg}}{3,6 \cdot I_k} \quad (5)$$

Общий вид формы тока для ВИД представлен на рис. 6.

Как видно из рис. 6, форма тока также зависит от максимального значения тока I_{max} , которое контролируется с помощью электронного преобразователя и во многом определяет средний уровень электромагнитного момента на валу ВИД. Угол наклона участков нарастания и убывания тока определяется индуктивностью фазы и частотой вращения ТЭД, которые учитываются в дифференциальном уравнении (4).

Для каждого значения частоты вращения ТЭД (табл. 1) и при различных I_{max} , θ_{on} и θ_{off} была получена форма тока. Затем посредством полевых расчетов в программе FEMM [13–15] вычислялась соответствующая зависимость электромагнитного момента от положения ротора (кривая момента). Поскольку принципиальные особенности ВИД предусматривают пульсации момента на валу, то требуется вычислять среднее значение электромагнитного момента путем интегрирования:

$$M_{cp} = \frac{1}{\Delta\theta} \int_0^{\Delta\theta} M_{\Sigma}(\theta) d\theta, \quad (6)$$

где $\Delta\theta$ — диапазон положения ротора, соответствующий интервалу повторяемости кривой момента; для трехфазных машин $\Delta\theta = 120$ эл. град.

Для соответствия уровня среднего электромагнитного момента ВИД, требуемому согласно формуле (2) и табл. 2, выбиралась такая комбинация параметров формы тока (I_{max} , θ_{on} и θ_{off}), которая обеспечивала:

1) малое отклонение среднего момента от требуемого (не более чем на 0,05 кН·м);

2) наименьшее значение действующего тока I_g из всех вариантов, удовлетворяющих первому условию.

Результаты расчета оптимальных углов управления тяговым ВИД представлены в табл. 3. В табл. 4 приведены действующие и максимальные значения тока для углов управления $\theta_{on} = -210$ эл. град. и $\theta_{off} = -30$ эл. град. Промежуточные значения оптимальных углов управления могут быть получены методами интерполяции функций двух переменных.

На рис. 7 представлено сравнение кривых момента для режима работы ТЭД, соответствующего силе тяги электропоезда $F_k = 120$ кН ($M_{cp} = 2,03$ кН·м) и скорости движения $V_{gb} = 20$ км/ч ($n_{ТЭД} = 392$ об/мин) при различных углах управления. Пунктирная линия: $\theta_{on} = -210$ эл. град., $\theta_{off} = -30$ эл. град. Сплошная линия: $\theta_{on} = -190$ эл. град., $\theta_{off} = -40$ эл. град. (оптимальные углы управления по критерию «минимум действующего значения тока фазы»).

На рис. 8 представлено сравнение кривых тока одной фазы для этого же режима работы ТЭД вентильно-индукторного типа. Пунктирная линия:

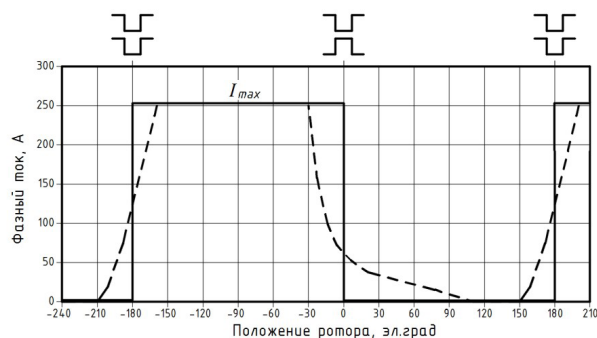


Рис. 6. Общий вид формы тока для ВИД:
сплошная линия — $n_{ТЭД} = 0$ об/мин (пусковой режим);
пунктирная линия — $n_{ТЭД} > 0$ об/мин

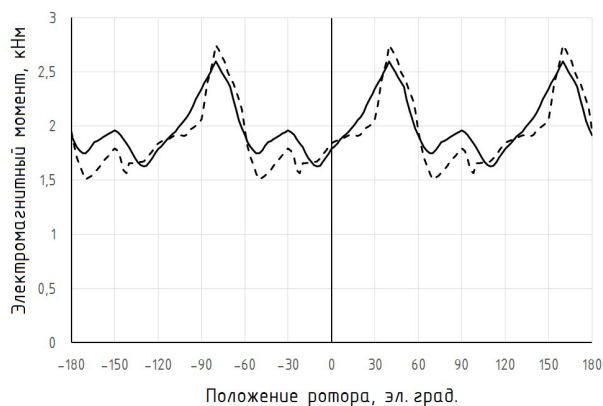


Рис. 7. Пример кривых момента ТЭД вентильно-индукторного типа при различных углах управления

