

УДК 629.113

А.В. Катаржин

д-р техн. наук, проф., МАДИ,

тел.: 8(499)155-01-45,

e-mail: ralfets@yandex.ru

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ
РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДВИЖНОГО
АГРЕГАТА ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО И
ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И АКТИВИЗАЦИИ НА БАЗЕ
АВТОНОМНЫХ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Аннотация. В данной статье представлены результаты моделирования и оценки технических и эксплуатационных характеристик экспериментального автопоезда, обоснован выбор рациональных вариантов технических решений экспериментального автопоезда и его составных частей, выполнена оценка достижимого уровня его технического и эксплуатационного совершенства.

Ключевые слова: расчёт, эксперимент, электрические машины, ВИП, вентильно-индукторный привод, агрегат, оборудование, энергия, автономность, электропривод, привод, система, экспериментальная модель, оценка, параметры работы, режимы работы, подвижный агрегат, РК, ракетный комплекс, энергетика, транспортно-перегрузочное оборудование, транспортно-установочное оборудование.

Введение

На этапах научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по созданию экспериментального образца подвижного агрегата

транспортно-перегрузочного и транспортно-установочного оборудования ракетного комплекса с применением системы дополнительной энергетики и активизации на базе автономных вентильно-индукторных электроприводов выполняется моделирование и оценка технических и эксплуатационных характеристик экспериментального образца и его составных частей. Это позволяет обосновать выбор рациональных вариантов технических решений экспериментального автопоезда и его составных частей, а также оценить возможный уровень его технического и эксплуатационного совершенства.

С целью повышения надежности измерительного комплекса применена методика расчетно-экспериментального определения параметров режимов работы. Суть методики сводится к тому, что в ходе испытаний регистрируются параметры, для которых легко обеспечивается продолжительная непрерывная регистрация параметров режима работы на ленту осциллографа. К числу таких параметров относятся угловые скорости валов трансмиссий и электрические параметры тягового электропривода (ТЭП). Силовые параметры, особенно крутящие моменты на вращающихся валах, относятся к числу труднорегистрируемых параметров из-за низкой надежности токосъемных устройств. Поэтому крутящие моменты определяются пересчетом по известным формулам с использованием паспортных характеристик гидротрансформатора (ГТ) и электрических машин.

Методика расчетно-экспериментального определения параметров режима работы

Методика содержит основные расчетные формулы, позволяющие определить выбранные оценочные критерии нагруженности тягача на основе регистрируемых параметров. При выводе формул использованы соотношения и характеристики, применяемые в тягово-динамических расчетах транспортных агрегатов.

1. Эффективная мощность тягового двигателя (ТД)

$$N_e = 0,001 (M_{1Г} + M_{1Э})\omega + 0,15N_{em} \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^3, \text{ кВт},$$

где $M_{1Г}$, $M_{1Э}$ – крутящие моменты на входных валах соответственно гидромеханической трансмиссии (ГМТ) и тягового электродвигателя (ТЭП), приведенные к валу ТД тягача [2], Нм; ω – угловая скорость вала ТД, рад/с; N_{em} – номинальная эффективная мощность ТД, кВт; ω_N – номинальная угловая скорость ТД, рад/с.

2. Приведенные моменты $M_{1Г}$, $M_{1Э}$

$$M_{1Г} = \frac{M_H}{i_{ПП}\eta_{ПП}}; M_{1Э} = \frac{M_{ТГ}}{i_{ПГ}\eta_{ПГ}}, \text{ Нм},$$

где M_H – крутящий момент на насосном колесе гидротрансформатора (ГТ), Нм; $M_{ТГ}$ – крутящий момент на валу тягового генератора (ТГ), Нм; $i_{ПП}$, $\eta_{ПП}$ – соответственно передаточное число и КПД повышающей передачи тягача; $i_{ПГ}$, $\eta_{ПГ}$ – соответственно передаточное число и КПД привода генератора[1].

3. Крутящий момент на насосном колесе ГТ

$$M_H = \lambda \cdot \omega_H^2, \text{ Нм},$$

где λ – коэффициент момента на насосном колесе ГТ, Нмс²; ω_H – угловая скорость насосного колеса, рад/с.

Коэффициент момента λ зависит от передаточного отношения ГТ i_G задается обычно в графической или табличной форме.

