

УДК 629.114

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗОЧНОГО
УСТРОЙСТВА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАКТОРА
С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ**

**DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE LOAD DEVICE
OF THE PHYSICAL MODEL OF A TRACTOR
WITH AN ELECTROMECHANICAL POWER TRAIN**

Жданович Ч. И.¹, канд. техн. наук, доц.,

Калинин Н. В.², ст. науч. сотр.,

¹Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Ch. Zhdanovich¹, Ph.D. in Eng., Ass. Prof.,
N. Kalinin², Senior Researcher,

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Предложена методика определения параметров нагрузочного устройства, предполагаемого для использования в составе физической модели электромеханической трансмиссии трактора и включающего в себя коллекторную машину постоянного тока с независимым возбуждением.

A method is proposed for determining the parameters of a load device intended for use as part of a physical model of an electromechanical power train of a tractor and including the separately excited DC commutator machine.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, генератор постоянного тока, коробка передач, момент, магнитный поток, передаточное отношение, сопротивление, ток, частота вращения, ЭДС.

Keywords: *amperage, DC generator, EMF, gearbox, gear ratio, induction motor, magnetic flux, resistance, rotational speed, torque.*

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] предложена физическая модель электромеханической трансмиссии трактора BELARUS 3023, содержащая: физическую модель тягового асинхронного электродвигателя (МТАД), тягового асинхронного генератора, ДВС. Для МТАД необходимо нагрузочное устройство (НУ), создающее требуемый момент сопротивления на валу ТАД. Возьмем в качестве НУ коллекторную машину постоянного тока 4ПБМ160МГ04 мощностью 8 кВт с независимым возбуждением [2], работающую в генераторном режиме (далее будем называть ее ГПТ – генератор постоянного тока). В состав НУ также входит регулируемое сопротивление нагрузки $R_{ц}$ (рис. 1), от значения которого зависит момент на валу ГПТ $M_{ГП}$, и могут входить звенья, обеспечивающие передаточное отношение между валом МТАД и ГПТ, поскольку МТАД должен работать в широком диапазоне частот f_1 напряжения (а значит, и частота вращения ротора МТАД также будет изменяться в широких пределах). Определим, можно ли соединить валы ГПТ и МТАД напрямую или потребуются редуктор или даже коробка передач, а также ориентировочно определим диапазон значений сопротивлений в цепи нагрузки $R_{ц}$.

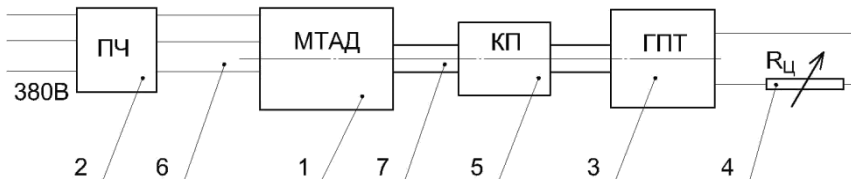


Рисунок 1 – Физическая модель электромеханической трансмиссии трактора (упрощенная):

- 1 – асинхронный электродвигатель; 2 – преобразователь частоты;
- 3 – электрическая машина постоянного тока; 4 – изменяемое сопротивление нагрузки; 5 – коробка (коробки) передач; 6 – измерение электрических параметров;
- 7 – измерение момента и оборотов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА

Момент $M_{ГП}$ на валу ГПТ должен быть таким, чтобы обеспечить требуемое значение момента на валу МТАД – $M_{МТАД}$.

Момент $M_{ГП}$ на валу ГПТ с учетом передаточного отношения u_p редуктора или включённой передачи коробки передач:

$$M_{ГП} = M_{МГАД} \cdot u_p \cdot \eta_p, \quad (1)$$

где η_p – КПД редуктора или коробки передач.

Электромагнитный момент генератора [3, с.378, (28.3)]:

$$M_{эм,ГП} = M_{ГП} - M_0, \quad (2)$$

где M_0 – момент на валу генератора при работе на холостом ходу;

$M_{ГП}$ – момент на валу генератора.

Таким образом, требуемый электромагнитный момент генератора:

$$M_{эм,ГП} = M_{МГАД} \cdot u_p \cdot \eta_p - M_0 \quad (3)$$

Из формул [3, с. 345, (25.27)] и [3, с. 345, (25.26)] получим формулу для определения тока статора при известном электромагнитном моменте $M_{эм,ГП}$:

$$I_{а,ГП} = \frac{M_{эм,ГП} \cdot \pi}{30 \cdot c \cdot \Phi} = \frac{M_{эм,ГП}}{9,55 \cdot c \cdot \Phi}. \quad (4)$$

Та же формула получится и по [4, с.411].

ЭДС электрической машины определяется по формуле [4, с.410, (10.4)]:

$$E_{ГП} = c \cdot \Phi \cdot n_{ГП}, \quad (5)$$

где $n_{ГП}$ – частота вращения вала машины, об/мин;

Φ – магнитный поток, Вб;

c – конструктивная постоянная [4, с.410].

Напряжение генератора [3, с.377, (28.1)], [4, с. 440, (10.34)]:

$$U_{ГП} = E_{ГП} - I_{а,ГП} \sum r, \quad (6)$$

где $\sum r$ – сумма сопротивлений всех участков цепи якоря.

Требуемое сопротивление нагрузки:

$$R_{Ц} = \frac{U_{ГП}}{I_{а,ГП}} = \frac{E_{ГП}}{I_{а,ГП}} - \sum r ,$$

$$R_{Ц} = \frac{9,55 \cdot (c \cdot \Phi)^2 \cdot n_{ГП}}{M_{эм,ГП}} - \sum r = \frac{30 \cdot (c \cdot \Phi)^2 \cdot n_{ГП}}{M_{эм,ГП} \cdot \pi} - \sum r \quad (7)$$

Частота вращения $n_{ГП}$ определяется частотой вращения ротора МТАД $n_{2,МТАД}$:

$$n_{ГП} = n_{2,МТАД} / u_p \quad (8)$$

Для расчета по формулам (2–7) необходимо знать M_0 и $\sum r$, а также значения c и Φ либо их произведение.