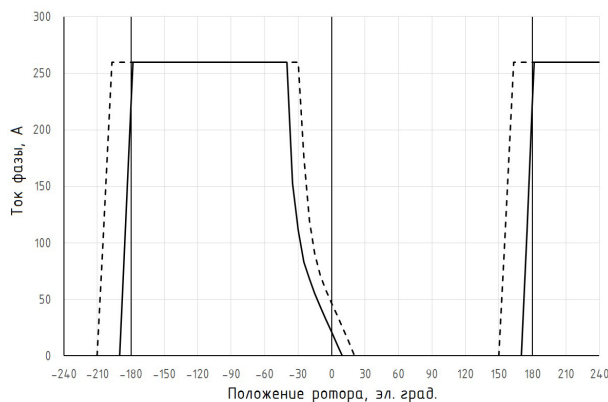


Рис. 8. Пример кривых тока ТЭД вентильно-индукторного типа при различных углах управления

$\theta_{on} = -210$ эл. град., $\theta_{off} = -30$ эл. град. Сплошная линия: $\theta_{on} = -190$ эл. град., $\theta_{off} = -40$ эл. град. (оптимальные углы управления по критерию «минимум действующего значения тока фазы»). В данном примере величина I_{max} одинакова для обоих случаев и составляет 260 А, но разные формы тока обеспечивают разные величины действующих значений. Для углов управления $\theta_{on} = -210$ эл. град., $\theta_{off} = -30$ эл. град. действующее значение тока составляет $I_g = 183$ А, а для оптимальных углов действующее значение тока составляет $I_g = 167$ А.

Действующее значение тока за полный цикл коммутации фазы (360 эл. град.) определим по формуле:

Таблица 3

Значения оптимальных углов управления тяговым ВД

$F_{\kappa} (M_{\kappa})$	Скорость движения и частота вращения ТЭД						
	0 км/ч	20 км/ч	40 км/ч	60 км/ч	80 км/ч	100 км/ч	120 км/ч
	0 км/мин	392 об/мин	784 об/мин	1176 об/мин	1568 об/мин	1960 об/мин	2352 об/мин
240 кН (4,06 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 325$ А $I_{max} = 500$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—	—	—
200 кН (3,38 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 256$ А $I_{max} = 420$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 264$ А $I_{max} = 420$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—	—
160 кН (2,71 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 209$ А $I_{max} = 340$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 211$ А $I_{max} = 340$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—	—
120 кН (2,03 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 167$ А $I_{max} = 260$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 165$ А $I_{max} = 260$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 163$ А $I_{max} = 300$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—
80 кН (1,35 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 121$ А $I_{max} = 180$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -20$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 121$ А $I_{max} = 200$ А $\theta_{on} = -210$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 120$ А $I_{max} = 200$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 120$ А $I_{max} = 200$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 127$ А $I_{max} = 220$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 127$ А $I_{max} = 220$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -60$ эл. град.
40 кН (0,67 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 77$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 75$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -210$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 76$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 80$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 76$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -60$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 78$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -60$ эл. град.
0 кН (0 кНм)	—	—	—	—	—	—	—

Действующие и максимальные значения тока для углов управления
 $\theta_{on} = -210$ эл. град. и $\theta_{off} = -30$ эл. град