4. Угловая скорость насосного колеса ГТ

$$\omega_H = \frac{\omega}{i_{ПП}}, \text{ рад/с}.$$

5. Передаточное отношение ГТ

$$i_G = \frac{i_{ПП} \cdot i_{2Г}}{r_{КТ}} \cdot \frac{V}{\omega},$$

где $i_{2Г}$ – передаточное число механических элементов ГМТ тягача, соединяющих ГТ с колесами; V – скорость движения автопоезда, м/с.

6. Крутящий момент на валу ТГ

$$M_{\text{ТГ}} = E_{\omega} \cdot J + \frac{P_{\text{П}}}{\omega_{\text{ТГ}}}, \text{ Нм},$$

где E_{ω} – отношение ЭДС ТГ к его угловой скорости, Вс; J – ток якоря ТГ, А; $P_{\text{П}}$ – мощность потерь в ТГ, Вт; $\omega_{\text{ТГ}}$ – угловая скорость ротора ТГ, рад/с.

Параметр E_{ω} зависит от тока якоря ТГ и намагничивающей силы F , определяется по нагрузочной характеристике ТГ, которая обычно задается в графической форме.

Потери $P_{\text{П}}$ для ТГ типа ДК-510Д складываются из механических, магнитных, добавочных и потерь в цепи параллельной обмотки возбуждения. Механические потери зависят от угловой скорости ротора ТГ, магнитные – от угловой скорости и параметра E_{ω} . Эти два вида потерь определяются по характеристикам потерь холостого хода, задаваемых в графической форме или в виде формул.

7. Угловая скорость ТГ

$$\omega_{\text{ТГ}} = \frac{\omega}{i_{\text{ПГ}}}, \text{ рад/с.}$$

8. Намагничивающая сила ТГ типа ДК-510Д

$$F = J_{\text{Н}} \cdot W_{\text{Н}} - J \cdot W_{\text{С}} + \frac{U}{R_{\text{P}}} W_{\text{P}}, \text{ А},$$

где $J_{\text{Н}}$ – ток в независимой обмотке возбуждения ТГ (постоянная величина), А; $W_{\text{Н}}$; $W_{\text{С}}$; W_{P} – количество витков соответственно независимой, последовательной и параллельной обмоток возбуждения ТГ; U – напряжение ТГ, В; R_{P} – суммарное сопротивление цепи параллельной обмотки возбуждения ТГ, Ом.

9. Добавочные потери ТГ

Расчёт проводится по ГОСТ 11828-75.

$$P_{\text{Д}} = 00,1 P_{\text{N}} \left(\frac{J}{J_{\text{N}}} \right)^2, \text{ Вт},$$

где P_N – номинальная мощность ТГ, Вт; J_N – номинальный ток якоря ТГ, А.

10. Потери в цепи параллельной обмотки возбуждения ТГ

$$P_p = \frac{U^2}{R_p}, \text{ Вт.}$$

Момент на выходном валу гидромеханической коробки передач (ГМКП):

$$M_{\text{КП}} = M_H \cdot K_T \cdot i_{\text{КП}} \cdot \eta_{\text{КП}}, \text{ Нм,}$$

где K_T – коэффициент трансформаций момента ТГ; $i_{\text{КП}}$; $\eta_{\text{КП}}$ – соответственно передаточное число и КПД механической части ГМКП.

Коэффициент трансформации ТГ зависит от его передаточного отношения и задается в графической или табличной форме. Передаточное число и КПД механической части ГМКП определены, если известен номер передачи.

Результаты испытаний

Результаты обработки осциллографических записей параметров движения при пробеговых испытаниях экспериментального образца приведены в таблицах.

В таблице 1 приведены средние значения эффективной мощности двигателя тягача \bar{N}_e , скорости движения \bar{V} , передаточного отношения гидротрансформатора \bar{i}_T , среднего квадратического тока генератора I и коэффициента использования передач ГМКП по времени $\bar{t}(N)$ и по пути $\bar{S}(N)$.

Таблица 1

Средние значения параметров режима работы

Номер заезда	Пробег, м	Водитель	Время суток	\bar{N}_e , кВт	\bar{V} , м/с	\bar{i}_T	$\bar{I}_{\text{ск}}$, А
1	66437	1	день	209	6,1	0,90	157

Номер заезда	Пробег, м	Водитель	Время суток	\bar{N}_e , кВт	\bar{V} , м/с	\bar{i}_r	$\bar{I}_{ск}$, А
2	52397	2	день	302	5,9	0,81	127
3	72659	2	ночь	254	6,0	0,83	125
4	68294	1	ночь	233	5,0	0,75	106
Σ	259787	-		246	5,7	0,82	129

Продолжение табл. 1

Номер заезда	$\bar{i}(N)$			$\bar{S}(N)$		
	Передача ГМКП			Передача ГМКП		
	$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$
1	0	0,36	0,64	0	0,21	0,79
2	0,02	0,29	0,69	0,01	0,16	0,83
3	0	0,29	0,71	0	0,16	0,84
4	0	0,28	0,72	0	0,14	0,86
Σ	0,01	0,30	0,69	0	0,17	0,83

Таблицы 2–6 представляют собой таблицы распределения параметров режима работы экспериментального агрегата. Во внутренних клетках таблиц помещены относительные времена в процентах, в боковиках и головках – разрядные значения параметров.

