

ЛУКОВ Н. М., РОМАШКОВА О.Н, КОСМОДАМИАНСКИЙ А. С.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА ЛОКОМОТИВА С МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ И ПОЛЮСОПЕРЕКЛЮЧАЕМЫМИ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С КОРОТКО ЗАМКНУТЫМИ РОТОРАМИ

Рассматриваются свойства и характеристики электрической передачи мощности локомотива переменного тока, содержащей тяговый синхронный генератор и полюсопереключаемые тяговые асинхронные электродвигатели с коротко замкнутыми роторами. Показано, что локомотив с такой передачей мощности обладает тяговыми свойствами, близкими к тяговым свойствам локомотива с передачей мощности, содержащей тяговый синхронный генератор, тяговые статические преобразователи частоты и обычные тяговые асинхронные электродвигатели с коротко замкнутыми роторами.

Обмотка статора принятого для предлагаемой передачи мощности асинхронного тягового двигателя выполнена из 24 катушечных групп с выводами. Коммутационные аппараты (коммутаторы) соединяют катушечные группы так, что они образуют на расточке статора асинхронного тягового двигателя фазные зоны с целым числом катушек на зону. При подаче трехфазного напряжения на входные зажимы А, В и С обмотки последняя создает в воздушном зазоре магнитное поле, первая пространственная гармоника которого вращается в одном и том же направлении с частотой вращения, зависящей от числа пар полюсов. В зависимости от положения переключателей (коммутаторов) частота вращения поля (при частоте питающего напряжения 50 Гц) равна 375 об/мин при включении на 8 пар полюсов, 750 об/мин - при включении на 4 пары полюсов, 1500 об/мин - при включении на 2 пары полюсов и 3000 об/мин - при включении на одну пару полюсов. Трехфазная полюсопереключаемая обмотка на четыре числа пар полюсов двухслойная (трехзонная) соединенная в звезду с одной параллельной ветвью в каждой фазе при всех числах пар полюсов, состоящая из одинаковых равномерно распределенных катушек, входящих в катушечные группы по S рядом лежащих последовательно согласно расположению включенных катушек ($S = 1, 2, 3...$). Обмотка состоит из 24 катушечных групп, разделенных на 24 одинаковые части с номерами А1 ÷ А8, В1 ÷ В8, С1 ÷ С8 так, что катушечные группы с номерами 1, 10, 4, 19, 7, 16, 22, 13 включены в части А1, А2, А3, А4, А5, А6, А7, А8 соответственно. Катушечные группы с номерами 17, 2, 20, 11, 23, 8, 14, 5 включены в части В1, В2, В3, В4, В5, В6, В7, В8 соответственно. Катушечные группы с номерами 9, 18, 12, 3, 15, 24, 6, 21 включены в части С1, С2, С3, С4, С5, С6, С7, С8 соответственно. Части обмотки соединены с 16 переключателями, из них первые два переключателя П1В и П1Н двухфазные, остальные четырнадцать переключателей П2В ÷ П8В, П2Н ÷ П8Н - трехфазные [1].

В предлагаемой электрической передаче мощности переменного тока тягового транспортного средства с микропроцессорной системой управления функции переключателей выполняют тиристорные коммутаторы, что является отличительной особенностью предлагаемой передачи и повышает её надежность и уменьшает массу передачи. Это

также делает возможным использовать в тиристорных коммутаторах в качестве управляющего ключа (контакта) слабомощные переключатели, в частности, магнитоуправляемые герконовые управляющие контакты (герконы), имеющие повышенную надежность, долговечность и число безотказных срабатываний. Использование предлагаемого коммутатора позволяет увеличить число безотказных срабатываний с $10^4 \div 10^5$ до $10^6 \div 10^7$ [2].

Предлагаемая электрическая передача построена следующим образом (рис. 1). Принципиальная схема электрической передачи маневрового тепловоза с полюсопереключаемыми тяговыми электрическими машинами). Вал теплового двигателя 1 соединен с валом трехфазного синхронного тягового генератора 2. Тепловой двигатель и синхронный тяговый генератор образуют энергетическую установку, к которой посредством тиристорных коммутаторов 3, подключаются статорные обмотки многоскоростного асинхронного тягового двигателя 4 с короткозамкнутым ротором.

