
УДК 631.37

Ребров А.Ю.

ВНЕШНИЕ СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ

На современных тракторах сельскохозяйственного назначения зарубежного производства повсеместно используются дизельные двигатели, которые обладают высоким запасом крутящего момента и развивают мощность не ниже номинальной в широком диапазоне частот вращения, который охватывает практически все скоростные режимы от номинального до режима максимального крутящего момента.

Такие двигатели получили название двигателей постоянной мощности (ДПМ) и применяются практически на всех тракторах мощностью более 50 кВт. Применение ДПМ с высоким запасом крутящего момента позволяет повысить тяговые свойства тракторов, более полно использовать мощность двигателя во всем тяговом диапазоне, обеспечивает работу двигателя при меньших максимальных давлениях, что способствует повышению его ресурса, дает возможность полно использовать экономичные режимы работы двигателя. Указанные преимущества, а также повсеместное использование ДПМ зарубежными производителями тракторной техники свидетельствует об их перспективности и более высоких эксплуатационных характеристиках. Вместе с тем широко известные методы аппроксимации внешних скоростных характеристик для ДПМ дают существенные качественные и количественные расхождения [1]. Поэтому задача адаптации известных способов аппроксимации внешних скоростных характеристик для ДПМ с последующим использованием их при исследованиях технико-экономических показателей тракторов представляется актуальной.

Анализ последних достижений и публикаций

Современные характеристики ДПМ получены благодаря успешному развитию турбонаддува, электронного управления впрыском топлива и др.

По данным [1, 2] коэффициент запаса крутящего момента у ДПМ составляет 1,4-1,7, что позволяет при достаточно плотном ряде передаточных чисел трансмиссии перейти в неполный режим загрузки двигателя, достигая экономии 26 % топлива [2], или сократив до 14% удельный расход топлива и до 20% - часовой [3].

Корректное моделирование характеристик тракторных двигателей, в том числе и на стадии проектирования [4], существенно упрощает задачу расчета или прогнозирования технико-экономических характеристик тракторов при отсутствии экспериментальных данных по двигателям.

Цель и постановка задачи

Целью данного исследования является адаптация известных способов аппроксимации внешней скоростной характеристики дизельных двигателей применительно к ДПМ зарубежного производства.

Внешние скоростные характеристики тракторных двигателей постоянной мощности

Новый способ аппроксимации корректорного участка внешней скоростной характеристики дизеля описан в работе [1], где предложено использовать параболу, повернутую на 90^0 , в интервале угловых скоростей $[\omega_M, \omega_N]$. Этот способ хорошо качественно и количественно аппроксимирует скоростные характеристики дизелей, у которых запас крутящего момента находится в пределах 1,12-1,20 и более. К двигателям постоянной мощности можно относить двигатели у которых коэффициент запаса крутящего момента (1) более 1,20.

$$k_M = \frac{M_{\max}}{M_H}, \quad (1)$$

где M_{\max} – максимальный крутящий момент;
 M_H – номинальный момент.

Однако для зарубежных ДПМ, методика [1] требует уточнения. Корректировка необходима в силу того, что декларируемый в техническом паспорте номинальный режим работы двигателя находится не в точке начала линейного регуляторного участка внешней характеристики, а левее его, т.е. при более низких оборотах двигателя.

Коэффициент приспособляемости двигателя по угловой скорости k_ω :

$$k_\omega = \frac{\omega_H}{\omega_{M_{\max}}}, \quad (2)$$

где ω_H – номинальная угловая скорость двигателя;
 $\omega_{M_{\max}}$ – угловая скорость при максимальном крутящем моменте;

Исходя из анализа внешних скоростных характеристик зарубежных ДПМ точку начала параболы, следует перенести из номинального режима в начало линейного участка регуляторной ветви.

Введем обозначения $k_{рм}$, $k_{р\omega}$:

$$k_{рм} = \frac{M_H}{M_p}, \quad (3)$$

M_p – крутящий момент на начале регуляторной ветви скоростной характеристики;

$$k_{p\omega} = \frac{\omega_p}{\omega_H}, \quad (4)$$

где ω_p – угловая скорость, соответствующая началу линейной регуляторной ветви.

