

Приведен концептуальный проект скоростного двухсистемного электропоезда с безредукторным приводом на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком

УДК 629.429.3:621.313

Б. Г. Любарский, канд. техн. наук,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Е. С. Рябов, канд. техн. наук
Государственное предприятие «Завод Электротяжмаш»

М. Л. Глебова, канд. техн. наук
Харьковская национальная академия городского хозяйства

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ СКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА С БЕЗРЕДУКТОРНЫМ ПРИВОДОМ НА ОСНОВЕ РЕАКТИВНОГО ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

В настоящее время пассажирский железнодорожный транспорт Украины не в полном объеме удовлетворяет потребности общества. В первую очередь, это касается качества услуг, где одним из проблемных вопросов является недостаточная скорость пассажирских перевозок. Исходя из нынешних объективных экономических реалий, особую привлекательность для внедрения имеет система скоростных и ускоренных дневных поездов, движение которых осуществляется по существующим и модернизированным линиям с максимальными скоростями движения до (140...160) км/ч. Первым шагом в этом направлении стала организация движения ускоренных поездов на локомотивной тяге. Однако, как показывает опыт зарубежных стран, использовать потенциал железных дорог для организации скоростного движения в полном объеме можно только с использованием специализированного подвижного состава. Поэтому создание такого подвижного состава для железных дорог Украины является необходимым и востребованным.

Важнейшим элементом подвижного состава является тяговый электропривод, поскольку в нем происходит преобразование электрической энергии, потребляемой из контактной сети, в механическую работу по перемещению подвижного состава. Энергетическая эффективность этого преобразования имеет непосредственное влияние на эксплуатационные расходы и в сочетании с расходами на обслуживание определяет конкурентоспособность железнодорожных пассажирских перевозок [1]. Создания тягового электропривода для современного подвижного состава должно осуществляться на базе новых технических решений, с применением новых технологий, направленных на повышение энергетической эффективности и снижении затрат жизненного цикла.

Решение этой задачи возможно путем внедрения безредукторного тягового привода на основе двигателя с поперечным полем [2], что позволяет повысить КПД, снизить массу колесно-моторного блока, улучшить массогабаритные показатели тягового привода в целом. Однако широкому внедрению привода этого типа препятствует необходимость использования постоянных магнитов и связанных с этим технологических проблем. Одним из решений, позволяющих использовать

прогрессивную технологию безредукторного привода, является применение двигателя с поперечным полем, который работает исключительно по принципу реактивного индукторного двигателя. В работах [3 - 7] приведены составляющие программно-алгоритмического комплекса по проектированию тягового привода на основе тяговых двигателей такого типа.

В статье поставлена цель с использованием разработанного программно-алгоритмического комплекса по проектированию безредукторного тягового привода на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком разработать концептуальный проект скоростного электропоезда.

1. Выбор мощности тягового электропривода

Основой для проектирования нового подвижного состава является Типаж и технические требования на подвижной состав. В статье [8] приведены технические параметры нового подвижного состава для железных дорог Украины. Обращает на себя внимание тот факт, что для предлагаемого подвижного состава мощность тягового двигателя составляет от 5,2 до 6,0 МВт при числе пассажиров 400 – 440 чел., а энергопотребление (количество энергии, затрачиваемое на перевозку одного пассажира при максимальной скорости) равно 0,58...0,68 кВт·ч/км·пасс. Рассчитав аналогичный показатель для подвижного состава, используемого в региональных перевозках стран Европы [9, 10], легко показать, что энергопотребление у них в 1,5...2 раза ниже. Поскольку количество пассажиров в вагоне изменяется в очень небольших пределах, а максимальные скорости сравниваемого подвижного состава составляют 140-160 км/ч, то столь значительное расхождение в энергопотреблении можно объяснить только разной мощностью тягового привода.

Рассмотрим методику определения мощности тягового привода электропоездов [10]. Согласно существующим рекомендациям, мощность тягового привода определяют исходя из условия обеспечения заданного среднего ускорения до определённой скорости. Далее на основании расчёта среднеквадратичного тока на эквивалентном перегоне определяют мощность продолжительного режима. Для максимальной скорости определяется остаточное ускорение, которое не должно быть ниже 0,05 м/с² [11]. Тяговая характеристика для этого случая приведена на рис. 1 (кривая 1). От нуля до скорости V_n реализуется постоянство силы тяги (тяга F_n), а в диапазоне скоростей $V_n...V_э$ реализуется режим работы с постоянной мощностью.