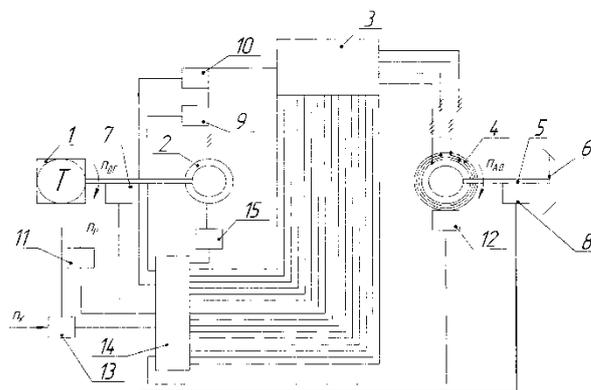


Рис. 1. Принципиальная схема электрической передачи маневрового тепловоза с полюсопереключаемыми тяговыми электрическими машинами

Вал асинхронного тягового двигателя соединен с осью 5 движущей колесной пары 6. Частота вращения вала энергетической установки $n_{дг}$ измеряется датчиком 7, а частота вращения вала асинхронного тягового двигателя 4 $n_{дд}$ измеряется датчиком 8. Напряжение синхронного тягового

генератора 2 U и его ток I измеряются соответственно датчиками 9 и 10, перемещение h_r элементов (реек топливных насосов) органов топливоподдачи теплового двигателя измеряется датчиком 11. Магнитный поток Φ асинхронного тягового двигателя измеряется датчиком 12. На рис. 2. позиции 13 соответствует орган управления тяговым транспортным средством. Датчики 7, 8, 9, 10, 11, 12 и орган управления 13 тяговым транспортным средством связаны с тепловым двигателем 1 и микропроцессорным контроллером 14. Микропроцессорный контроллер 14 подключен также к блоку тиристорных коммутаторов 3 и к возбудителю 15 синхронного тягового генератора 2.

Тиристорный коммутатор (рис. 2) содержит девять диодов 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 и 24, три силовых тиристора 25, 26, 27 и три силовых диода 28, 29, 30, стабилитрон 31, три резистора 32, 33 и 34 и управляющий ключ 35. В исходном состоянии управляющий ключ 35 замкнут.

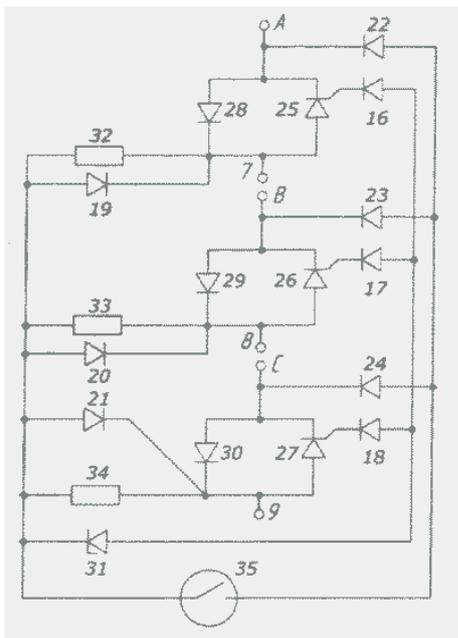


Рис. 2. Принципиальная схема трехфазного тиристорного коммутатора [2]

При размыкании управляющего ключа 35 коммутатор включается. Для отключения коммутатора управляющий ключ 20 замыкается. При этом управляющие переходы силовых тиристоров 25, 26 и 27 через диоды 22, 23 и 24 шунтируются, что приводит к их закрытию и отключению нагрузки от питающей сети. Управляющие ключи коммутаторов замыкаются и размыкаются под действием выходных сигналов микропроцессорного контроллера 14, подключенного к тиристорным коммутаторам, функции управляющих ключей в которых выполняют герконовые элементы. Микропроцессорный контроллер 14 подключён также к возбудителю синхронного тягового генератора.