Содержание таблиц:

- эффективная мощность двигателя тягача N_e и его угловая скорость ω (табл. 2);
- входной крутящий момент ГМТ тягача M_r , приведенный к валу двигателя, и угловая скорость двигателя (табл. 3);
- входной крутящий момент тягового электропривода $M_э$, приведенный к валу двигателя тягача, и угловая скорость двигателя (табл. 4);
- напряжение U и ток I тягового генератора ТЭП (табл. 5);
- суммарная сила тяги на колесах F и скорость движения V (табл. 6).

Таблица 2

Таблица распределения $N_e - \omega$

N_e , кВт	ω , рад/с											
	53,4	69,9	86,4	102,8	119,4	135,8	152,2	168,8	185,2	201,7	218,2	234,2
549,8									1,3	0,1		
465,6								4,7	9,3	0,6		
381,6							0,4	22,5	10,5	1,0		
297,6						0,1	1,4	3,5	5,6	0,7		
213,4					0,1	1,6	5,5	1,0	3,0	0,5		
129,4				0,1	0,2	0,3	0,8	0,3	1,0			
45,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	2,2	0,4		
-38,8	0,1	0,2	0,4	0,2	0,5	0,4	1,0	0,6	4,2	0,7		
-122,8						0,4	1,0	1,1	2,9	1,0	0,1	
-206,8								0,7	2,0	0,7	0,2	
-290,9									0,3	0,6	0,4	0,1
-375,0										0,1	0,1	0,1

Таблица 3

Таблица распределения $M_T - \omega$

M_T , Н·м	ω , рад/с											
	53,4	69,9	86,4	102,8	119,4	135,8	152,2	168,8	185,2	201,7	218,2	234,2
1974									3,8	4,1		
1586								4,6	32,8	2,5	0,2	
1198						0,1	7,0	1,0	6,6	2,1	0,2	
810					0,1	0,2	0,6	0,4	3,4	1,7	0,3	
422		0,1			0,1	0,2	0,4	0,3	1,3	1,0	0,2	
34	0,1						0,1	0,1	0,3	0,2		
-354	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4	0,9	1,6	0,2	
-742			0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,7	1,4	2,8	0,2	
-1130						0,2	0,8	0,8	1,2	2,8	0,3	0,1
-1518							0,1	0,7	1,3	1,7	0,3	0,2
-1906									0,3	1,1	0,6	0,4
-2294											0,2	0,2

Таблица 4

Таблица распределения $M_s - \omega$

M_s , Н·м	ω , рад/с											
	53,4	69,9	86,4	102,8	119,4	135,8	152,2	168,8	185,2	201,7	218,2	234,2
1044								0,4				
960								0,4				
876								0,2				
791								0,3	0,2			
707								0,7	0,4			
623						0,1	0,2	1,2	2,2	0,1		
538					0,1	0,2	0,3	5,3	2,2	0,1		
454			0,1		0,1	0,3	0,6	6,3	5,4	0,1		
370		0,1	0,1		0,4	1,0	1,6	8,1	9,0	0,9		
286	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	2,7	7,7	14,5	2,3	0,3	0,1
201	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	3,8	3,8	7,0	2,2	0,3	0,1
117			0,1		0,2	0,2	1,1	0,4	1,1	0,4	0,2	0,1

Таблица 5

Таблица распределения $U - I$

$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$											
	18	54	91	127	163	199	236	272	308	344	381	417
526		0,1	0,1	0,1								
480	0,2	0,8	0,3	0,2								
435	0,2	2,8	2,4	2,2	0,7	0,5	0,4					
389	1,0	9,2	9,3	3,5	1,7	1,2	0,6	0,6	0,2	0,1	0,1	
343	3,7	9,4	11,0	9,0	5,3	3,3	1,1	0,6	0,2	0,1	0,1	0,5
297	0,2	0,8	1,3	1,4	1,8	2,1	2,1	0,9	0,3	0,2		
252	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,9	0,2		0,1		
209	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1						
160	0,2	0,2	0,2									
114	0,2	0,1										
69	0,2	0,1	0,1									
23	0,8	0,2	0,1									