$F_k (M_3)$	Скорость движения и частота вращения ТЭД						
	0 км/ч	20 км/ч	40 км/ч	60 км/ч	80 км/ч	100 км/ч	120 км/ч
	0 об/мин	392 об/мин	784 об/мин	1176 об/мин	1568 об/мин	1960 об/мин	2352 об/мин
240 кН (4,06 кНм)	—	$I_A = 344$ А $I_{max} = 500$ А	—	—	—	—	—
200 кН (3,38 кНм)	—	$I_A = 292$ А $I_{max} = 420$ А	$I_A = 281$ А $I_{max} = 420$ А	—	—	—	—
160 кН (2,71 кНм)	—	$I_A = 238$ А $I_{max} = 340$ А	$I_A = 232$ А $I_{max} = 340$ А	—	—	—	—
120 кН (2,03 кНм)	—	$I_A = 183$ А $I_{max} = 260$ А	$I_A = 181$ А $I_{max} = 260$ А	$I_A = 179$ А $I_{max} = 260$ А	—	—	—
80 кН (1,35 кНм)	—	$I_A = 142$ А $I_{max} = 200$ А	$I_A = 141$ А $I_{max} = 200$ А	$I_A = 141$ А $I_{max} = 200$ А	$I_A = 141$ А $I_{max} = 200$ А	$I_A = 140$ А $I_{max} = 200$ А	$I_A = 152$ А $I_{max} = 220$ А
40 кН (0,67 кНм)	—	$I_A = 86$ А $I_{max} = 120$ А	$I_A = 87$ А $I_{max} = 120$ А	$I_A = 88$ А $I_{max} = 120$ А	$I_A = 89$ А $I_{max} = 120$ А	$I_A = 89$ А $I_{max} = 120$ А	$I_A = 109$ А $I_{max} = 140$ А
0 кН (0 кНм)	—	—	—	—	—	—	—

$$I_g = \frac{\sqrt{\int_0^{360} (I(\theta))^2 d\theta}}{360} \quad (7)$$

Критерий оптимизации «минимум действующего значения тока фазы» был выбран, исходя из соображений минимизации тепловых потерь. Ведь именно действующее значение тока I_g , проходящего по проводнику, определяет количество выделяемой тепловой энергии, которое частично определяет и КПД электрической машины.

Согласно закону Джоуля–Ленца, количество теплоты, выделяемое в единицу времени в рассматриваемом участке цепи, пропорционально произведению квадрата силы тока на этом участке и сопротивления участка. Закон Джоуля–Ленца для одной фазы ВИД выражает формула (8):

$$Q_\phi = I_g^2 R t \quad (8)$$

Количество теплоты, выделяемое на всех восьми ТЭД вентильно-индукторного типа электропоезда, определяется по формуле:

$$Q_{эл.} = Q_\phi \cdot m \cdot N_{ТЭД} \quad (9)$$

где m — число фаз; двигатель НТИ-350 имеет 3 фазы;

$N_{ТЭД}$ — количество тяговых двигателей на один электропоезд, принимается $N_{ТЭД} = 8$.

Учитывая формулы (8) и (9), приведем пример расчета тепловых потерь для всех ТЭД вентильно-индукторного типа электропоезда при различных углах управления за время работы равное 1-й минуте в рассматриваемом режиме. Для выражения величин тепловых потерь в единицах [кВт·ч] учтем также переводной коэффициент, равный $3,6 \cdot 10^{-6}$.

$$Q_{эл.1} = \frac{183^2 \cdot 0,024 \cdot 60 \cdot 3 \cdot 8}{3,6 \cdot 10^6} = 0,32 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$Q_{эл.2} = \frac{167^2 \cdot 0,024 \cdot 60 \cdot 3 \cdot 8}{3,6 \cdot 10^6} = 0,27 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где $Q_{эл.1}$ — тепловая энергия, выделяемая на всех ТЭД электропоезда в течение 1-й минуты (60 секунд) при углах управления $\theta_{on} = -210$ эл. град., $\theta_{off} = -30$ эл. град.;

$Q_{эл.2}$ — тепловая энергия, выделяемая на всех ТЭД электропоезда в течение 1-й минуты (60 секунд) при оптимальных углах управления $\theta_{on} = -190$ эл. град., $\theta_{off} = -40$ эл. град.