При включенных датчиках 7÷12 микропроцессорный контроллер 14 в соответствии с заложенной программой обеспечивает включение и выключение соответствующего числа пар полюсов асинхронного тягового двигателя в зависимости от сигналов P_k и $n_{ад}$. При этом переключения катушечных групп статорной обмотки асинхронного тягового двигателя производятся в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

Алгоритмы срабатывания переключателей и переключения катушечных групп статорной обмотки асинхронного тягового двигателя

P	$P1B$	$P1H$	$P2B$	$P2H$	$P3B$	$P3H$	$P4B$	$P4H$	$P5B$	$P5H$	$P6B$	$P6H$	$P7B$	$P7H$	$P8B$	$P8H$
8	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
4	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+

В таблице 1 знак «+» означает включенное состояние коммутатора, а знак «-» означает выключенное состояние коммутатора.

Как видно из таблицы 1 для включения катушечных групп с $p_1 = 8$ включаются переключатели $P1B \div P8B$. Для перевода двигателя с первой ступени частоты вращения ($p_1 = 8$) на вторую ступень частоты вращения ($p_2 = 4$) выключаются переключатели $P5B \div P8B$ и включаются переключатели $P1H, P5H \div P8H$; для перевода двигателя со второй ступени частоты вращения на третью ступень частоты вращения ($p_3 = 2$) включаются переключатели $P1B, P3B$ и включаются переключатели $P2H, P4H \div P8H$; а для перевода двигателя с третьей ступени частоты вращения на четвертую ступень частоты вращения ($p_4 = 1$) включаются переключатели $P1H \div P8H$.

На рис. 3 представлена принципиальная схема системы управления асинхронным тяговым двигателем путем переключения полюсов посредством коммутаторов $P1B \div P8B$ и $P1H \div P8H$.

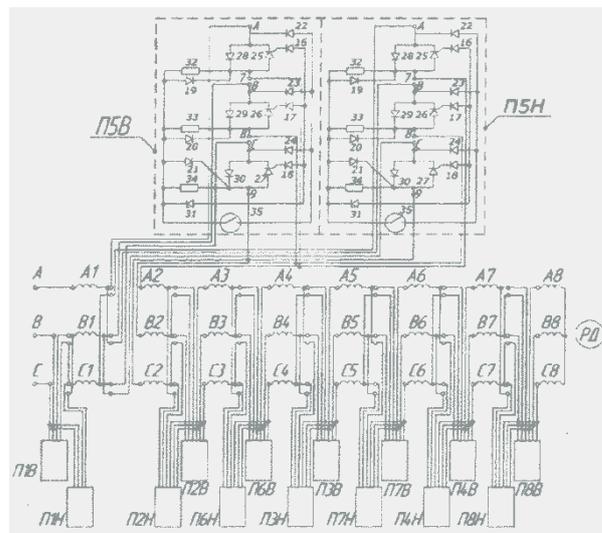


Рис. 3. Принципиальная схема системы управления асинхронным тяговым двигателем путем переключения полюсов посредством коммутаторов $P1B \div P8B$ и $P1H \div P8H$

Для образования требуемого числа пар полюсов асинхронного тягового двигателя катушечные группы его статорной обмотки соединяются последовательно в каждой фазе, в порядке, зависящем от числа пар полюсов. Это представлено в таблице 2.

Как изменяется частота вращения вала асинхронного тягового двигателя $n_{ад}$ при изменении положения рукоятки контроллера машиниста P_k и числа пар полюсов p видно из таблицы 3. При $p_1 = 8$ максимальное значение синхронной частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя $n_{ад} = 375$ об/мин достигается при $P_k = XV$. Дальнейшее увеличение синхронной частоты вращения вала асинхронного тягового

двигателя $n_{ад}$ до 750 об/мин может быть достигнуто путем отключения его от синхронного тягового генератора, перевода энергетической установки на $Пк = VI$, подключения асинхронного тягового двигателя к синхронному тяговому генератору при $p_2 = 4$ и увеличения $Пк$ до XV. Дальнейшее увеличение синхронной частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя $n_{ад}$ до 1500 об/мин может быть достигнуто путем отключения его от синхронного тягового генератора, перевода энергетической установки на $Пк = VI$, подключения асинхронного тягового двигателя к синхронному тяговому генератору при $p_3 = 2$ и увеличения $Пк$ до XV. Дальнейшее увеличение синхронной частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя $n_{ад}$ до максимального значения 3000 об/мин может быть достигнуто путем отключения его от синхронного тягового генератора, перевода энергетической установки на $Пк = VI$, подключения асинхронного тягового двигателя к синхронному тяговому генератору при $p_4 = 1$ и увеличения $Пк$ до XV. Относительная мощность синхронного тягового генератора $P_{Г0}$ изменяется примерно пропорционально частоте вращения вала энергетической установки $n_{дг}$, и в электрической передаче мощности переменного тока передаче поддерживается автоматической системой регулирования частоты вращения вала и мощности энергетической установки на уровне, определяемом частотой вращения вала асинхронного тягового двигателя $n_{ад}$ [3].