$M_{МТАД}$ и $n_{2,МТАД}$ определяются для МТАД по зависимостям [5, 6], согласно методике [7]

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА

1. Определяем номинальное скольжение s_n , если оно не задано. Берем диапазон частот f_1 напряжения для МТАД. Выбираем значения частот $f_{1,i}$ из этого диапазона, для которых будем проводить расчет. Определяем законы частотного регулирования (см. [7]).

2. Для каждого выбранного значения $f_{1,i}$ по [5, 6, 7] определяем: задаваемое ПЧ напряжение для МТАД, критическое скольжение МТАД $s_{кр(f),i}$, $n_{2,МТАД}$ и $M_{МТАД}$ при номинальном скольжении МТАД s_n , $n_{2,МТАД}$ и $M_{МТАД}$ при $s_{кр(f),i}$.

3. Для полученных значений моментов и частот вращения МТАД для всех значений u_p определяем по (8) частоту вращения вала ГПТ $n_{ГП}$, по (1) определяем $M_{ГП}$, по (2) определяем $M_{эм,ГП}$.

4. Для полученных значений $M_{эм,ГП}$ и $n_{ГП}$ определяем: $I_{а,ГП}$ по (4), $E_{ГП}$ по (5), $U_{ГП}$ по (6), $R_{Ц}$ по (7).

РАСЧЕТ

Примем некоторые допущения: пренебрегаем M_0 и $\sum r$, принимаем $U_{ГП} \approx E_{ГП}$ и $M_{эм,ГП} \approx M_{ГП}$. Формула (1) для определения $M_{эм,ГП}$ с учетом допущений:

$$M_{\text{эм,ГП}} \approx M_{\text{МТАД}} \cdot u_p \cdot \eta_p \quad (9)$$

Формула (7) для определения $R_{\text{Ц}}$ с учетом допущений:

$$R_{\text{Ц}} \approx \frac{9,55 \cdot (c \cdot \Phi)^2 \cdot n_{\text{ГП}}}{M_{\text{эм,ГП}}} = \frac{30 \cdot (c \cdot \Phi)^2 \cdot n_{\text{ГП}}}{M_{\text{эм,ГП}} \cdot \pi} \quad (10)$$

Расчет будем вести без ослабления возбуждения, то есть при номинальном магнитном потоке Φ_n независимой обмотки возбуждения ГПТ.

Определим $c \cdot \Phi_n$ по данным для электрической машины 4ПБМ160МГ04 при работе в режиме двигателя. Формула (5) также справедлива и для работы машины в двигательном режиме [4, с.457, (10.44)], откуда:

$$c \cdot \Phi = E_{\text{ГП}} / n_{\text{ГП}} \cdot \quad (11)$$

Если в формулу (11) подставить номинальное значение частоты вращения $n_{\text{ГП(н)}}$, номинальное значение ЭДС $E_{\text{ГП(н)}}$, то и магнитный поток Φ будет равен своему номинальному значению Φ_n :

$$c \cdot \Phi_n = E_{\text{ГП,н}} / n_{\text{ГП(н)}} \quad (12)$$

Для электрической машины 4ПБМ160МГ04 при работе в двигательном режиме номинальное напряжение: $U_{\text{ГП(д),н}}=220$ В, номинальная частота вращения: $n_{\text{ГП(н)}} = 3070$ об/мин, напряжение на независимой обмотке возбуждения – 110 В; при этих параметрах будет $c \cdot \Phi = c \cdot \Phi_n$. Приняв $E_{\text{ГП,н}} \approx U_{\text{ГП(д),н}}$, получим по (12) $c \cdot \Phi_n \approx 0,07166$.

Возьмем в качестве МТАД асинхронный двигатель на 2,2 кВт с синхронной частотой вращения $n_{1,\text{МТАД(н)}} = 1000$ об/мин при частоте напряжения 50 Гц с тремя парами полюсов, аналогичный АИР100L6 [8]. Для него номинальная частота вращения ротора по каталогу: $n_{2,\text{МТАД(н)}} = 940$. Зная $n_{1,\text{МТАД(н)}}$ и $n_{2,\text{МТАД(н)}}$, определим но-

минальное скольжение s_n по [3, с. 137, (10.1)]. Параметры схемы Т-образной замещения определим расчетным путем, руководствуясь источниками [9, 10].

Диапазон частот f_1 берем от 5 до 180 Гц. Номинальная частота для двигателя АИР100L6 – 50 Гц, поэтому принимаем $f_{1,n} = 50$ Гц. Методика [7] также требует выбрать частоту $f_{1,lim}$. Примем $f_{1,lim} = 44$ Гц. Расчет $s_{кр(f)}$, $M_{МТАД}$ и $n_{2,МТАД}$ при s_n и $s_{кр(f)}$ выполним по методике [5–7]. Для полученных значений $M_{МТАД}$ и $n_{2,МТАД}$ при s_n и $s_{кр(f)}$ выполним расчет $n_{ГП}$ по (8), $M_{эм,ГП}$ по (9), $E_{ГП}$ по (5), $I_{а,ГП}$ по (4), $R_{ГП}$ по (10).

Расчет выполняем для всех u_p коробки передач ЗиЛ 130, 131, 5301 [11, 12], включенной на повышение оборотов (выходной вал коробки соединен с валом МТАД, входной вал – с валом ГПТ), кроме передачи заднего хода.