Таблица 6

Таблица распределения $F - V$

$F, \text{ кН}$	$V, \text{ м/с}$											
	1,2	2,1	3,1	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,9	9,9	10,9	11,8
187,8	0,1											
162,0												
136,3	0,1											
110,5	0,2	1,5	0,1									
84,7	0,3	4,8	2,3									
58,9	0,3	2,2	8,0	5,3	1,5	0,1						
33,1		0,6	2,5	7,1	8,0	8,5	5,8	1,2				
7,4	0,1	0,1	0,1	0,4	0,6	1,0	3,0	6,8	1,3			
-18,4		0,1	0,3	0,3	0,9	0,4	0,8	2,2	5,6	0,4		
-44,2				0,3	0,5			3,5	3,0	4,4	1,5	0,1
-70,0					0,4	0,1					0,6	0,7

В таблице 6 обращает на себя внимание то, что максимальное зарегистрированное значение мощности двигателя тягача превышает его номинальную мощность (478 кВт). Это объясняется тем, что принятый интервал обработки осциллограмм (46,5 м) не позволял регистрировать процессы, протекающие быстрее, чем за 5–10 с. В то же время на осциллограммах встречались переходные процессы, при которых угловая скорость двигателя тягача изменялась в течение 1–2 с на 30–40 рад/с. При таком изменении скорости инерционный момент достигал 600 Нм, что соответствует увеличению N_e на 100 кВт.

Заключение

Разработанные расчетные соотношения позволяют оценить зависимость крутящего момента от угловой скорости вала тягового генератора, величину намагничивающей силы, добавочные потери и потери в цепи параллельной обмотки возбуждения тягового генератора с учетом эффективной мощности тягового двигателя, приведенных моментов и крутящего момента на насосном колесе гидротрансформатора, его механическую характеристику, угловая скорость насосного колеса и передаточное отношение гидротрансформатора.

Результаты теоретических исследований совпадают с результатами экспериментальных исследований и являются основой разработки экспериментального подвижного агрегата транспортно-перегрузочного и транспортно-установочного оборудования ракетного комплекса с применением системы дополнительной энергетики и активизации на базе автономных вентильно-индукторных электроприводов.

Литература

1. Нарбут А.Н. Гидротрансформаторы. М.: Машиностроение, 1966. 216 с.
2. Бычков М.Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода: дисс. ... д-ра техн. наук. М.: 1999. 354 с.
3. 3Ф-30-9.00P05.1 Расчет тяговой характеристики автопоезда.
4. Аксёнов П.В. Многоосные автомобили. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1989. 280 с.
5. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. Л.: Судостроение, 1980. 384 с.

References

1. Narbut A.N. *Gidrotransformatory* (Torque converters), Moscow, Mashinostroenie, 1966, 216 p.
2. Bychkov M.G. *Osnovy teorii, upravlenie i proektirovanie ventil'no-induktornogo jelektroprivoda* (Fundamentals of the theory, design and management of valve-inductor electric), Doctor's thesis, Moscow, 1999, 354 p.
3. 3F-30-9.00R05.1 Raschet tjagovoj harakteristiki avtopoezda.
4. Aksjonov P.V. *Mnogoosnye avtomobili* (Multiaxial cars), 2-e izd. Moscow, Mashinostroenie, 1989, 280 p.
5. Montgomeri D.K. *Planirovanie jeksperimenta i analiz dannyh* (Experiment planning and data analysis), Leningrad, Sudostroenie, 1980, 384 p.

A. Katarzhin

Settlement and experimental estimates of parameters of operating modes of the experimental mobile unit of the transport and Reloading and transport and adjusting equipment of the missile system with use of system of additional power and activization on the Basis of autonomous ventilno-induktornyh of electric drives

Abstract. In this article it is provided it is settlement - an experimental assessment of parameters of operating modes of the experimental mobile unit transport - the reloading and transport and adjusting equipment of a missile system with use of system of additional power and activization on the basis of autonomous ventilno-inductor electric drives.

Key words: calculation, experiment, electrical machines, VIP, ventilno-the inductor drive, the unit, the equipment, energy, autonomy, the electric drive, the drive, system, experimental model, an assessment, work parameters, operating modes, the mobile unit, RK, a missile system, power, the transport and reloading equipment, the transport and adjusting equipment.