Таблица 2

Последовательность включения катушечных групп в фазах

Число пар полюсов, p	Фазы обмотки	Последовательность включения катушечных групп в фазе
8	A	1-10-4-19-7-16-22-13
	B	17-2-20-11-23-8-14-5
	C	9-18-12-3-15-24-6-21
4	A	1-2-20-19-7-8-14-13
	B	17-18-12-11-23-24-6-5
	C	9-10-4-3-15-16-22-21
2	A	1-2-4-3-15-16-14-13
	B	17-18-20-19-7-8-6-5
	C	9-10-12-11-23-24-22-21
1	A	1-2-4-3-7-8-6-5
	B	17-18-20-19-23-24-22-21
	C	9-10-12-11-15-16-14-13

В электрической передаче мощности переменного тока тягового транспортного средства с микропроцессорной системой управления, в отличие от известных передач мощности, переключение числа пар полюсов асинхронного тягового двигателя с короткозамкнутым ротором осуществляется при положениях рукоятки контроллера машиниста $Пк$: I, VI и XV. Подключение асинхронного тягового двигателя к трехфазному синхронному тяговому генератору осуществляется на $Пк = I$ при $p_1 = 8$, в результате чего за счет уменьшения скольжения s асинхронного тягового двигателя асинхронная частота вращения его вала $n_{ад}$ увеличивается от нуля до частоты, близкой к 112,5 об/мин. При этом происходит разгон тягового транспортного средства.

При любом $Пк$ автоматическое поддержание заданной частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя, то есть скорости движения тягового транспортного средства, в электрической передаче мощности переменного тока осуществляется за счет действия замкнутой автоматической системы регулирования частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя. Механические характеристики асинхронного тягового двигателя (крайние) в замкнутой

автоматической системе регулирования частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя располагаются в зоне между двумя крайними характеристиками a_6 и b_6 в разомкнутой системе (рис. 4). Характеристики: a_6, b_6 – момент сопротивления нагрузки; $6_6, z_6$ – механические асинхронного тягового двигателя при номинальном $U_{ном}$ и минимальном $U_{мин}$ напряжении соответственно; d_6 – статическая замкнутой автоматической системы регулирования частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя. Характеристика a_6 подобна части характеристики сопротивления движению тягового транспортного средства при малых скоростях движения.

Таблица 3

Изменение частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя $n_{ад}$ при изменении положения рукоятки контроллера машиниста $Пк$ и числа пар полюсов p