Результаты расчета $n_{ГП}$, $E_{ГП}$, $I_{а,ГП}$ для определенных значений f_1 представим: в табл. 1 – для $s_{кр(f)}$ (предельный режим), в табл. 2 – для s_n (номинальный режим работы МТАД). Поскольку расчетное значение критического скольжения для МТАД мощностью 2,2–4 кВт может быть достаточно большим [1], значения $n_{2,МТАД}$ для одной и той же частоты f_1 могут сильно различаться для s_n и $s_{кр(f)}$.

По паспортным данным, номинальный ток $I_{а,ГП}$ двигателя 4ПБМ160МГ04: $I_{а,ГП,n} = 39,7$ А, напряжение: 220 В, максимальная частота вращения – 4000 об/мин. Согласно [4, с. 457, (10.43)], ЭДС коллекторной машины постоянного тока при работе в режиме двигателя будет немного меньше напряжения. Примем допустимое значение ЭДС в генераторном режиме равным напряжению в режиме двигателя, то есть 220 В.

В табл. 1, 2 подчеркнем волнистой линией значения ЭДС, превышающие 220 В, и подчеркнем прямой линией значения тока, превышающие номинальные. Зачеркнем значения $n_{ГП} > 4000$ об/мин. Выделим полужирным шрифтом значения всех параметров для $f_{1,i}$, если при $f_{1,i}$ требуемое скольжение МТАД достигается без превышения максимальных оборотов ГПТ ($n_{ГП} \leq 4000$ об/мин) и номинального тока при $\Phi = \Phi_n$ ($I_{а,ГП} \leq 39,7$ А) и с допустимой ЭДС ($30 \text{ В} \leq E_{ГП} \leq 220 \text{ В}$). Нижняя граница ЭДС взята ориентировочно: возможно, генератор может работать и при меньшей ЭДС, однако при оборотах, соответствующих $E_{ГП} = 5,5 \text{ В}$, $2,3 \text{ В}$ гарантированно напряжения на генераторе не будет.

Расчет $R_{Ц}$ представим в табл. 3 для номинального и критического скольжения для каждого значения f_1 . Как и в таблицах 1, 2, подчеркнем волнистой линией значения $R_{Ц}$ при $E_{ГП} > 220$ В, прямой линией – при $I_{а,ГП} > 39,7$ А, выделим жирным значения $R_{Ц}$, если соблюдаются сразу три условия: $n_{ГП} \leq 4000$ об/мин, 30 В $\leq E_{ГП} \leq 220$ В и $I_{а,ГП} \leq 39,7$ А.

Если $E_{ГП} > 220$ В, то можно понизить значение $E_{ГП}$, ослабив магнитный поток шунтированием обмотки возбуждения. Соответственно, увеличится $I_{а,ГП}$ и уменьшится $R_{Ц}$. Если при $\Phi = \Phi_n$ и $E_{ГП} < 220$ В слишком большое значение $I_{а,ГП}$, то уменьшить его можно только увеличением $n_{ГП}$ путем уменьшения u_p .

Как видно из табл. 1, для $u_p = 1$ ток будет превышать 39,7 А при расчетном значении $f_1 = 135$ Гц и ниже, а при $f_1 = 35\text{--}75$ Гц ток 39,7 А будет превышен более чем в два раза. Для $u_p = 1$ при малых частотах f_1 очень малые расчетные значения ЭДС. Получим ситуацию аналогичную той, которая возникает на подвижном составе при динамическом торможении, когда при малых скоростях движения обороты двигателя, работающего в режиме генератора, слишком малы, у него пропадает ЭДС [13, с. 93] и он не может создавать тормозной момент (останется только момент, обусловленный силами трения). Поэтому если соединить вал МТАД с валом ГПТ без коробки передач (аналогично $u_p = 1$ с коробкой передач), то на низких частотах у ГПТ не будет ЭДС и, как следствие, момента на валу для нагрузки им МТАД, а в достаточно большом диапазоне частот должен быть превышен номинальный ток для обеспечения требуемого значения $M_{ГП}$.

Для $u_p = 1 / 6,45 = 0,155$ при $f_1 = 50$ Гц и выше $n_{ГП}$ превысит 4000 об/мин, а это недопустимо. Если вместо коробки использовать двухступенчатый редуктор с $u_p = 1$ и $u_p = 1 / 6,45$, то при $f_1 > 50$ Гц нужно будет работать $u_p = 1$ с более чем двукратным превышением тока в диапазоне 50–75 Гц. Если использовать двухступенчатый редуктор с $u_p > 0,155$ (например, $u_p = 1 / 3,56 = 0,281$) и $u_p = 1$, то при малых значениях f_1 будет малая ЭДС (и может вообще пропасть). То есть двухступенчатого редуктора недостаточно: будет либо сильно превышен ток в определенном диапазоне частот f_1 работы МТАД, либо будет слишком малая ЭДС.