По аналогичной методике определим величину тепловых потерь для всех ТЭД вентильно-индукторного типа электропоезда при различных углах управления за год эксплуатации при условии, что среднесуточное время работы ТЭД в рассматриваемом режиме составляет 5 часов в сутки.

$$Q_1 = \frac{183^2 \cdot 0,024 \cdot 3600 \cdot 5 \cdot 365 \cdot 3 \cdot 8}{3,6 \cdot 10^6} = 35 \, 204 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$Q_2 = \frac{167^2 \cdot 0,024 \cdot 3600 \cdot 5 \cdot 365 \cdot 3 \cdot 8}{3,6 \cdot 10^6} = 29 \, 317 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где Q_1 — величина тепловых потерь для ТЭД всех электропоездов депо за один год работы при углах управления: $\theta_{on} = -210$ эл. град., $\theta_{off} = -30$ эл. град.;

Q_2 — величина тепловых потерь для ТЭД всех электропоездов депо за один год работы при оптимальных углах управления: $\theta_{on} = -190$ эл. град., $\theta_{off} = -40$ эл. град.

Коэффициент, равный 3600, указывает количество секунд в одном часе.

Определим экономию электроэнергии ΔQ , полученную только за счет снижения тепловых потерь, для электропоезда за год эксплуатации:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2, \quad (10)$$

$$\Delta Q = 35 \, 204 - 29 \, 317 = 5 \, 887 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следует отметить, что электропоезд работает в различных режимах, поэтому для оценки экономии электроэнергии введем допущение о том, что все режимы тяги могут быть равновероятны. Для этого поделим полученное значение ΔQ на количество режимов тяги, в которых наблюдается сни-

Таблица 5

Результаты расчета экономии электроэнергии

$F_x (M_x)$	Скорость движения и частота вращения ТЭД							
	0 км/ч	20 км/ч	40 км/ч	60 км/ч	80 км/ч	100 км/ч	120 км/ч	
	0 об/мин	392 об/мин	784 об/мин	1176 об/мин	1568 об/мин	1960 об/мин	2352 об/мин	
240 кН (4,06 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I = 325$ А $I_{\Lambda} = 500$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—	—	—	—
200 кН (3,38 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I = 256$ А $I_{\Lambda} = 420$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I = 264$ А $I_{\Lambda} = 420$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—	—	—
160 кН (2,71 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I = 209$ А $I_{\Lambda} = 340$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I = 211$ А $I_{\Lambda} = 340$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—	—	—
120 кН (2,03 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I = 167$ А $I_{\Lambda} = 260$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I = 165$ А $I_{\Lambda} = 260$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 163$ А $I_{\Lambda} = 300$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—	—
80 кН (1,35 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I = 121$ А $I_{\Lambda} = 180$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -20$ эл. град.	$I = 121$ А $I_{\Lambda} = 200$ А $\theta_{on} = -210$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	$I = 120$ А $I_{\Lambda} = 200$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I = 120$ А $I_{\Lambda} = 200$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 127$ А $I_{\Lambda} = 220$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 127$ А $I_{\Lambda} = 220$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -60$ эл. град.	
40 кН (0,67 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I = 77$ А $I_{\Lambda} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I = 75$ А $I_{\Lambda} = 120$ А $\theta_{on} = -210$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 76$ А $I_{\Lambda} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I = 80$ А $I_{\Lambda} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 76$ А $I_{\Lambda} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -60$ эл. град.	$I_{\Lambda} = 78$ А $I_{\Lambda} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -60$ эл. град.	
0 кН (0 кНм)	—	—	—	—	—	—	—	—

жение тепловых потерь за счет изменения углов управления ТЭД. Количество таких режимов составляет 20.

Тогда экономия электроэнергии для рассматриваемого режима за год будет определяться по формуле:

$$\Delta Q_{cp} = \frac{\Delta Q}{20}. \quad (11)$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$\Delta Q_{cp} = \frac{5\,887}{20} = 294 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Аналогичные расчеты, выполненные для всех режимов тяги электропоезда, для которых наблюдается снижение тепловых потерь за счет изменения углов управления ТЭД, представлены в табл. 5.

Таким образом, снижение тепловых потерь для одного электропоезда (с учетом возможности работы во всех режимах тяги) в год $\Delta Q_{эл.}$ определяется как сумма всех значений ΔQ_{cp} и составляет 6 286 кВт·ч.