$Пк = I$ $f_1 = 15$	$p = 8$ $n_{ад} = 112,5$	$p = 4$ $n_{ад} = 225$	$p = 2$ $n_{ад} = 450$	$p = 1$ $n_{ад} = 900$
$Пк = II$ $f_1 = 17,5$	$p = 8$ $n_{ад} = 131,2$	$p = 4$ $n_{ад} = 262,4$	$p = 2$ $n_{ад} = 525$	$p = 1$ $n_{ад} = 1050$
$Пк = III$ $f_1 = 20$	$p = 8$ $n_{ад} = 150$	$p = 4$ $n_{ад} = 300$	$p = 2$ $n_{ад} = 600$	$p = 1$ $n_{ад} = 1200$
$Пк = IV$ $f_1 = 22,5$	$p = 8$ $n_{ад} = 168,8$	$p = 4$ $n_{ад} = 337,6$	$p = 2$ $n_{ад} = 675$	$p = 1$ $n_{ад} = 1350$
$Пк = V$ $f_1 = 25$	$p = 8$ $n_{ад} = 187,5$	$p = 4$ $n_{ад} = 375$	$p = 2$ $n_{ад} = 750$	$p = 1$ $n_{ад} = 1500$
$Пк = VI$ $f_1 = 27,5$	$p = 8$ $n_{ад} = 206,2$	$p = 4$ $n_{ад} = 412,5$	$p = 2$ $n_{ад} = 825$	$p = 1$ $n_{ад} = 1650$
$Пк = VII$ $f_1 = 30$	$p = 8$ $n_{ад} = 225$	$p = 4$ $n_{ад} = 450$	$p = 2$ $n_{ад} = 900$	$p = 1$ $n_{ад} = 1800$
$Пк = VIII$ $f_1 = 32,5$	$p = 8$ $n_{ад} = 243,8$	$p = 4$ $n_{ад} = 487,5$	$p = 2$ $n_{ад} = 975$	$p = 1$ $n_{ад} = 1950$
$Пк = IX$ $f_1 = 35$	$p = 8$ $n_{ад} = 262,5$	$p = 4$ $n_{ад} = 525$	$p = 2$ $n_{ад} = 1050$	$p = 1$ $n_{ад} = 2100$
$Пк = X$ $f_1 = 37,5$	$p = 8$ $n_{ад} = 281,2$	$p = 4$ $n_{ад} = 562,5$	$p = 2$ $n_{ад} = 1125$	$p = 1$ $n_{ад} = 2250$
$Пк = XI$ $f_1 = 40$	$p = 8$ $n_{ад} = 300$	$p = 4$ $n_{ад} = 600$	$p = 2$ $n_{ад} = 1200$	$p = 1$ $n_{ад} = 2400$
$Пк = XII$ $f_1 = 42,5$	$p = 8$ $n_{ад} = 318,8$	$p = 4$ $n_{ад} = 636,5$	$p = 2$ $n_{ад} = 1275$	$p = 1$ $n_{ад} = 2550$
$Пк = XIII$ $f_1 = 45$	$p = 8$ $n_{ад} = 337,5$	$p = 4$ $n_{ад} = 675$	$p = 2$ $n_{ад} = 1350$	$p = 1$ $n_{ад} = 2700$
$Пк = XIV$ $f_1 = 47,5$	$p = 8$ $n_{ад} = 356,2$	$p = 4$ $n_{ад} = 712,5$	$p = 2$ $n_{ад} = 1425$	$p = 1$ $n_{ад} = 2850$
$Пк = XV$ $f_1 = 50$	$p = 8$ $n_{ад} = 375$	$p = 4$ $n_{ад} = 750$	$p = 2$ $n_{ад} = 1500$	$p = 1$ $n_{ад} = 3000$

Характеристика b_6 подобна части характеристики сопротивления тягового транспортного средства при малых скоростях движения, а характеристика d_6 подобна части тяговой характеристики тягового транспортного средства в диапазоне частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя от $n_{ад1}$ до $n_{ад2}$. В замкнутой автоматической системе регулирования частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя он может работать на неустойчивой части его естественной механической характеристики. При этом обеспечивается плавное регулирование частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя в сравнительно широком диапазоне (в нашем случае в диапазоне 900 ÷ 1500 об/мин) [4].

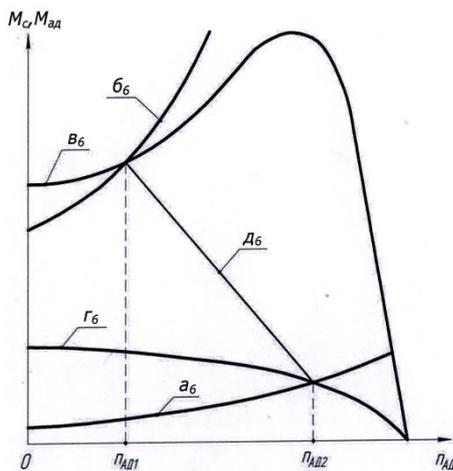


Рис. 4. Характеристики: a_6, b_6 – момент сопротивления нагрузки; v_6, z_6 – механические асинхронного тягового двигателя при номинальном $U_{ном}$ и минимальном $U_{мин}$ напряжении соответственно; d_6 – статическая замкнутой автоматической системы регулирования частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя

Как при переключениях обмоток асинхронного тягового двигателя изменяется частота напряжения синхронного тягового генератора f_1 , синхронная частота вращения вала асинхронного тягового двигателя $\omega_{ад}$, подводимая к нему мощность $P_{ад}$, вращающий момент $M_{ад}$, показано в таблице 4. Для разгона тягового транспортного средства рукоятка контроллера машиниста устанавливается в положение $P_k = 1$.