Таблица 1 – Результаты расчета при $s=s_{кр(t)}$

f_i	$u_p = 1$			$u_p = 1 / 1,275$			$u_p = 1 / 1,98$			$u_p = 1 / 3,56$			$u_p = 1 / 6,45$		
	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$
5	25	1,8	32,7	32	2,3	25,6	50	3,5	16,5	89	6,4	9,2	161	12	5,1
10	60	4,3	<u>43,8</u>	77	5,5	34,4	119	8,5	22,1	214	15	12,3	387	28	6,8
15	105	7,5	<u>52,6</u>	134	9,6	<u>41,3</u>	208	15	26,6	374	27	14,8	677	49	8,2
20	160	12	<u>61,4</u>	204	15	<u>48,1</u>	317	23	31,0	570	41	17,2	1032	74	9,5
30	324	23	<u>78,9</u>	413	30	<u>61,9</u>	642	46	39,9	1153	83	22,2	2090	150	12,2
45	594	43	<u>98,0</u>	757	54	<u>76,8</u>	1176	84	<u>49,5</u>	2115	152	27,5	3831	275	15,2
50	690	49	<u>98,0</u>	880	63	<u>76,8</u>	1366	98	<u>49,5</u>	2456	176	27,5	4451	-	-
55	773	55	<u>94,6</u>	986	71	<u>74,2</u>	1531	110	<u>47,8</u>	2753	197	26,6	4988	-	-
60	859	62	<u>91,3</u>	1096	79	<u>71,6</u>	1701	122	<u>46,1</u>	3059	219	25,6	5542	-	-
65	948	68	<u>88,0</u>	1208	87	<u>69,0</u>	1876	135	<u>44,4</u>	3374	242	24,7	6113	-	-
70	1039	74	<u>84,7</u>	1325	95	<u>66,4</u>	2057	147	<u>42,8</u>	3698	265	23,8	6700	-	-
75	1133	81	<u>81,3</u>	1444	104	<u>63,8</u>	2242	161	<u>41,1</u>	4032	-	-	7305	-	-
80	1229	88	<u>78,0</u>	1567	112	<u>61,2</u>	2433	174	39,4	4375	-	-	7926	-	-
95	1533	110	<u>68,1</u>	1955	140	<u>53,4</u>	3036	218	34,4	5459	-	-	9890	-	-
100	1640	118	<u>64,8</u>	2091	150	<u>50,8</u>	3247	233	32,7	5838	-	-	10578	-	-
115	1927	138	<u>54,8</u>	2457	176	<u>43,0</u>	3816	274	27,7	6862	-	-	12432	-	-
120	2026	145	<u>51,5</u>	2583	185	<u>40,4</u>	4011	-	-	7211	-	-	13065	-	-
125	2125	152	<u>48,2</u>	2709	194	37,8	4208	-	-	7565	-	-	13706	-	-
130	2226	160	<u>44,9</u>	2838	203	35,2	4407	-	-	7923	-	-	14355	-	-
135	2327	167	<u>41,5</u>	2967	213	32,6	4608	-	-	8286	-	-	15012	-	-
140	2430	174	38,2	3099	222	30,0	4812	-	-	8652	-	-	15676	-	-
165	2937	211	21,6	3745	268	17,0	5816	-	-	10457	-	-	18946	-	-
170	3038	218	18,3	3873	278	14,4	6014	-	-	10814	-	-	19592	-	-
175	3139	225	15,0	4002	287	11,8	6214	-	-	11173	-	-	20243	-	-
180	3240	232	11,7	4131	-	-	6415	-	-	11534	-	-	20898	-	-

Таблица 2 – Результаты расчета при $s=s_H$

f_i	$u_p = 1$			$u_p = 1 / 1,275$			$u_p = 1 / 1,98$			$u_p = 1 / 3,56$			$u_p = 1 / 6,45$		
	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$
5	94	6,7	11,7	120	8,6	9,2	186	13	5,9	335	24	3,3	606	43	1,8
10	188	13	14,6	240	17	11,5	372	27	7,4	669	48	4,1	1213	87	2,3
15	282	20	17,5	360	26	13,8	558	40	8,9	1004	72	4,9	1819	130	2,7
20	376	27	20,5	479	34	16,0	744	53	10,3	1339	96	5,7	2425	174	3,2
30	564	40	26,3	719	52	20,6	1117	80	13,3	2008	144	7,4	3638	<u>261</u>	4,1
45	846	61	32,7	1079	77	25,6	1675	120	16,5	3012	216	9,2	5457	-	-
50	940	67	32,7	1199	86	25,6	1861	133	16,5	3346	<u>240</u>	9,2	6063	-	-
55	1034	74	29,7	1318	94	23,3	2047	147	15,0	3681	<u>264</u>	8,3	6669	-	-
60	1128	81	27,2	1438	103	21,3	2233	160	13,7	4016	-	-	7276	-	-
65	1222	88	25,1	1558	112	19,7	2420	173	12,7	4350	-	-	7882	-	-
70	1316	94	23,3	1678	120	18,3	2606	187	11,8	4685	-	-	8488	-	-
75	1410	101	21,8	1798	129	17,1	2792	200	11,0	5020	-	-	9095	-	-
80	1504	108	20,4	1918	137	16,0	2978	213	10,3	5354	-	-	9701	-	-
95	1786	128	17,2	2277	163	13,5	3536	<u>253</u>	8,7	6358	-	-	11520	-	-
100	1880	135	16,3	2397	172	12,8	3722	<u>267</u>	8,2	6693	-	-	12126	-	-
115	2162	155	14,2	2757	198	11,1	4281	-	-	7697	-	-	13945	-	-
120	2256	162	13,6	2876	206	10,7	4467	-	-	8031	-	-	14551	-	-
125	2350	168	13,1	2996	215	10,2	4653	-	-	8366	-	-	15158	-	-
130	2444	175	12,6	3116	<u>223</u>	9,9	4839	-	-	8701	-	-	15764	-	-
135	2538	182	12,1	3236	<u>232</u>	9,5	5025	-	-	9035	-	-	16370	-	-
140	2632	189	11,7	3356	<u>240</u>	9,1	5211	-	-	9370	-	-	16976	-	-
165	3102	<u>222</u>	9,9	3955	<u>283</u>	7,8	6142	-	-	11043	-	-	20008	-	-
170	3196	<u>229</u>	9,6	4075	-	-	6328	-	-	11378	-	-	20614	-	-
175	3290	<u>236</u>	9,3	4195	-	-	6514	-	-	11712	-	-	21221	-	-
180	3384	<u>243</u>	9,1	4315	-	-	6700	-	-	12047	-	-	21827	-	-