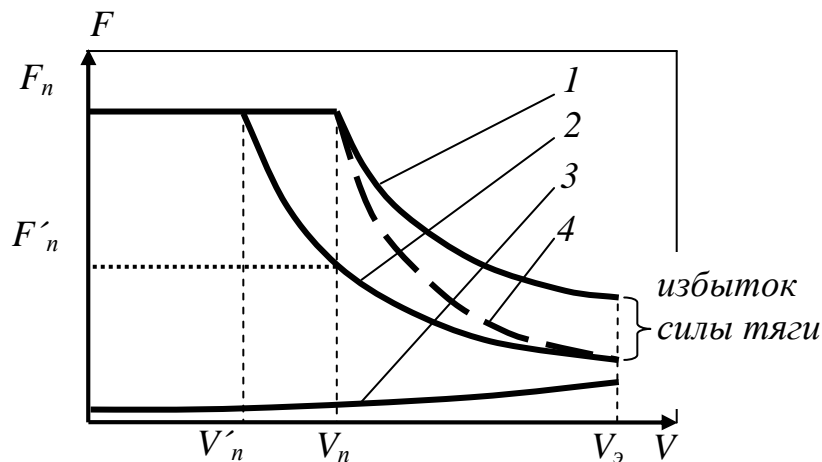


Рис. 1 - Тяговые характеристики:

1 – предельная тяговая характеристика по расчёту 1; 2 – предельная тяговая характеристика по расчёту 2; 3 – сопротивление движению; 4 – тяговая характеристика коллекторного привода

Построим кривую сопротивления движению (кривая 3) на том же графике. Для большинства вариантов при эксплуатационной скорости она пройдет существенно ниже кривой 1. Т.е. мощность тягового привода больше необходимой для движения с равновесной скоростью V_3 , откуда следует неизбежное снижение мощности и недоиспользование оборудования. А поскольку для скоростного поезда режим движения с максимальной скоростью является основным режимом работы, возникает вопрос о целесообразности такого использования электрооборудования. Для иллюстрации вышесказанного можно привести следующие данные: для подвижного состава с нагрузкой на ось 17 т для реализации пускового ускорения $0,8 \text{ м/с}^2$ мощность тягового двигателя составит 260 кВт. В то же время, для движения со скоростью 160 км/час и запасом по ускорению $0,05 \text{ м/с}^2$ необходимая мощность равна 115 кВт.

На наш взгляд, более рационально определять мощность исходя из режима эксплуатационной скорости, как это предложено в [12]. В этом случае мощность привода окажется лишь немного больше необходимой по причине реализации остаточного ускорения. Тяговая характеристика для этого случая приведена на том же рисунке (кривая 2). Однако при этом либо не будет выполнено условие реализации пускового ускорения: оно будет реализовано лишь в диапазоне скоростей от нуля до V'_n , либо разгон будет осуществляться с пониженным пусковым ускорением (тягой F'_n).

Выходом из этой ситуации может стать использование привода, допускающего работу с перегрузкой в пусковых режимах [13]. Такой подход имеет место на подвижном составе городского электротранспорта. Номинальным режим здесь принято считать часовой режим работы. Для скоростного электроподвижного состава номинальным режимом его работы следует установить режим, соответствующий движению с эксплуатационной скоростью. Для скоростного поезда это приемлемо, поскольку работа с перегрузкой будет являться кратковременной. При этом от нуля до скорости V_n реализуется тяга F_n (это обеспечивает заданное пусковое ускорение), а в диапазоне скоростей $V_n \dots V_3$ идет постепенное снижение мощности по кривой 4. Также следует учитывать возможность реализации предельных по сцеплению сил тяги при работе в диапазоне скоростей $0 \dots V_n$, что также способствует увеличению среднего пускового ускорения [14]. Необходимость и возможность реализации таким приводом характеристики 1 должна быть исследована дополнительно.