Таблица 4

Изменение частоты напряжения синхронного тягового генератора f_1 , синхронной частоты вращения вала асинхронного тягового двигателя $\omega_{ад}$, подводимой к нему мощности $P_{ад}$, вращающего момента $M_{ад}$ на валу асинхронного тягового двигателя при переключениях обмоток асинхронного тягового двигателя

Пк	$n_{п,об}$ мин	f_1 Гц	К	р	$n_{ад,об}$ мин	$P_{ад}$ кВт	$M_{ад}$ Нм
I	300	15	ПВ-ПВВ	8	112,5	75	6367
II	350	17,5	ПВ-ПВВ	8	131,2	79	6805
III	400	20	ПВ-ПВВ	8	150	83	7250
IV	450	22,5	ПВ-ПВВ	8	168,8	87	4583
V	500	25	ПВ-ПВВ	8	187,5	91	4127
VI	550	27,5	ПВ-ПВВ	8	206,2	95	3997
VII	600	30	ПВ-ПВВ	8	225	99	3958
VIII	650	32,5	ПВ-ПВВ	8	243,8	103	3918
IX	700	35	ПВ-ПВВ	8	262,5	107	3877
X	750	37,5	ПВ-ПВВ	8	281,2	111	3836
XI	800	40	ПВ-ПВВ	8	300	115	3794
XII	850	42,5	ПВ-ПВВ	8	318,8	119	3752
XIII	900	45	ПВ-ПВВ	8	337,5	123	3710
XIV	950	47,5	ПВ-ПВВ	8	356,2	127	3668
XV	1000	50	ПВ-ПВВ	8	375	131	3625
VI	550	27,5	ПН-ПВВ-ПВН-ПВН	4	412,5	107	2977
VII	600	30	ПН-ПВВ-ПВН-ПВН	4	450	111	2936
VIII	650	32,5	ПН-ПВВ-ПВН-ПВН	4	487,5	115	2894
IX	700	35	ПН-ПВВ-ПВН-ПВН	4	525	119	2852
X	750	37,5	ПН-ПВВ-ПВН-ПВН	4	562,5	123	2810
XI	800	40	ПН-ПВВ-ПВН-ПВН	4	600	127	2768
XII	850	42,5	ПН-ПВВ-ПВН-ПВН	4	637,5	131	2725
XIII	900	45	ПН-ПВВ-ПВН-ПВН	4	675	135	2683
XIV	950	47,5	ПН-ПВВ-ПВН-ПВН	4	712,5	139	2640
XV	1000	50	ПН-ПВВ-ПВН-ПВН	4	750	143	2598
VI	550	27,5	ПВ-ПВВ-ПН-ПВН	2	82,5	151	1748
VII	600	30	ПВ-ПВВ-ПН-ПВН	2	900	159	1897
VIII	650	32,5	ПВ-ПВВ-ПН-ПВН	2	975	167	1856
IX	700	35	ПВ-ПВВ-ПН-ПВН	2	1050	175	1814
X	750	37,5	ПВ-ПВВ-ПН-ПВН	2	1125	183	1772
XI	800	40	ПВ-ПВВ-ПН-ПВН	2	1200	191	1730
XII	850	42,5	ПВ-ПВВ-ПН-ПВН	2	1275	199	1688
XIII	900	45	ПВ-ПВВ-ПН-ПВН	2	1350	207	1645
XIV	950	47,5	ПВ-ПВВ-ПН-ПВН	2	1425	215	1603
XV	1000	50	ПВ-ПВВ-ПН-ПВН	2	1500	223	1560
VI	550	27,5	ПН-ПВН	1	1820	239	1583
VII	600	30	ПН-ПВН	1	1800	255	1553
VIII	650	32,5	ПН-ПВН	1	1820	271	1523
IX	700	35	ПН-ПВН	1	1800	287	1493
X	750	37,5	ПН-ПВН	1	1820	303	1463
XI	800	40	ПН-ПВН	1	1800	319	1433
XII	850	42,5	ПН-ПВН	1	1820	335	1403
XIII	900	45	ПН-ПВН	1	1800	351	1373
XIV	950	47,5	ПН-ПВН	1	1820	367	1343
XV	1000	50	ПН-ПВН	1	1800	383	1313