При условии, что количество электропоездов в депо $N_{эл.}$ составляет 20, экономия электроэнергии для всего депо за один год работы ΔQ_{geno} определяется по формуле:

$$\Delta Q_{geno} = \Delta Q_{эл.} \cdot N_{эл.} \quad (12)$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$\Delta Q_{geno} = 6\,286 \cdot 20 = 125\,717 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следует также отметить, что полученный результат учитывает экономию электроэнергии только за счет снижения активных потерь. Однако не учтена разница потерь на вихревые токи, перемагничивание стали и другие электромагнитные процессы, которые также являются важными составляющими потерь. Кроме того, в долгосрочной перспективе экономический эффект включает в себя и разницу в интенсивности старения изоляции за счет разного нагрева.

Выводы. Данное исследование было посвящено разработке алгоритма управления тяговым электродвигателем вентильно-индукторного типа с учетом режимов нагружения.

Проведены расчеты, выполненные для всех режимов тяги электропоезда, для которых наблюдается снижение тепловых потерь за счет изменения углов управления ТЭД. Полученное значение экономии электроэнергии для всего депо за один год работы служит исходным условием для дальнейших экономических расчетов.

Неучтенные факторы, такие как разница потерь на вихревые токи, перемагничивание стали и другие электромагнитные процессы, являющиеся важными составляющими потерь, являются перспективной для совершенствования приведенных в данной статье вычислений.

Библиографический список

1. Авдеев А. С., Осипов О. И. Идентификация электрических параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 3 (52). С. 38–46. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-38-46. EDN: ROMSBX.

2. Yangabc J., Chen J., Yang G. [et al.]. Research on cogging torque characteristics of permanent magnet synchronous machines with the same number of poles and slots // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022. Vol. 561 (6). P. 169730. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169730.

3. Смачный В. Ю. Анализ схем преобразователей, применяемых для питания фаз вентильно-индукторных приводов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30. № 2 (74). С. 100–121. DOI: 10.14498/tech.2022.2.8. EDN: OOLCQ.

4. Kashuba A. V., Shevkunova A. V. Reduction of pulsations of the electromagnetic moment of the switched reluctance electric motor // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2022. P. 461–466. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787213.

5. Miroshnichenko E. E. Effect of the forces of one-way magnetic attraction on the reliability of the bearing unit of the traction switched reluctance motor // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2131 (4). P. 042078. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042078. EDN: CQKJOT.

6. Мирошниченко Е. Е. Тяговый вентильно-индукторный двигатель с улучшенными показателями надежности подшипниковых узлов для электрического подвижного состава // Транспортные системы и технологии. 2021. Т. 7, № 2. С. 97–105. DOI: 10.17816/transsyst20217297-105.

7. Petrushin A., Smachney V., Petrushin D. Research of options for maintaining the operability of the traction switched reluctance motors in emergencies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 950 (1). P. 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/950/1/012028.

8. Shevkunova A., Shevkunov N. Efficiency of the Project for the Production of the Modernized Switched Reluctance Motor // Lecture Notes in Networks and Systemsthis. 2022. Vol. 509. P. 33–42.

9. Buriakovskiy S., Babaiev M., Lubarskiy B. [et al.]. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of hybrid diesel locomotive // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. No. 1/2 (91). P. 68–75. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.122422.

10. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. USA: CRC Press. 2001. 432 p.

11. Bajpai D., Kant Jogi V. Brief History of Switched Reluctance Motor // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE). 2018. Vol. 13, Issue 1 Ver. IV. P. 1–25. DOI: 10.9790/1676-1301040125.

12. Демидова Г. Л., Дербиков Я. Д., Петриков Ф. С. [и др.]. Сравнительный анализ методов управления вентильно-индукторной электрической машиной // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 2. С. 390–402. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-390-402. EDN: UKMRRO.

13. Mohanraj G. T., Rahman M. R., Joladarashi Sh. [et al.]. Design and fabrication of optimized magnetic roller for permanent roll magnetic separator (PRMS): Finite element method magnetics (FEMM) approach // Advanced Powder Technology. 2021. Vol. 32 (2). P. 546–564. DOI: 10.1016/j.appt.2021.01.003.

14. Шабанов А. С., Нейман В. Ю. Применение пакетов программ FEMM и Comsol Multiphysics в задачах расчета линейных электромагнитных двигателей // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 5 (13). С. 96–100. EDN: ZOLHPH. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-paketov-programm-femm-i-comsol-multiphysics-v-zadachah-rascheta-lineynyh-elektromagnitnyh-dvigatelay> (дата обращения: 28.04.2023).