Следует отметить, что вид тяговой характеристики 4 характерен для тягового привода с двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением, в котором поддержание требуемой силы тяги при пуске осуществляется реостатно-контакторной системой управления, а двигатель проектируется таким образом, чтобы обеспечить необходимый момент при максимальной частоте вращения.

Обращает внимание то, что режим работы скоростного поезда – это движение с эксплуатационной или близкой к ней скоростями. Поэтому на таком подвижном составе следует применять привод, который обеспечивает для таких скоростей наивысшие энергетические показатели в указанном режиме работы. Такой подход реализован на электропоезде ЭР200 [11].

При выборе мощности тягового привода также следует уделять внимание конфигурации поезда. Зарубежный опыт показывает, что технико-экономические и потребительские свойства пассажирского подвижного состава определяются условиями их эксплуатации [15]. Как правило, железнодорожные компании покупают небольшие по численности серии вагонов. Однако эти вагоны сконструированы и оборудованы с учетом всех специфических требований заказчика. В этих условиях для существенного уменьшения капитальных затрат была предложена и получила широкое развитие концепция модульных платформ, когда подвижной состав фактически

комбинируется из типоразмерного ряда унифицированных модулей различного назначения. Сегодня это - типовое решение, предлагаемое практически всеми ведущими мировыми производителями подвижного состава для перевозки пассажиров. Предлагаемый подход к выбору мощности тягового привода хорошо сочетается с модульной концепцией построения состава, поскольку уменьшение мощности оборудования, как правило, ведёт к уменьшению его габаритов.

Таким образом, основными требованиями к тяговому приводу скоростного состава можно считать:

- высокие энергетические показатели в эксплуатационных режимах;
- обеспечение перегрузки в пусковом режиме.

Эти требования могут быть успешно реализованы приводами переменного тока на основе асинхронных и синхронных двигателей – с постоянными магнитами, реактивными индукторными, с аксиальным магнитным потоком. Повышению общего КПД привода способствует внедрение безредукторного тягового привода.

С учётом вышеизложенного примем следующие данные для проектирования тягового электропривода скоростного электропоезда:

– род тока	= 3 кВ, ~ 25 кВ, 50 Гц
конструкционная скорость	160 км/ч
– пусковая скорость	60 км/ч
– среднее ускорение при пуске	0,45 м/с ²
– «остаточное» ускорение при конструкционной скорости, не менее	0,05 м/с ²
– нагрузка на ось, не более	17 т
– диаметр колёс по кругу катания, при новых бандажах	0,95 м
при изношенных бандажах	0,89 м
– тип тягового электродвигателя	АИД
– подвешивание тягового двигателя	опорно-рамное
– тип механического привода	полый вал с резино-кордными муфтами
– количество вагонов в поезде	2...12
– базовая секция	М(Г)+МТ(МТр)

Здесь обозначены типы вагонов: М – моторный, Г – головной, МТ – моторный с токоприёмником, Мтр – моторный с трансформатором.

Сила тяги одной оси при конструкционной скорости

$$F = \frac{[w'_{\max} + 1020 \cdot a_{ост} \cdot (1 + \gamma) + i_0] \cdot M_c}{N_{ме} \cdot N_{ос}}, \quad (1)$$

где w'_{\max} – основное удельное сопротивление движению электропоезда при максимальной скорости;

$a_{ост}$ – остаточное ускорения при максимальной скорости, равное 0,05 м²/с;

$(1 + \gamma)$ = 1,05...1,12 – коэффициент вращающихся масс, примем $(1 + \gamma) = 1,08$;

i_0 – удельное сопротивление от подъёма;

M_c – масса секции;

$N_{ме}$ – количество моторных вагонов в секции;

$N_{\text{дв}}$ – количество тяговых двигателей на моторном вагоне.