Из таблицы 4 видно, что при $p_1 = 8$, при $P_k = 1$ и при $f_1 = 15$ Гц синхронная частота вращения вала асинхронного тягового двигателя $\omega_{ад}$ увеличивается незначительно, всего на 0,0375 от номинального значения. При последующих

изменениях $P_{кот}$ I до XV и f_1 до 50 Гц $\omega_{ад}$ изменяется при смене P_k на единицу каждый раз на 0,062 от номинального значения. При этом фактически реализуется частотное управление асинхронным тяговым двигателем путем ступенчатого изменения частоты питающего напряжения $f_{1от}$ 15 до 50 Гц. Ступени частоты небольшие $\Delta f_1 = 2,5$ Гц (то есть, равны 5% от номинального значения). Однако, в случае применения на тяговом транспортном средстве бесступенчатого контроллера машиниста (орган управления) частота питающего напряжения $f_{1так}$ же будет меняться бесступенчато [5]

Переключение полюсов асинхронного тягового двигателя в предлагаемой электрической передаче не приводит в процессе переключения к броскам тока и вращающего момента на валу в начале и конце такого переключения. Бесконтактная коммутационная аппаратура имеет небольшой вес и высокую надежность. Частота вращения вала энергетической установки изменяется не в полном диапазоне при каждом переключении числа полюсов полюспереключаемых обмоток асинхронного тягового двигателя, а в два раза меньшем диапазоне. То есть при этом энергетическая установка в два раза меньше времени работает при переходных процессах. Это повышает среднее эксплуатационное к.п.д. энергетической установки, повышает ее долговечность и надежность. Время переходного процесса в автоматической системе регулирования частоты вращения вала энергетической установки на 2 порядка меньше, чем постоянная времени поезда, характеризующая его инерционность, поэтому переключение обмоток асинхронного тягового двигателя практически не влияет на тяговые свойства тягового транспортного средства с предлагаемой передачей. Предлагаемая электрическая передача мощности отличается от известных более высоким к.п.д. и меньшей стоимостью, так как не содержит между синхронным тяговым генератором и асинхронным тяговым двигателем никаких преобразователей энергии (выпрямителей и инверторов) [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Д.А., Попов С.Д. Трехфазная полюспереключаемая обмотка. Патент РФ № 2014711.
2. Федоров Г.В. Тиристорный коммутатор. Патент РФ № 2262188. Опубл. 2005.10.10.
3. Луков Н.М. Автоматизация тепловозов, газотурбовозов и дизель-поездов. – М.: Машиностроение, 1988.
4. Луков Н.М. Основы автоматики и автоматизации тепловозов. – М.: Транспорт, 1989.
5. Луков Н.М., Ромашкова О.Н., Космодамианский А.С., Сомотканов А.В., Попов Ю.В., Стрекалов Н.Н., Николаев Е.В., Воробьев В.И., Новиков В.Г., Пугачев А.А. Электрическая передача мощности переменного тока тягового транспортного средства с микропроцессорной системой управления. Патент РФ № 2 554 911. Опубл. 2015.06.27. Бюл. 18.

Луков Н. М., д. т. н., профессор, академик Академии транспорта России и Транспортной Академии Украины, Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС), ул. Образцова, 9, стр. 9, Москва, 127994, Россия; nm-57@yandex.ru

Ромашкова О.Н., д. т. н., профессор, Московский государственный педагогический университет, ул. Малая Пироговская, 1, стр. 1, 119991, Москва, Россия; ox-gom@yandex.ru

Космодамианский А. С., д. т. н., профессор, академик Академии электротехнических наук Российской Федерации, Российская открытая академия транспорта МГУПС, ул. Образцова, 9, 127994, Москва, Россия