Таблица 3 – Результаты расчета $R_{Ц}$

f_i	$u_p = 1$		$u_p = 1 / 1,275$		$u_p = 1 / 1,98$		$u_p = 1 / 3,56$		$u_p = 1 / 6,45$	
	$R_{Ц}$ при s_H	$R_{Ц}$ при $s_{кр(f)}$	$R_{Ц}$ при s_H	$R_{Ц}$ при $s_{кр(f)}$	$R_{Ц}$ при s_H	$R_{Ц}$ при $s_{кр(f)}$	$R_{Ц}$ при s_H	$R_{Ц}$ при $s_{кр(f)}$	$R_{Ц}$ при s_H	$R_{Ц}$ при $s_{кр(f)}$
5	0,58	0,05	0,94	0,09	2,26	0,22	7,30	0,70	38,36	2,28
10	0,92	0,10	1,50	0,16	3,61	0,38	11,69	1,24	47,95	4,08
15	1,15	<u>0,14</u>	1,87	<u>0,23</u>	4,52	0,56	14,61	1,81	54,80	5,95
20	1,32	0,19	2,14	<u>0,30</u>	5,16	0,73	16,69	2,37	63,93	7,77
30	1,54	<u>0,29</u>	2,50	<u>0,48</u>	6,02	1,15	19,48	3,73	<u>77,23</u>	12,24
45	1,86	<u>0,43</u>	3,02	0,71	7,28	<u>1,70</u>	23,53	5,51	-	18,07
50	2,06	0,50	3,35	0,82	8,09	1,98	<u>26,14</u>	6,40	-	-
55	2,50	<u>0,59</u>	4,06	<u>0,95</u>	9,78	<u>2,30</u>	<u>31,63</u>	7,42	-	-
60	2,97	<u>0,67</u>	4,83	<u>1,10</u>	11,64	<u>2,64</u>	-	8,55	-	-
65	3,49	<u>0,77</u>	5,67	<u>1,25</u>	13,67	<u>3,03</u>	-	<u>9,78</u>	-	-
70	4,04	0,88	6,57	<u>1,43</u>	15,85	<u>3,45</u>	-	<u>11,14</u>	-	-
75	4,64	<u>1,00</u>	7,54	<u>1,62</u>	18,19	<u>3,91</u>	-	-	-	-
80	5,28	<u>1,13</u>	8,58	<u>1,83</u>	20,70	4,42	-	-	-	-
95	7,45	<u>1,61</u>	12,10	<u>2,62</u>	<u>29,19</u>	6,33	-	-	-	-
100	8,25	<u>1,81</u>	13,41	<u>2,95</u>	<u>32,34</u>	<u>7,11</u>	-	-	-	-
115	10,91	<u>2,52</u>	17,74	<u>4,10</u>	-	<u>9,88</u>	-	-	-	-
120	11,88	<u>2,82</u>	19,31	<u>4,58</u>	-	-	-	-	-	-
125	12,89	<u>3,16</u>	20,96	5,14	-	-	-	-	-	-
130	13,94	<u>3,56</u>	<u>22,67</u>	5,78	-	-	-	-	-	-
135	15,04	<u>4,01</u>	<u>24,44</u>	6,53	-	-	-	-	-	-
140	16,17	4,56	<u>26,29</u>	<u>7,41</u>	-	-	-	-	-	-
165	<u>22,46</u>	9,73	<u>36,51</u>	<u>15,81</u>	-	-	-	-	-	-
170	<u>23,84</u>	11,88	-	<u>19,31</u>	-	-	-	-	-	-
175	<u>25,27</u>	<u>14,99</u>	-	<u>24,36</u>	-	-	-	-	-	-
180	<u>26,73</u>	<u>19,86</u>	-	-	-	-	-	-	-	-

Но и при $u_p = 1 / 6,45$ $E_{ГП} = 11,6$ В для $f_1 = 5$ Гц. Не ясно, выдаст ли напряжение генератор при такой малой ЭДС. При $f_1 < 5$ Гц обороты, а, следовательно, и ЭДС генератора, еще меньше, поэтому желательно наличие $u_p < 0,155$ для возможности нагружать МТАД при малых значениях f_1 .

При работе с $s = s_n$ для f_1 от 5 Гц до 165 Гц использование коробки передач ЗиЛ позволяет работать при $E_{ГП} \leq 220$ В, $I_{a,ГП} \leq 39,7$ А (см. табл. 2). Для $f_1 \geq 165$ Гц нужно ослаблять магнитный поток, чтобы снизить $E_{ГП}$. При работе с $s = s_{кр(f)}$ (см. табл. 1) ослаблять поток нужно при $s = s_{кр(f)}$ и $f_1 \geq 175$ Гц. При частоте f_1 , равной 65–70 Гц, можно работать с $s = s_{кр(f)}$ на $u_p = 1 / 3,56$ с ослаблением возбуждения либо на $u_p = 1 / 1,98$ при $\Phi = \Phi_n$ с превышением тока. При 100–115 Гц можно работать с $s = s_{кр(f)}$ на $u_p = 1 / 1,98$ с ослаблением возбуждения либо на $u_p = 1 / 2,75$ при $\Phi = \Phi_n$ с превышением тока. Для $f_1 = 75$ Гц и $f_1 = 120$ Гц ток будет немного превышен (на 1,8 %–3,5 %).

Таким образом, при использовании коробки передач ЗиЛ-130, включенной на повышение оборотов, можно обеспечить работу ГПТ для $f_1 > 5$ –10 Гц; для отдельных значений f_1 будет немного превышено номинальное значение $I_{a,ГП}$; также потребуются шунтировать обмотку возбуждения для определенных значений f_1 .