Основное удельное сопротивление движению электропоезда при максимальной скорости [16]:

$$\begin{aligned} w' &= 8,6 + 0,07 \cdot V_{\text{max}} + 0,00165 \cdot V_{\text{max}}^2 = \\ &= 8,6 + 0,07 \cdot 160 + 0,00165 \cdot 160^2 = 62,04 \text{ Н/т.} \end{aligned} \quad (2)$$

При условии равенства осевых нагрузок всех вагонов базовой секции:

$$M_c = (N_{\text{мв}} + N_{\text{нр}}) \cdot N_o \cdot Q_o, \quad (3)$$

где $N_{\text{мв}}$ – количество моторных вагонов в секции, $N_{\text{мв}}=2$;

$N_{\text{нр}}$ – количество прицепных вагонов в секции, $N_{\text{нр}}=0$;

N_o – количество осей в вагоне, $N_o=4$;

Q_o – нагрузка на ось, равная 17 т.

Тогда масса секции (по 3):

$$M_c = 2 \cdot 4 \cdot 17 = 136 \text{ т.}$$

и сила тяги по (1)

$$F = \frac{[62,04 + 1020 \cdot 0,05 \cdot 1,08] \cdot 136}{2 \cdot 4 \cdot 0,99} = 2011 \text{ Н.}$$

Момент на валу:

$$M = \frac{F \cdot D_k}{2 \cdot \eta_{\text{ред}}}, \quad (4)$$

где D_k – диаметр колеса по кругу катания при новых бандажах;

$\eta_{\text{пер}}$ – к.п.д. тяговой (механической) передачи, $\eta_{\text{пер}} \approx 0,99$ д.е.

Тогда:

$$M = \frac{2011 \cdot 0,91}{2 \cdot 0,99} = 924,3 \text{ Нм.}$$

Частота вращения двигателя при конструкционной скорости и новых бандажах:

$$n_p = \frac{V_{\text{max}} \cdot 1000}{60 \cdot \pi \cdot D_k} = \frac{160 \cdot 1000}{60 \cdot \pi \cdot 0,91} = 933 \text{ об/мин,} \quad (5)$$

где $D_{\text{изн}}$ – диаметр колеса по кругу катания при новых бандажах.

Мощность на валу:

$$P_{\text{дв}} = \frac{F_k \cdot V_{\text{ном}}}{3600} = \frac{2011 \cdot 160}{3600} = 89,4 \text{ кВт.} \quad (6)$$

Сила тяги при пуске:

$$F_{\text{пуск}} = \frac{[w'_{\text{пуск}} + 1020 \cdot a_{\text{пуск}} \cdot (1 + \gamma) + i_0] \cdot M_c}{N_{\text{мв}} \cdot N_{\text{дв}}} \quad (7)$$

где $w'_{\text{пуск}}$ – основное удельное сопротивление движению электропоезда при пусковой скорости;

$a_{\text{пуск}}$ – среднее ускорение при разгоне до пусковой скорости.

Основное удельное сопротивление движению электропоезда при пусковой скорости:

$$\begin{aligned} w'_{\text{пуск}} &= 8,6 + 0,07 \cdot V_{\text{пуск}} + 0,00165 \cdot V_{\text{пуск}}^2 = \\ &= 8,6 + 0,07 \cdot 60 + 0,00165 \cdot 60^2 = 18,74 \text{ Н/т.} \end{aligned} \quad (8)$$

Сила тяги по (7):

$$F_{\text{пуск}} = \frac{[18,74 + 1020 \cdot 0,45 \cdot 1,08] \cdot 136}{2 \cdot 4} = 8746 \text{ Н.}$$

Момент на валу:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{F_{\text{пуск}} \cdot D_k}{2 \cdot \eta_{\text{ред}}} = \frac{8746 \cdot 0,91}{2 \cdot 0,99} = 4020 \text{ Нм.} \quad (9)$$

Частота вращения при пусковой скорости:

$$n_{\text{пуск}} = \frac{V_{\text{пуск}} \cdot 1000}{60 \cdot \pi \cdot D_k} = \frac{60 \cdot 1000}{60 \cdot \pi \cdot 0,91} = 350 \text{ об/мин.} \quad (10)$$

Таким образом, для предлагаемого концептуального проекта скоростного электропоезда необходим двигатель мощностью 90 кВт и частотой вращения 935 об/мин. В диапазоне частот 0...350 об/мин двигатель должен развивать момент 4020 Нм.

2. Определение основных параметров реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком

С использованием математической модели для определения электромагнитного момента, разработанной в [3-5], определим основные параметры реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком.

Пусковой момент АИД определён в [3] и составляет 4020 Нм.