15. Прошутинский Р. И., Колодкин О. В. Автоматизация проектирования электромеханического преобразователя вентильного тягового двигателя с помощью современных программных средств // Бюллетень результатов научных исследований. 2016. № 1 (18). С. 72–79. EDN: VPZKMV. URL: <https://>

cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-proektirovaniya-elektromehanicheskogo-preobrazovatelya-ventilnogo-tyagovogo-dvigatelya-s-pomoschyu-sovremennyh (дата обращения: 28.04.2023).

КАШУБА Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), г. Ростов-на-Дону.

SPIN-код: 4086-1671

AuthorID (РИНЦ): 922722

ORCID: 0000-0002-6529-1895

AuthorID (SCOPUS): 57194232715

ResearcherID: CAA-2491-2022

Адрес для переписки: kashuba-av@mail.ru

ШЕВКУНОВА Анастасия Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

SPIN-код: 9904-0711

AuthorID (РИНЦ): 823538

ORCID: 0000-0002-5508-8367

AuthorID (SCOPUS): 57194232704

ResearcherID: AAI-8866-2021

Адрес для переписки: nastya3051990@mail.ru

Для цитирования

Кашуба А. В., Шевкунова А. В. Построение алгоритма управления с целью повышения энергоэффективности вентильно-индукторного электродвигателя // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 60–69. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-60-69.

Статья поступила в редакцию 02.05.2023 г.

© А. В. Кашуба, А. В. Шевкунова

UDC 621.363 + 06

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-60-69

EDN: ZVLMML

A. V. KASHUBA
A. V. SHEVKUNOVA

Rostov State
Transport University,
Rostov-on-Don, Russia

CONSTRUCTION OF THE CONTROL ALGORITHM TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF A SWITCHED RELUCTANCE ELECTRIC MOTOR

An energy-efficient switched reluctance electric drive is considered in relation to electric rolling stock. It fully meets such requirements as good adjustment properties, high energy efficiency and operational reliability. The scientific and technical value of the results of the work lies in the development of an algorithm for controlling a traction switched reluctance motor that reduces the operating current while providing the necessary power. The calculations are made by means of specialized programs interacting with each other FEMM and MATLAB. The materials of this study are of practical value for improving the operational and technical and economic indicators of electric rolling stock.

Keywords: switched reluctance electric motor, algorithm, control angle, optimality, heat loss, current form, electromagnetic moment.

References

1. Avdeyev A. S., Osipov O. I. Identifikatsiya elektricheskikh parametrov sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami [Electrical parameters identification of permanent magnet synchronous motor] // *Elektrotekhnicheskiye Sistemy i Kompleksy. Electrotechnical Systems and Complexes*. 2021. No. 3 (52). P. 38–46. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-38-46. EDN: ROMSBX. (In Russ.).

2. Yangabc J., Chen J., Yang G., Zhang C. Research on cogging torque characteristics of permanent magnet synchronous machines with the same number of poles and slots // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022. Vol. 561. P. 169730. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169730. (In Engl.).

3. Smachnyy V. Yu. Analiz skhem preobrazovateley, primenyayemykh dlya pitaniya faz ventil'no-induktornykh privodov [Analysis of converter circuits used to power the phases of switched reluctance drives] // *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye Nauki. Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2022. Vol. 30, no. 2 (74). P. 100–121. DOI: 10.14498/tech.2022.2.8. EDN: OOOLCQ. (In Russ.).

4. Kashuba A. V., Shevkunova A. V. Reduction of pulsations of the electromagnetic moment of the switched reluctance electric motor // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2022. P. 461–466. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787213. (In Engl.).