Расчеты показывают, что для всех значений f_1 , при которых необходимо ослаблять поток возбуждения, соблюдается отношение $(U_{ГП} \cdot I_{a,ГП} / U_{ГП,н}) < I_{a,ГП,н}$ (принято $U_{ГП} \approx E_{ГП}$ и $E_{ГП,н} \approx U_{ГП(д),н}$, откуда $U_{ГП,н} = 220$ В), поэтому при уменьшении напряжения до $U_{ГП,н}$ ослаблением возбуждения номинальный ток превышен не будет.

Чтобы не ослаблять поток обмотки возбуждения и обеспечить гарантированную работу установки при низких значениях f_1 , необходимо расширить диапазон передаточных отношений и увеличить количество передач.

Коробки передач легковых автомобилей имеют обычно передаточное отношение первой передачи (3,5–3,8) $1 / (3,5–3,8) < 1 / 1,645$, поэтому гарантированно не будет обеспечена возможность работы для малых значений f_1 . Но можно взять две коробки так, чтобы выходной вал одной коробки был соединен с входным валом другой коробки. Тогда максимальное значение u_p будет в пределах $1 / 12,25$ – $1 / 14,44$, что позволит нагружать МТАД и при $f_1 < 5$ Гц. Также коробки передач легковых автомобилей обычно содержат повышающую передачу; при включении коробку на повышение

оборотов повышающая передача станет понижающей; это позволит при $f_1 = 175$ Гц, $f_2 = 180$ Гц уменьшить частоту вращения вала ГПТ, а следовательно, и ЭДС, что позволит не ослаблять возбуждение для снижения ЭДС.

Кроме того, масса коробки легкового автомобиля обычно 32–35 кг, масса коробки ЗиЛ 130, 131, 5301 – 90 кг [11, 12], то есть даже две коробки легкового автомобиля будут легче одной коробки ЗиЛ-130.

Если взять две пятиступенчатые коробки с одинаковыми передаточными отношениями, то будет меньше передаточных отношений, потому что при включении, например, первой передачи первой коробки и второй передачи второй коробки передаточное отношение будет таким же, как и при включении второй передачи первой коробки и первой передачи второй коробки. Возьмем, например, одну коробку Lada Largus JH3 540 [14] и одну коробку Lada Kalina [15]. Минимальное значение u_p будет $1 / (3,636 \cdot 3,727) = 1 / 13,55$. Можно использовать также и передачи заднего хода – не имеет значения, в каком направлении вращается ГПТ.

Представим в таблицах 4 и 5 расчеты при $f_1 = 140$ – 180 Гц для случаев, когда для обеих коробок включены повышающие передачи ($u_p = 1 / (0,82 \cdot 0,78) = 1 / 0,64$) и когда включены передачи $1 / 0,78$ и $1 / 1,029$ ($u_p = 1 / 0,81$, что примерно соответствует использованию коробки [14] с включенной повышающей передачей и какой-либо коробки с включенной прямой передачей). Как видно из таблиц 5, 6, при $u_p = 1 / 0,81$ может потребоваться $R_{ц} = 17,6$ Ом, в то время как $u_p = 1 / 0,64$ требует меньшего значения сопротивления: 10,9 Ом. Таким образом, применение коробок с двумя повышающими передачами позволяет использовать сопротивление $R_{ц}$ меньшего значения, чем использование только одной коробки с повышающей передачей.

Проведем расчет для всех значений передаточных отношений, которые возможны при совместном использовании двух коробок передач: [14, 15]. Для каждого значения f_1 выберем результаты расчета при одном из u_p , обеспечивающих значение параметров $E_{ГПТ}$, $I_{а,ГПТ}$, $n_{ГПТ}$ в требуемых пределах или на столько близкие к ним значения, насколько возможно, и приведем их в табл. 6.

Как видно из табл. 6, при $f_1 = 75$ Гц и $f_2 = 100$ Гц значения тока незначительно превышают номинальное значение 39,7 А: 40,5 А и 40,2 А соответственно, то есть превышение порядка 2 %. В реальности значение тока может быть немного выше, поскольку при рас-

четах принято $U_{ГП} \approx E_{ГП}$, но для генератора $U_{ГП}$ немного меньше $E_{ГП}$. При изменении значения u_p согласно табл. 6 сопротивление $R_{Ц}$ должно изменяться в пределах от 4 до 10,9 Ом.

Таблица 4 — Значения $E_{ГП}$, $I_{a,ГП}$, $R_{Ц}$ при $u_p=1/0,64$ и $1/0,81$ для s_n

$s=s_n$		$u_p=1/0,64$				$u_p=1/0,81$			
f_1	$n_{2,МГАД}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$R_{Ц}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$R_{Ц}$
140	2632,0	1684,5	120,7	18,2	6,6	2131,9	152,8	14,4	10,6
145	2726,0	1744,6	125,0	17,6	7,1	2208,1	158,2	13,9	11,4
150	2820,0	1804,8	129,3	17,0	7,6	2284,2	163,7	13,4	12,2
155	2914,0	1865,0	133,6	16,5	8,1	2360,3	169,1	13,0	13,0
160	3008,0	1925,1	138,0	15,9	8,7	2436,5	174,6	12,6	13,9
165	3102,0	1985,3	142,3	15,5	9,2	2512,6	180,1	12,2	14,7
170	3196,0	2045,4	146,6	15,0	9,8	2588,8	185,5	11,9	15,6
175	3290,0	2105,6	150,9	14,6	10,3	2664,9	191,0	11,5	16,6
180	3384,0	2165,8	155,2	14,2	10,9	2741,0	196,4	11,2	17,5

Таблица 5 — Значения $E_{ГП}$, $I_{a,ГП}$, $R_{Ц}$ при $u_p=1/0,64$ и $1/0,81$ для $s_{кр(f)}$