В табл. 1 приведены результаты расчётов.

Таблица 1

Результаты расчётов АИД для концептуального проекта скоростного электропоезда

Параметр	Номер варианта		
	1	2	3
Число фаз m	6	8	8
Число зубцов Z	32	34	38
Внутренний диаметр статора D_i , м	0,4885	0,4933	0,4904
Односторонний воздушный зазор в согласованном положении δ , м	0,001	0,0012	0,0011
Отношение ширины зубца статора к зубцовому делению статора α_1 , д.е.	0,3925	0,4311	0,4365
Отношение ширины зубца ротора к зубцовому делению ротора α_2 , д.е.	0,4147	0,4417	0,472
Высота зубца статора h_{z1} , м	0,0146	0,0138	0,0114
Высота зубца ротора h_{z2} , м	0,014	0,0159	0,013
Осевая длина зубца статора l_{z1} , м	0,026	0,0297	0,0349
Осевая длина зубца ротора l_{z2} , м	0,0256	0,0273	0,0341
Индукция в воздушном зазоре в согласованном положении B_δ , Тл	2,121	2,039	2,016

Определение числа витков фазной катушки следует проводить по режиму работы при максимальной частоте вращения, причём в качестве максимальной частоты вращения необходимо принимать частоту вращения при полностью изношенных бандажах:

$$n_{\max} = \frac{V_{\max} \cdot 1000}{60 \cdot \pi \cdot D_{\text{изн}}} = \frac{160 \cdot 1000}{60 \cdot \pi \cdot 0,89} = 954 \text{ об/мин} \quad (11)$$

где $D_{\text{изн}}$ – диаметр колеса по кругу катания при полностью изношенных бандажах.

При определении числа витков в режиме максимальной частоты вращения путём варьирования параметров питания (длительности импульсов и угла его подачи) добиваются заданного момента двигателя при возможно большем числе витков [17]. Это ведёт к снижению коммутируемого тока в пусковых режимах работы.

Для определения числа витков фазной катушки используется имитационная модель тягового электропривода, разработанная в [6, 7].

Порядок определения числа витков фазной катушки можно представить следующей последовательностью действий:

1. Определить проводимость зубцового слоя на основании расчёта магнитного поля МКЭ.
2. Определить размеры сердечников статора и ротора.
3. Задать число витков.
4. Определить электромагнитные связи путём многократного расчёта магнитной цепи.
5. Задать массив параметров питания – длительности импульса и углы его подачи.

6. Определить электромагнитный момент для каждой пары параметров питания с использованием имитационной модели.
7. Если заданный момент достигнут, увеличить число витков и перейти к п.3.
8. Если заданный момент не достигнут, уменьшить число витков и перейти к п.3.
9. Выбрать вариант с наибольшим числом витков.
10. Выход.

В табл. 2 и 3 приведены результаты расчётов при числе витков фазной катушки 36 (приведена лишь часть результатов).

Таблица 2

Зависимость электромагнитного момента и коэффициента пульсаций

Продолжительность импульса β , эл. град.	Угол опережения α , эл.град.					
	Момент, Нм			Коэффициент пульсаций, д.е.		
	60	65	70	60	65	70
160	876,5	924,8	967,5	0,54	0,58	0,62
162	886,0	936,0	980,6	0,52	0,56	0,61
164	894,2	946,4	994,0	0,51	0,55	0,59
166	901,3	955,8	1004,7	0,50	0,54	0,58
168	907,9	964,4	1016,1	0,49	0,53	0,56
170	912,5	971,0	1025,8	0,48	0,52	0,55
172	916,4	976,5	1034,2	0,48	0,51	0,54
174	919,5	982,2	1041,2	0,47	0,50	0,53
176	920,7	986,8	1047,3	0,46	0,49	0,53
178	922,1	989,5	1053,5	0,46	0,49	0,51
180	929,1	999,8	1066,6	0,44	0,47	0,50

Анализ данных табл. 2 показывает, что требуемый электромагнитный момент, равный 925 Нм, может быть достигнут при нескольких сочетаниях параметров α и β . При этом: с увеличением углов α и β электромагнитный момент увеличивается; рост момента в большей степени зависит от угла α .