5. Miroschnichenko E. E. Effect of the forces of one-way magnetic attraction on the reliability of the bearing unit of the traction switched reluctance motor // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2131 (4). P. 042078. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042078. EDN: CQKJOT. (In Engl.).
6. Miroschnichenko E. E. Tyagovyy ventil'no-induktorny dvigatel' s uluchshennymi pokazatelyami nadezhnosti podshipnikovyykh uzlov dlya elektricheskogo podvizhnogo sostava [Switched reluctance traction motor with improved indicators of the reliability of bearing units for an electric rolling stock] // *Transportnyye Sistemy i Tekhnologii. Transportation Systems and Technology*. 2021. Vol. 7, no. 2. P. 97–105. DOI: 10.17816/transsy20217297-105. (In Russ.).
7. Petrushin A., Smachney V., Petrushin D. Research of options for maintaining the operability of the traction switched reluctance motors in emergencies // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 950 (1). P. 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/950/1/012028. (In Engl.).
8. Shevkunova A., Shevkunov N. Efficiency of the Project for the Production of the Modernized Switched Reluctance Motor // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 509. P. 33–42. (In Engl.).
9. Buriakovskiy S., Babaiev M., Lubarskiy B. [et al.]. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of hybrid diesel locomotive // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. No. 1/2 (91). P. 68–75. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.122422. (In Engl.).
10. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. Florida: CRC Press. 2001. 432 p. (In Engl.).
11. Bajpai D., Kant Jogi V. Brief History of Switched Reluctance Motor // *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 2018. Vol. 13, Issue 1 Ver. IV. P. 1–25. DOI: 10.9790/1676-1301040125. (In Engl.).
12. Demidova G. L., Derbikov Ya. D., Petrikov F. S. [et al.]. Sravnitel'nyy analiz metodov upravleniya ventil'no-induktornoy elektricheskoy mashinoy [Comparative analysis of switched reluctance motor control algorithms] // *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologiy, Mekhaniki i Optiki. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2023. Vol. 23, no. 2. P. 390–402. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-390-402. EDN: UKMRRO. (In Russ.).
13. Mohanraj G. T., Rahman M. R., Joladarashi Sh. [et al.]. Design and fabrication of optimized magnetic roller for permanent roll magnetic separator (PRMS): Finite element method magnetism (FEMM) approach // *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32 (2). P. 546–564. DOI: 10.1016/j.apt.2021.01.003. (In Engl.).
14. Shabanov A. S., Neyman V. Yu. Primeneniye paketov programm FEMM i Comsol Multiphysics v zadachakh rascheta lineynykh elektromagnitnykh dvigateley [Application of FEMM and Comsol Multiphysics software packages in the calculation of linear electromagnetic motors] // *Sovremennyye Materialy, Tekhnika i Tekhnologii. Modern Materials, Equipment and Technologies*. 2017. No. 5 (13). P. 96–100. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-paketov-programm-femm-i-comsol-multiphysics-v-zadachah-rascheta-lineynykh-elektromagnitnykh-dvigatelay> (accessed: 28.04.2023). (In Russ.).
15. Proshchinskiy R. I., Kolodkin O. V. Avtomatizatsiya proyektirovaniya elektromekhanicheskogo preobrazovatelya ventil'nogo tyagovogo dvigatelya s pomoshch'yu sovremennykh programmnykh sredstv [Computer aided design of electromechanical transducer of gated traction motor by using modern software] // *Byulleten' Rezul'tatov Nauchnykh Issledovaniy. Bulletin of Scientific Research Results*. 2016. No. 1 (18). P. 72–79. EDN: VPZKMV. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-proektirovaniya-elektromekhanicheskogo-preobrazovatelya-ventilnogo-tyagovogo-dvigatelya-s-pomoschyu-sovremennykh> (accessed: 28.04.2023). (In Russ.).

KASHUBA Aleksandr Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Theoretical Mechanics Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don.
 SPIN-code: 4086-1671
 AuthorID (RSCI): 922722
 ORCID: 0000-0002-6529-1895
 AuthorID (SCOPUS): 57194232715
 ResearcherID: CAA-2491-2022
 Correspondence address: kashuba-av@mail.ru
SHEVKUNOVA Anastasiya Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Traction Rolling Stock Department, RSTU, Rostov-on-Don.
 SPIN-code: 9904-0711
 AuthorID (RSCI): 823538
 ORCID: 0000-0002-5508-8367
 AuthorID (SCOPUS): 57194232704
 ResearcherID: AAI-8866-2021
 Correspondence address: nastya3051990@mail.ru

For citations

Kashuba A. V., Shevkunova A. V. Construction of the control algorithm to improve energy efficiency of a switched reluctance electric motor // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 60–69. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-60-69.

Received May 02, 2023.

© A. V. Kashuba, A. V. Shevkunova