$s=s_{кр(f)}$		$u_p=1/0,64$				$u_p=1/0,81$			
f_1	$n_{2,МГАД}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$R_{Ц}$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$R_{Ц}$
140	2430,4	1555,5	111,5	<u>59,7</u>	1,9	1968,6	141,1	<u>47,2</u>	3,0
145	2534,6	1622,1	116,2	<u>54,5</u>	2,1	2053,0	147,1	<u>43,1</u>	3,4
150	2640,0	1689,6	121,1	<u>49,4</u>	2,5	2138,4	153,2	39,0	3,9
155	2738,9	1752,9	125,6	<u>44,2</u>	2,8	2218,5	159,0	34,9	4,6
160	2837,8	1816,2	130,1	39,0	3,3	2298,6	164,7	30,8	5,3
165	2937,3	1879,9	134,7	33,8	4,0	2379,2	170,5	26,7	6,4
170	3037,6	1944,0	139,3	28,6	4,9	2460,4	176,3	22,6	7,8
175	3138,5	2008,6	143,9	23,4	6,1	2542,1	182,2	18,5	9,8
180	3240,0	2073,6	148,6	18,3	8,1	2624,4	188,1	14,4	13,0

Как видно из табл. 3–6, расширение диапазона передаточных отношений с $1 / 6,45-1$ до $1 / 13,55-1 / 0,64$ позволяет сузить диапазон $R_{Ц}$ и привести ток и ЭДС к допустимым их значениям без ослабления возбуждения (то есть при $\Phi = \Phi_n$), а также увеличить обороты генератора при малых значениях f_1 .

Однако при $f_1=5$ Гц при выбранных f_1 составит 24,3–26,9 В при $n_{ГП}$ в пределах 338–375 об/мин. Если для $s_{кр(f)}$ уменьшать значение u_p уже некуда, то для s_n можно использовать меньшие значения u_p . Как видно из таблицы 7, при этом будет возрастать сопротивление. Кроме того, для опытов при $s < s_n$ значение сопротивления потребует большее; а при $f_1 = 5$ Гц снижать обороты с целью уменьшения

R_{II} возможности нет – при слишком малом значении n_{II} может про-
пасть ЭДС.

Таблица 6 – Результаты расчета при использовании двух коробок передач

f_1	$S=S_{кpf(f)}$					$S=S_H$				
	$1/u_p$	n_{II}	E_{II}	$I_{a,II}$	R_{II}	$1/u_p$	n_{II}	E_{II}	$I_{a,II}$	R_{II}
5	13,55	338,8	24,3	2,4	10,1	3,99	375,1	26,9	2,9	9,2
10	7,45	447,0	32,0	5,9	5,4	2,98	560,2	40,1	4,9	8,2
15	7,45	782,3	56,1	7,1	7,9	2,92	823,4	59,0	6,0	9,8
20	7,45	1192,0	85,4	8,2	10,4	2,72	1022,7	73,3	7,5	9,7
25	5,04	1265,0	90,7	13,9	6,5	2,01	944,7	67,7	11,6	5,8
30	5,04	1639,4	117,5	15,6	7,5	2,01	1133,6	81,2	13,1	6,2
35	5,04	2054,4	147,2	17,3	8,5	2,01	1322,6	94,8	14,5	6,5
40	5,04	2509,8	179,9	19,4	9,3	2,01	1511,5	108,3	16,2	6,7
45	3,99	2370,1	169,8	24,6	6,9	2,01	1700,5	121,9	16,2	7,5
50	3,99	2753,1	197,3	24,6	8,0	2,01	1889,4	135,4	16,2	8,3
55	2,89	2234,8	160,2	32,7	4,9	1,89	1954,3	140,0	15,7	8,9
60	2,72	2337,0	167,5	33,6	5,0	1,61	1816,1	130,1	16,9	7,7
75	2,72	2577,7	184,7	32,3	5,7	1,61	1967,4	141,0	15,6	9,0
70	2,72	2825,5	202,5	31,1	6,5	1,31	1724,0	123,5	17,8	6,9
75	2,01	2276,3	163,1	40,5	4,0	1,31	1847,1	132,4	16,6	8,0
80	2,01	2469,9	177,0	38,8	4,6	1,11	1669,4	119,6	18,4	6,5
85	2,01	2668,7	191,2	37,2	5,1	1,11	1773,8	127,1	17,3	7,3
90	2,01	2872,7	205,9	35,5	5,8	1,11	1878,1	134,6	16,3	8,2
95	1,89	2897,9	207,7	36,0	5,8	0,81	1446,7	103,7	21,2	4,9
100	1,61	2640,4	189,2	40,2	4,7	0,81	1522,8	109,1	20,2	5,4
105	1,61	2792,7	200,1	38,2	5,2	0,81	1598,9	114,6	19,2	6,0
110	1,61	2946,9	211,2	36,1	5,8	0,81	1675,1	120,0	18,3	6,5
115	1,4	2698,4	193,4	39,1	4,9	0,81	1751,2	125,5	17,5	7,2
120	1,4	2835,8	203,2	36,8	5,5	0,81	1827,4	131,0	16,8	7,8
125	1,4	2975,0	213,2	34,4	6,2	0,81	1903,5	136,4	16,1	8,5
130	1,31	2915,5	208,9	34,2	6,1	0,81	1979,6	141,9	15,5	9,1
135	1,31	3048,9	218,5	31,7	6,9	0,81	2055,8	147,3	14,9	9,9
140	1,11	2697,7	193,3	34,4	5,6	0,64	1684,5	120,7	18,2	6,6
145	1,11	2813,4	201,6	31,4	6,4	0,64	1744,6	125,0	17,6	7,1
150	1,11	2930,4	210,0	28,5	7,4	0,64	1804,8	129,3	17,0	7,6
155	1,11	3040,1	217,9	25,5	8,6	0,64	1865,0	133,6	16,5	8,1
160	0,81	2298,6	164,7	30,8	5,3	0,64	1925,1	138,0	15,9	8,7
165	0,81	2379,2	170,5	26,7	6,4	0,64	1985,3	142,3	15,5	9,2
170	0,81	2460,4	176,3	22,6	7,8	0,64	2045,4	146,6	15,0	9,8
175	0,81	2542,1	182,2	18,5	9,8	0,64	2105,6	150,9	14,6	10,3
180	0,64	2073,6	148,6	18,3	8,1	0,64	2165,8	155,2	14,2	10,9