При увеличении продолжительности импульса β коэффициент пульсаций момента уменьшается. При увеличении угла опережения α коэффициент пульсаций момента увеличивается. При этом наименьшие коэффициенты пульсаций момента достигаются при продолжительности импульса питающего напряжения 180 эл.град. (при фиксированном угле α).

Таким образом, при числе витков фазной катушки, равному 36, в рассматриваемом варианте достигим требуемый электромагнитный момент и существует «запас» по моменту. Приняв допущение о том, что установленный характер поведения зависимостей момента и коэффициента пульсаций сохранится после полного определения конфигурации магнитной системы и сопротивления катушки, принимаем данный вариант для дальнейшего исследования.

Проведя аналогичные расчёты для остальных варианта 2 и 3, установлено что для число витков фазной катушки для варианта 2 равно 34, а для варианта 3 32.

После определения числа витков необходимо окончательно определить геометрические размеры магнитопровода и по действующему значению тока скорректировать сечение проводника, после чего провести поверочный расчёт с целью определения КПД двигателя и привода.

Таким образом, определены параметры АИД для концептуального проекта скоростного электропоезда.

Окончательный выбор варианта тягового электропривода должен производиться с позиций наименьших эксплуатационных затрат, что эквивалентно наивысшей энергетической эффективности. При расчёте КПД инвертора принято, что в нём установлены IGBT-транзисторы 1MBI800UG-330 [18].

Расчёт проведём режима максимальной скорости движения как наиболее вероятного режима работы тягового электропривода. Результаты расчётов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчётов КПД привода

Параметр	Номер варианта		
	1	2	3
Количество витков фазной катушки w	36	34	32
Угол опережения включения транзистора α , эл.град	80	75	72
Продолжительность импульса β , эл.град	180	180	180
Электромагнитный момент двигателя $M_{эм}$, Нм	927,1	931,2	935,4
Коэффициент пульсаций момента $K_{пм}$, д.е.	0,61	0,57	0,52
Амплитудное значение фазного тока I_{max} , А	115,8	103,6	102,1
Действующее значение фазного тока $I_{эфф}$, А	63,7	59,1	57,2
Мощность на валу, кВт	92,7	93,1	93,5
КПД, д.е:			
– инвертора	0,978	0,968	0,976
– двигателя	0,948	0,943	0,941
– электропривода	0,921	0,912	0,918

Из табл. 3 видно, что по величине КПД наилучшим является вариант 1. Принимаем этот вариант для концептуального проекта скоростного электропоезда. В табл. 4 приведены расчёты тяговых характеристик.

Таким образом, синтезирован безредукторный тяговый электропривод на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного электроподвижного состава. Номинальный КПД равен 0,95 д.е., пусковой момент двигателя составляет 4020 Нм.

Выводы

На примере безредукторного тягового электропривода на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного электроподвижного состава апробирована методика проектирования, которая состоит из следующих этапов:

- определение мощности тягового электропривода и пускового момента двигателя;
- определение геометрических размеров и электромагнитных нагрузок реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком;
- определение обмоточных данных двигателя и уточнение геометрических размеров магнитной системы;

Таблица 4

Тяговые характеристики привода

Параметр	Частота вращения, об/мин		
	10	350	935
Угол опережения включения транзистора α , эл.град	0	0	80
Продолжительность импульса β , эл.град	180	180	180
Электромагнитный момент двигателя $M_{эм}$, Нм	4020	3872	927,1
Коэффициент пульсаций момента $K_{пм}$, д.е.	0,81	0,68	0,61
Амплитудное значение фазного тока I_{max} , А	423	250,6	115,8
Действующее значение фазного тока $I_{эфф}$, А	406,2	236,8	63,7
Мощность на валу, кВт	4,2	141,9	92,7
КПД, д.е.:			
– инвертора	0,249	0,967	0,971
– двигателя	0,212	0,917	0,948
– электропривода	0,05	0,887	0,921

– выбор наилучшего варианта и определение характеристик безредукторного тягового электропривода на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для этого варианта.