Анализ ряда внешних скоростных характеристик зарубежных ДПМ показывает, что коэффициент запаса момента k_M находится в пределах 1,200-1,643 (см. табл.), коэффициент k_ω приспособляемости по угловой скорости – 0,455-0,791, k_{PM} для большинства двигателей составляет 1,172-1,179, а $k_{p\omega}$ находится в пределах 1,011-1,047.

Тогда, согласно методике [1] получаем:

$$\omega_d = \omega_p \cdot (a_2 + b_2 \cdot y - c_2 \cdot y^2); \quad y = \frac{M_{кр}}{M_p}, \quad (5)$$

где коэффициенты параболы (5) определяются выражениями:

$$c_2 = \frac{1 - \frac{k_\omega}{k_{p\omega}}}{(1 - k_M \cdot k_{PM})^2}; \quad b_2 = 2 \cdot c_2; \quad a_2 = 1 - c_2 \quad (6)$$

Регуляторная ветвь аппроксимируется прямой с учетом того, что на холостом ходу $\omega_x = (1,014 \dots 1,080) \cdot \omega_p$.

Из-за большого запаса крутящего момента номинальный режим и режим максимальной мощности не совпадают. Обозначим коэффициент запаса мощности:

$$k_N = \frac{N_{max}}{N_H}, \quad (7)$$

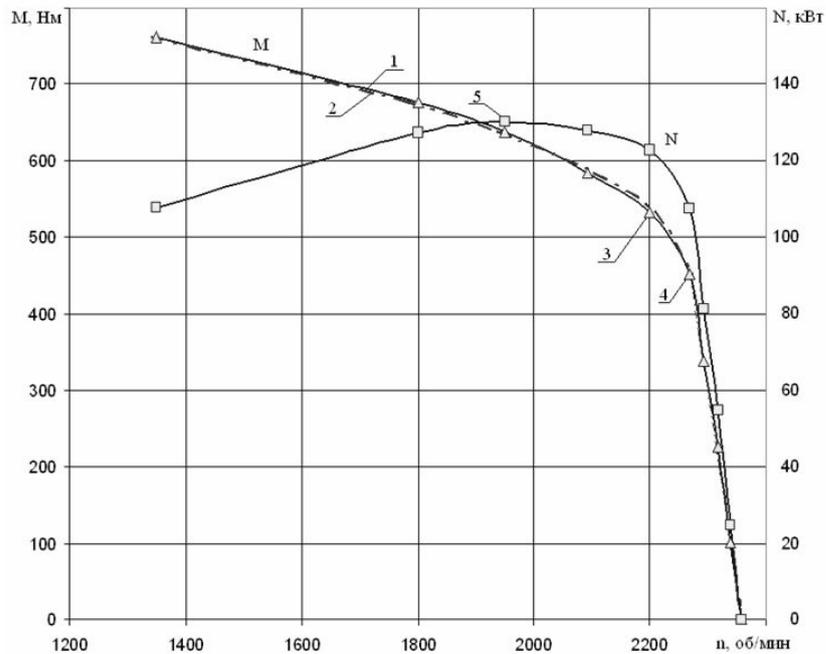


Рисунок 1 – Внешняя скоростная характеристика ДПМ SISU трактора Massey Ferguson 8245

где N_{\max} – максимальная мощность; N_n – номинальная мощность;