Поэтому при необходимости проведения опыта $s < s_n$ при $f_1 < 5-15$ Гц нужно проводить дополнительный расчет с целью определения требуемого значения $R_{Ц}$. Также следует отметить, что режим работы ГПТ при малых оборотах и малых существенно отличается от номинального режима работы ГПТ ($n_{ГП} = 3070$ об/мин, $U_{ГП} = 220$ В), поэтому может существенно отличаться и КПД: очевидно, что он будет ниже, чем при номинальном режиме; возможно, значительно ниже. Чем ниже КПД – тем больше мощности теряется в виде потерь в самом ГПТ и тем меньшее сопротивление $R_{Ц}$ потребуется. Поэтому требуемые значения $R_{Ц}$ для малых $n_{ГП}$ могут оказаться ниже расчетных.

Таблица 7 – Результаты расчёта для $s = s_n, f_1 = 5$ Гц при различных значениях u_p

$1/u_p$	$n_{ГП}$	$E_{ГП}$	$I_{a,ГП}$	$R_{ГП}$
7,45	700,3	50,2	1,6	32,0
7,27	683,4	49,0	1,6	30,5
5,06	475,6	34,1	2,3	14,8
3,99	375,1	26,9	2,9	9,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения работы ГПТ независимого возбуждения 4ПБМ160МГ04 мощностью 8 кВт в качестве нагрузочного устройства для МТАД необходимо изменение передаточного отношения между валами МТАД и ГПТ в широком диапазоне. Этот диапазон передаточных отношений можно обеспечить двумя коробками передач легковых автомобилей, установленных так, чтобы выходной вал первой коробки передач был соединён с валом МТАД, выходной вал второй коробки передач – с входным валом первой коробки передач, вал ГПТ – с входным валом второй коробки передач. Если хотя бы одна из коробок передач будет с повышающей передачей, то не будет необходимости шунтировать обмотку возбуждения ГПТ.

При использовании двух коробок передач [14, 15] сопротивление нагрузки требуется регулировать в пределах 4–10,9 Ом, однако при проведении опытов с $s < s_n$ могут потребоваться значения $R_{Ц} > 10,9$ Ом – для таких режимов работы нужно проводить отдельный расчет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданович, Ч. И. Обоснование параметров физической модели электромеханической трансмиссии трактора / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Актуальные вопросы машиностроения: сб. научн. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С. Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2023. – Вып. 12. – С. 121–126.
2. Электродвигатель 4ПБМ160МГ 8 кВт 3070/4000 об. 220/110В IM3001. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://energo1.com/catalog/elektrodvigateli_postoyannogo_toka/elektrodvigateli_postoyannogo_toka_serii_4p/elektrodvigateli_serii_4pbm/14703/. – Дата доступа: 10.11.2023.
3. Кацман, М. М. Электрические машины: учеб. для студентов средн. проф. учебных заведений / М. М. Кацман. — 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2001. – 463 с.
4. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 528 с.
5. Жданович, Ч. И. Определение максимального момента на колесах трактора с электромеханической трансмиссией / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: В. П. Бойков, Ч. И. Жданович. – Минск, 2013. – С. 54–59.
6. Жданович, Ч. И. Зависимость характеристик трактора с электромеханической трансмиссией от температуры обмоток тягового электродвигателя / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: В. П. Бойков, Ч. И. Жданович. – Минск, 2013. – С. 60–67.
7. Жданович, Ч. И. Выбор способа регулирования тягового асинхронного электродвигателя трактора и построение механической характеристики / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Наука и техника. — 2015. – № 3. – С. 60–64.

8. Трехфазные двигатели серии АИР. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mez.by/catalog/asinkhronnye-dvigateli-serii-air-aire/trekhfaznye-dvigateli-serii-air/>. – Дата доступа: 10.11.2023.
9. Прищепов, М. А. К вопросу о расчете параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным / М. А. Прищепов // Агропанорама. – 2021. – № 3 (145). – С. 23–27.
10. Еремочкин, С. Ю. К вопросу выбора достоверного метода расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя / С. Ю. Еремочкин, А. А. Жуков, Д. В. Дорохов // Вестник НГИЭИ. 2022. – № 12 (139). – С. 43–53.
11. Коробка передач ЗИЛ 5301. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://гомельшина.бел/product/коробка-передач-зил-5301-432930-скоростная-д-245-9/>. – Дата доступа: 15.11.2023.
12. Коробка переключения передач ЗИЛ 130, ЗИЛ 131 в сборе. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://avtoxis.ru/shop/avtozapchasti_zil/kpp-zil/korobka_pereklyucheniya_pere_dach_kpp_zil130_131/. – Дата доступа: 15.11.2023.
13. Добровольская, Э. М. Электропоезда метрополитена: учебник для нач. проф. образования / Э. М. Добровольская. – М.: ИРПО: Издат. центр «Академия», 2003. – 320 с.
14. Передаточные числа JR5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.remont-mkpp.ru/rubriki/cat_45/pub_2068/. – Дата доступа: 20.11.2023.
15. Ремонт ВАЗ-1117-1119. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://wiki.zr.ru/Технические_характеристики_Kalina. – Дата доступа: 20.11.2023.