В итоге, синтезирован безредукторный тяговый электропривод на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного электроподвижного состава со следующими параметрами:

- мощность, приходящаяся на одну ось 92,7 кВт;
- пусковой момент двигателя 4020 Нм;
- номинальный момент двигателя 927 Нм;
- номинальная частота вращения 935 об/мин;
- номинальный КПД привода 0,921 д.е.;

Определены его тяговые характеристики.

Література

1. Корниенко В. В. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт [Текст] / В. В. Корниенко, В. И. Омеляненко – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 159 с.
2. Рябов Е.С. Реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – № 38. – С. 80–83.
3. Рябов Е.С. К вопросу определения электромагнитного момента реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком. / Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский, Д.Ю. Зюзин, В.Л. Емельянов // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №5. – С. 28–30.
4. Рябов Е.С. Математическая модель для определения электромагнитного момента реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2010. – № 39. – С. 108–116.
5. Любарский Б.Г. Синтез тягового реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного подвижного состава / Б.Г. Любарский, В.П. Северин, Е.С. Рябов В.Л., Емельянов // Електротехніка і електромеханіка.– 2010. – №6. – С. 28–30.
6. Любарский Б.Г. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова, В.Л. Емельянов // Електротехніка і електромеханіка.– 2009.– №5. – С. 67–72.
7. Рябов Е.С. Моделирование тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин, Д.Ю. Зюзин. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2010. – № 57. – С. 243–251.

8. Басов Г.Г. Разработка типажа современного моторвагонного подвижного состава для украинских железных дорог / Г.Г. Басов, К.П. Мищенко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2003. – №48. – С.90-91.
9. Басов Г. Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу. [Текст] / Г.Г Басов., С.І Яцько – Харків : «Апекс+», 2005. – 248с.
10. Басов Г.Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України: Монографія. / Г.Г. Басов, С.І. Яцько. // Ч. 1. – Харків: “Апекс+”, 2004. – 240 с.
11. Гуткин Л. В. Электропоезд ЭР200. [Текст] / Л. В. Гуткин, Ю. Н. Димант, И. А Иванов. – М. : «Транспорт», 1981. – 192 с.
12. Гетьман Г.К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта [Текст]: монография / Г.К. Гетьман. – Д.: Изд. Днепр. нац. ун-та ж/д трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.
13. Омеляненко В.И. К вопросу расчёта мощности тягового привода скоростного электропоезда / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов // Механіка та машинобудування. – 2010. – №1. – С. 125–128.
14. Лещёв А.И. Обзор законов управления для электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями / А.И. Лещёв, К.П. Солтус // Электровозостроение: сб. научн.тр / ОАО «Всерос. н.-и. и проектно-конструктр. ин-т электровозостроения» (ОАО «ВЭЛНИИ»). – Т.39 – Новочеркасск, 1998. – с.121-127.
15. Назаров О.Н. Типаж и технические требования к перспективному подвижному составу / О.Н. Назаров // Железнодорожный транспорт. – 2003. – №2. – С.12–18.
16. Корниенко В.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. (Аналитический обзор). Монография / В.В. Корниенко, А.В. Котельников, В.Т. Доманский – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.: ил.
17. Бочаров В.И. Тяговые электродвигатели электровозов / В.И Бочаров, В.И. Захаров, Л.Ф. Коломейцев и др. Под ред. В.Г. Щербакова. – Новочеркасск: Агенство Наутилус, 1998. – 672 с.: ил.
18. <http://www.igbt.ru>

**КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПРОЕКТ ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДА З
БЕЗРЕДУКТОРНИМ ПРИВОДОМ НА ОСНОВІ РЕАКТИВНОГО ІНДУКТОРНОГО
ДВИГУНА З АКСІАЛЬНИМ МАГНІТНИМ ПОТОКОМ**

Б. Г. Любарський, Є. С. Рябов, М. Л. Глебова

Наведений концептуальний проект швидкісного двохсистемного електропоїзда з безредукторним приводом на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком

**CONCEPTUAL PROJECT OF SPEED ELECTRIC TRAIN WITH DIRECT TRACTION
DRIVE BASED ON TRANSVERSE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR**

B. G. Lyubarsciy, E. S. Ryabov, M. L. Glebova

Resulted conceptual project of speed twosystem electric train with direct traction drive based on transverse switched reluctance motor.