$$k_{N\omega} = \frac{\omega_{N_{\max}}}{\omega_n}, \quad (8)$$

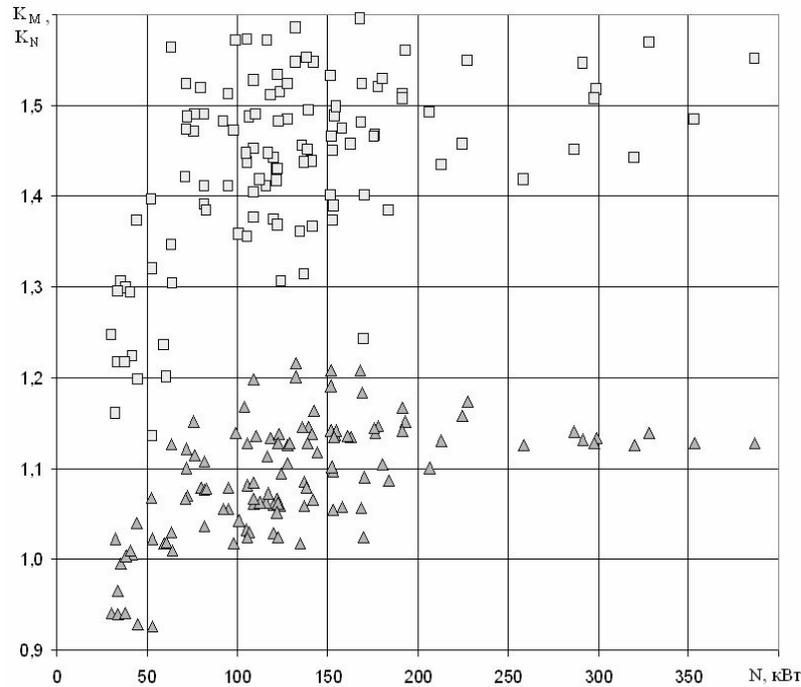


Рисунок 2 – Коэффициенты запаса крутящего момента и мощности ДПМ

где $\omega_{N_{\max}}$ – угловая скорость, соответствующая максимальной мощности.

Данные по экспериментальным точкам в режимах номинальном, максимальной мощности и максимального момента двигателей постоянной мощности зарубежного производства приведены в таблице. В качестве примера рассмотрена аппроксимация внешней скоростной характеристики двигателя мощностью 122,63 кВт при 2200 об/мин (рис. 1) фирмы SISU, установленного на трактор Massey Ferguson 8245.

На рис. 1: 1 – экспериментальная кривая; 2 – аппроксимация (расхождение менее 1%); 3 – номинальный режим; 4 – режим, соответствующий началу линейного участка регуляторной ветви; 5 – режим максимальной мощности.

Статистическая картина коэффициента запаса момента и мощности в зависимости от номинальной мощности для двигателей зарубежного производства приведена на рис. 2., из которого видно, что только на трактора мощностью менее 50 кВт устанавливают двигатели, которые нельзя отнести к ДПМ.

Таблица

Экспериментальные точки внешних скоростных характеристик тракторных двигателей

Модель трактора	Двигатель (производитель)	Режим M_{\max}		Режим N_{\max}		Номинальный		
		k_M	k_ω	k_N	$k_{N\omega}$	N_n , кВт	n , об/мин	q_n , г/(кВт·ч)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Case III *1								
CX 60	Perkins	1,224	0,575	1,005	0,978	41,90	2250	258

Транспортне машинобудування

CX 70	Perkins	1,373	0,545	1,040	0,909	44,50	2200	282
CX 80	Perkins	1,320	0,639	1,023	0,909	53,20	2200	282
CX 90	Perkins	1,236	0,636	1,019	0,909	59,40	2200	267
CX 100	Perkins	1,304	0,636	1,011	0,909	64,30	2200	279
DX 48	ISM Diesel	1,248	0,572	0,941	0,885	30,56	2800	350
DX 50	ISM Diesel	1,161	0,642	1,023	0,982	32,53	2802	320
DX 55	ISM Diesel	1,306	0,614	0,996	0,917	35,80	2700	351
DX 60	ISM Diesel	1,299	0,571	1,004	0,884	38,46	2800	313
JX 55	Iveco	1,218	0,600	0,940	0,880	33,60	2500	263
JX 65	Iveco	1,218	0,520	0,942	0,880	37,80	2500	249
JX 75	Iveco	1,199	0,480	0,929	0,880	45,20	2500	248
JX 85	Iveco	1,136	0,600	0,926	0,880	53,00	2500	250
JX 95	Iveco	1,201	0,520	1,020	0,940	60,90	2500	248
Magnum 215	CNH Diesel	1,547	0,702	1,216	0,900	132,36	2000	277
Magnum 245	CNH Diesel	1,532	0,675	1,191	0,900	152,10	2000	262
Magnum 275	CNH Diesel	1,523	0,701	1,183	0,875	169,27	2000	269
Magnum 305	CNH Diesel	1,512	0,700	1,168	0,900	191,39	2000	259
Magnum 335	CNH Diesel	1,492	0,713	1,101	0,858	207,00	2102	259
MX 180	Cons. Diesel	1,452	0,725	1,199	0,875	109,28	2000	282
MX 200	Cons. Diesel	1,515	0,725	1,060	0,850	123,60	2000	245
MX 240	Cons. Diesel	1,488	0,552	1,138	0,901	154,15	1997	242
MXM 155	CNH Diesel	1,472	0,569	1,017	0,955	98,10	2200	271
MXU 110	CNH Diesel	1,490	0,639	1,115	0,863	76,70	2201	258
MXU 125	CNH Diesel	1,490	0,639	1,108	0,861	81,60	2200	261
Puma 165	CNH Diesel	1,618	0,636	1,168	0,818	104,20	2200	284
Puma 180	CNH Diesel	1,511	0,636	1,134	0,864	118,30	2200	260
Puma 195	CNH Diesel	1,484	0,636	1,106	0,864	127,70	2200	269
Puma 210	CNH Diesel	1,367	0,636	1,066	0,909	142,00	2200	260
Steiger 330	CNH Diesel	1,435	0,701	1,131	0,900	213,09	2000	253
Steiger 380	Iveco	1,418	0,600	1,126	0,900	258,76	2000	254
Steiger 430	Iveco	1,451	0,700	1,141	0,900	286,79	2000	250
Steiger 480	Cummins	1,442	0,653	1,126	0,900	319,91	1998	251
Steiger 530 Qd	Cummins	1,484	0,670	1,129	0,857	353,20	2100	249
STX 450	Cummins	1,517	0,550	1,134	0,850	298,76	2000	236
STX 450 Qd	Cummins	1,507	0,550	1,128	0,800	297,64	1999	236

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Challenger *²								
MT 425	Perkins	1,294	0,591	1,010	0,955	40,90	2200	309
MT 635	Sisu	1,430	0,614	1,067	0,886	122,00	2200	266
MT 645	Sisu	1,361	0,591	1,018	0,909	135,16	2200	266
MT 765	Caterpillar	1,560	0,668	1,152	0,834	193,36	2100	252
MT 835	Caterpillar	1,548	0,620	1,173	0,810	227,56	2099	235
MT 845C	Caterpillar	1,546	0,500	1,132	0,810	291,41	2100	263
MT 965B	Caterpillar	1,569	0,620	1,139	0,833	328,35	2100	270
MT 975B	Caterpillar	1,551	0,618	1,128	0,833	386,39	2100	270
Fendt *³								
Fendt 410	Deuts	1,564	0,597	1,127	0,858	63,70	2100	252
Fendt 411	Deuts	1,524	0,572	1,122	0,881	71,60	2100	255
Fendt 412	Deuts	1,519	0,572	1,080	0,857	80,00	2100	249
Fendt 712	Deuts	1,410	0,714	1,077	0,906	82,00	2099	266
Fendt 714	Deuts	1,411	0,667	1,056	0,856	95,20	2100	263
Fendt 716	Deuts	1,437	0,669	1,082	0,906	105,50	2100	264
Fendt 815	Deuts	1,571	0,619	1,139	0,857	99,00	2100	269
Fendt 817	Deuts	1,527	0,62	1,084	0,856	109,30	2100	265
Fendt 818	Deuts	1,442	0,667	1,061	0,856	120,30	2099	267
Fendt 918	MAN	1,306	0,697	1,095	0,884	124,60	2151	232
Fendt 920	MAN	1,314	0,791	1,059	0,838	137,30	2151	233
Fendt 924	MAN	1,373	0,666	1,097	0,889	153,00	2250	241
Fendt 926	MAN	1,529	0,624	1,105	0,844	180,50	2250	238
John Deere *⁴								
John Deere 7130	John Deere	1,471	0,630	1,152	0,826	76,05	2301	282
John Deere 7220	John Deere	1,487	0,565	1,070	0,848	72,47	2300	270
John Deere 7720	John Deere	1,572	0,669	1,128	0,812	105,81	2099	245
John Deere 7820	John Deere	1,571	0,547	1,114	0,881	116,74	2101	255
John Deere 7920	John Deere	1,524	0,547	1,126	0,833	127,71	2100	260
John Deere 8110	John Deere	1,482	0,455	1,138	0,909	123,33	2200	249
John Deere 8210	John Deere	1,494	0,500	1,146	0,909	139,66	2200	246
John Deere 8220	John Deere	1,547	0,637	1,163	0,864	142,58	2200	247
John Deere 8230	John Deere	1,400	0,715	1,142	0,857	151,87	2100	235
John Deere 8310	John Deere	1,498	0,500	1,142	0,909	154,55	2200	241
John Deere 8320	John Deere	1,457	0,591	1,134	0,886	162,95	2200	246
John Deere 8410	John Deere	1,467	0,523	1,140	0,909	176,57	2200	239
John Deere 8420	John Deere	1,466	0,545	1,144	0,909	175,58	2200	249
John Deere 8520	John Deere	1,507	0,591	1,142	0,910	191,26	2200	250
Massey Ferguson *⁵								
MF 6490	Sisu	1,447	0,532	1,032	0,908	104,90	2204	267
MF 6495	Sisu	1,410	0,636	1,064	0,903	116,40	2200	264
MF 6497	Sisu	1,456	0,659	1,146	0,909	136,00	2200	268
MF 6499	Sisu	1,438	0,659	1,138	0,909	141,60	2200	267
MF 7465	Perkins	1,473	0,638	1,101	0,819	72,10	2199	288

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
MF 7485	Sisu	1,512	0,500	1,080	0,864	95,40	2199	277
MF 7495	Sisu	1,447	0,659	1,073	0,863	117,10	2201	274

Транспортне машинобудування

MF 8220	Perkins	1,358	0,624	1,043	0,952	101,00	2194	278
MF 8240	Sisu	1,404	0,638	1,061	0,913	109,00	2196	274
MF 8245	Sisu	1,430	0,614	1,062	0,886	122,63	2200	266
MF 8250	Sisu	1,374	0,555	1,029	0,870	120,10	2212	255
MF 8260	Sisu	1,361	0,591	1,018	0,909	135,16	2200	266
MF 8270	Sisu	1,450	0,636	1,055	0,864	153,20	2200	268
MF 8280	Sisu	1,481	0,594	1,057	0,866	168,90	2200	268
MF 8450	Sisu	1,451	0,545	1,128	0,908	139,10	2201	258
MF 8460	Sisu	1,389	0,637	1,135	0,909	153,40	2201	250
MF 8470	Sisu	1,400	0,681	1,091	0,909	170,40	2201	263
MF 8480	Sisu	1,384	0,547	1,087	0,910	183,70	2199	263
New Holland *⁶								
NH TM 150	New Holland	1,482	0,635	1,055	0,843	92,50	2201	273
NH TM 155	CNH Diesel	1,472	0,569	1,017	0,955	98,10	2200	271
NH TM 165	New Holland	1,487	0,564	1,030	0,922	107,00	2300	274
NH TM 175	CNH Diesel	1,418	0,682	1,063	0,818	112,80	2200	268
NH TM 190	CNH Diesel	1,417	0,684	1,052	0,814	122,00	2199	264
NH TG 210	Cons. Diesel	1,643	0,568	1,128	0,886	129,07	2200	288
NH TG 215	CNH Diesel	1,585	0,683	1,202	0,818	132,65	2200	279
NH TG 230	Cons. Diesel	1,633	0,615	1,118	0,818	144,22	2200	284
NH TG 245	CNH Diesel	1,621	0,682	1,208	0,909	151,57	2200	278
NH TG 255	Cons. Diesel	1,606	0,545	1,136	0,902	161,43	2200	245
NH TG 275	CNH Diesel	1,595	0,660	1,209	0,864	168,36	2200	270
Valmet *⁷								
Valmet 8150	Valmet	1,390	0,545	1,037	0,886	81,50	2200	271
Valmet 8550	Valmet	1,355	0,566	1,024	0,944	105,60	2200	260
White *⁸								
White 6410	Cummins	1,397	0,637	1,069	0,864	52,50	2200	297
White 6510	Cummins	1,346	0,681	1,031	0,864	63,68	2200	281
White 6710	Cummins	1,420	0,682	1,067	0,818	71,30	2200	275
White 6810	Cummins	1,384	0,682	1,079	0,863	82,86	2201	272
White 8410	Cummins	1,377	0,704	1,066	0,864	109,03	2200	254
White 8510	Cummins	1,368	0,569	1,024	0,955	122,58	2200	277
White 8610	Cummins	1,437	0,591	1,085	0,955	137,43	2200	266
White 8710	Cummins	1,466	0,591	1,103	0,932	152,37	2200	273
White 8810	Cummins	1,242	0,681	1,024	0,955	169,98	2200	271
Buhler Versatile *⁹								
Versatile 2145	New Holland	1,489	0,674	1,135	0,857	110,10	2100	265
Versatile 2160	New Holland	1,534	0,657	1,129	0,810	122,90	2100	260
Versatile 2180	New Holland	1,552	0,652	1,079	0,799	138,60	2100	233
Versatile 2210	New Holland	1,475	0,633	1,057	0,869	158,40	2100	236
Versatile 2360	Cummins	1,457	0,667	1,158	0,857	224,70	2100	255

*¹ – Case IH – Case United Kingdom Limited, United Kingdom (Великобританія);

*² – Challenger – AGCO Corporation, United Kingdom (Великобританія);

*³ – Fendt – AGCO GmbH & Co., Germany (Германія);

*⁴ – John Deere – John Deere Tractor Works, USA (США);

*⁵ – MF – AGCO S.A., France (Франція);

*⁶ – New Holland – New Holland UK Ltd., United Kingdom (Великобританія);

*⁷ – Valmet – Sisu Tractors Inc., Finland (Фінляндія);

*⁸ – White – AGCO Corporation, USA (США);

*⁹ – Buhler Versatile – Buhler Versatile Inc., Canada (Канада).

Выводы

1. Зарубежные тракторные дизельные двигатели представляют собой ДПМ, у которых запас крутящего момента составляет 20...65%.
2. Согласно экспериментальным данным максимальная мощность ДПМ развивается при частоте вращения в пределах 80...96% от номинальной, а запас по мощности достигает 20%.
3. Аппроксимацию внешней скоростной характеристики целесообразно проводить по методике [1], перенеся центр параболы в точку начала линейного участка регуляторной характеристики (ω_p, M_p), которая имеет частоту вращения на 1,1...4,7% выше номинальной и момент в 1,172...1,179 раз меньше номинального.
4. Регуляторная ветвь аппроксимируется прямой от начала линейного участка ω_p до частоты холостого хода ω_x , которая в конце линейного возрастает на 1,4...8,0%.

Литература: 1. Кутьков Г.М., Сидоров В.Н. Аппроксимация корректорного участка регуляторной характеристики дизеля // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 8. – С. 27–30. 2. Городецкий К.И., Титов А.И. Предпосылки формирования рабочих скоростей сельскохозяйственных тракторов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 11. – С. 30–33. 3. Липкович Э.И., Бобряшов А.П. Двигатели постоянной мощности и регулируемый гидропривод в тракторной трансмиссии // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 10. – С. 17–19. 4. Гоц А.Н. Моделирование регуляторных характеристик дизеля на стадии проектирования // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 3. – С. 19–22.

Ребров О.Ю.

ЗОВНІШНІ ШВИДКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАКТОРНИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Наведений аналіз зовнішніх швидкісних характеристик закордонних тракторних дизельних двигунів і їх експериментальні дані. Запропонована уточнена методика аппроксимації зовнішньої швидкісної характеристики двигунів сталої потужності.

Rebrov A.Yu.

CONSTANT POWER TRACTORS DIESEL ENGINE SPEED OPERATING CHARACTERISTICS

This article presents the analysis of tractor diesel engine speed operating characteristics and experimental data over it. It is proposed tolerant approximation method for constant power diesel engine speed operating characteristics.
