

**Б.Г. Мартынов, О.А. Михайлов, А.В. Козленок**

## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ**

*Введение.* Особенность работы лесопромышленных тракторов (ЛПТ) связана с преодолением широкого диапазона внешних сопротивлений при высокой частоте их изменения, что и привело к замене механических ступенчатых трансмиссий (МТ) прогрессивными трансмиссиями (гидростатическими и гидродинамическими). Колебания касательной силы тяги ЛПТ (относительно средней загрузки) для многих видов работ достигают 35 % и более. Отечественные ЛПТ оснащены дизельными двигателями с низкими коэффициентами запаса по крутящему моменту ( $K_3$ ). В 1948 г. Е.М. Харитончиком [Харитончик, 1980] для дизеля С-80 трактора ЧТЗ С-64 был разработан и испытан корректор, обеспечивающий обогащенную цикловую подачу топлива. Это позволило повысить  $K_3$  до 1,6. Такой дизель назван двигателем постоянной мощности (ДПМ). Эта идея получила развитие в 70–80-х гг. с появлением систем электронного впрыска. Использование ДПМ с МТ на трелевочных тракторах ОТЗ позволило значительно повысить транспортную производительность на грузовом ходу, улучшить топливную экономичность, сократить количество передач в трансмиссии и уменьшить потери на буксование [Михайлов, 1986].

В данной статье приведены особенности взаимодействия ДПМ с гидродинамическими трансмиссиями, а именно – с гидротрансформаторами (ГТР). Объект исследования – двигатели постоянной мощности с гидродинамическими трансмиссиями.

*Методика и результаты исследования.* В табл. 1 приведены технические характеристики дизелей устанавливаемых на современные промышленные и лесопромышленные машины. Как видим, дизели имеют высокие значения  $K_3$ , в то время как параметры ГТР и в первую очередь их нагружающие свойства (величина и характер протекания энергоемкости,  $\lambda_{\max}/\lambda_{\min}$ ) остались неизменными. Однако такие нагружающие характеристики не соответствуют изменившимся параметрам дизелей (увеличенные  $K_3$ ). Проиллюстрируем это на конкретных примерах: двух дизелей – Д-260.9 с  $K_3 = 1,15$  и Д-260.9S2 с  $K_3 = 1,3$ , применяемых на ЛПТ «Амкодор», полная безразмерная характеристика их ГТР приведена в табл. 2, и двух зарубежных дизелей CAT 3300 с  $K_3 = 1,2$  и CAT 3304 с  $K_3 = 1,49$ , полная безразмерная характеристика их ГТР приведена в табл. 3.

Таблица 1

**Моторно-трансмиссионные установки современных лесных скиддеров**

Фирма/модель	Двигатель	N <sub>e<sub>n</sub></sub> кВт	мин <sup>-1</sup> при N <sub>e<sub>n</sub></sub>	M <sub>e<sub>max</sub></sub> , Нм	мин <sup>-1</sup> при M <sub>e<sub>max</sub></sub>	Коэффициент		Тип транс- миссии	КП вп/наз	ГТР	Прозрач- ность
						запаса, K <sub>з</sub>	оборотов a				
Caterpillar 517	3304DIT	70	2200	572	1200	1,47	0,54	ГМТ	3/3	T6 1300-400 MS	1,25
Caterpillar 527	3304DITA	112	2200	738	1200	1,49	0,54	ГМТ	3/3	E3610	1,3
Caterpillar 525C	C7ACERT	136	1800	896	1400	1,24	0,77	ГМТ	5/3	–	
Caterpillar 535C	C7ACERT	152	1800	957	1400	1,18	0,77	ГМТ	5/3		
КМС 1400, 1500,1600	Cummins 4 BTA turbochargedengine	97	2 500	452	1500	1,22	0,6	ГМТ	3/3	TwinDisc	1,5
КМС 2400,2500,2600	CUMMINS 6BTA5.9	123	2 200	694	1500	1,3	0,68	ГМТ	4/4		1,5
Онежец- 300,320,330	Д-245.2S2	90	2200	501	1600	1,28	0,7272	ГТР	3/1	НАТИ 390	1,712
Amcodor 2243	Д-260.1	114	2100	622	1400	1,21	0,66	ГМТ	4/4	ГМП У35615	1,38
LKT82	IVECO 45 MNTX 20.00	92	2200	525	1250	1,31	0,56	ГМТ	6/4	–	1,3
John Deere 540G-III548G-III	JD Power TechPlus 6068	96	2200	537	1400	1,33	0,636	МТ	8/7	–	
John Deere 640H 648H	JD Power TechPlus 6068	128	2200	768	1400	1,38	0,636	МТ	8/7		
John Deere 848H	JD Power TechPlus 6068	149	2200	817	1400	1,26	0,636	ГМТ	6/3	Clark	1,35
Кировец К-703М	ЯМЗ-8423	184	1900	1110	1400	1,2	0,737	ГМТ	16/8	ЛГ-470	1,149
МЛ 107	ЯМЗ 238Д	243	2100	1225	1400	1,35	0,737	ГМТ	4/4	СКБМ	2,1

Б.Г. Мартынов, О.А. Михайлов, А.В. Козленок

Таблица 2

**Полная безразмерная характеристика исходного малопрозрачного ГТР для дизелей Д-260.9 и Д-260.9S2**

$i$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,446	0,5	0,6	0,69	0,7	0,8	0,864	0,9	0,915
$k$	3,38	2,96	2,58	0,267	1,96	1,842	1,704	1,483	1,315	1,297	1,103	0,955	0,955	0,909
$\eta$	0	0,296	0,516	0,68	0,784	0,818	0,852	0,89	0,907	0,908	0,882	0,859	0,895	0,909
$\lambda \cdot 10^6$	1,6	1,7	1,775	1,85	1,912	1,925	1,925	1,9	1,83	1,825	1,515	1,279	0,925	0,715

Таблица 3

**Полная безразмерная характеристика исходного малопрозрачного ГТР Caterpillar**

$i$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,72	0,8	0,86
$k$	2,25	2,1	1,95	1,79	1,634	1,475	1,316	1,158	1,139	0,995	0,85
$\eta$	0	0,22	0,39	0,537	0,654	0,738	0,789	0,81	0,82	0,8	0,73
$\lambda \cdot 10^6$	1,271	1,233	1,195	1,158	1,121	1,083	1,045	1,008	1	0,97	0,95

На графиках (рис. 1,а,б) приведены совместные работы данных установок с исходными малопрозрачными ГТР.

Сравнительные выходные характеристики обеих установок рассчитаны и приведены на графиках (рис. 2,а,б). Анализ выходных характеристик показывает, что увеличение  $K_3$  (как от 1,15 до 1,3, так и от 1,2 до 1,49) практически не приводит к увеличению выходной мощности. Это объясняется тем, что режимы работы малопрозрачного ГТР с данными дизелями лежат в узком диапазоне частоты вращения коленчатого вала (КВ), в зоне максимальной мощности дизеля (см. рис. 1,а,б). Такой характер совместной работы не позволяет реализовывать увеличенный крутящий момент этих дизелей и поэтому не может реализовать их «полку» по мощности. Отсюда следует, что для реализации полной характеристики дизеля с увеличенным  $K_3$  необходим ГТР с другим характером нагружающих характеристик.

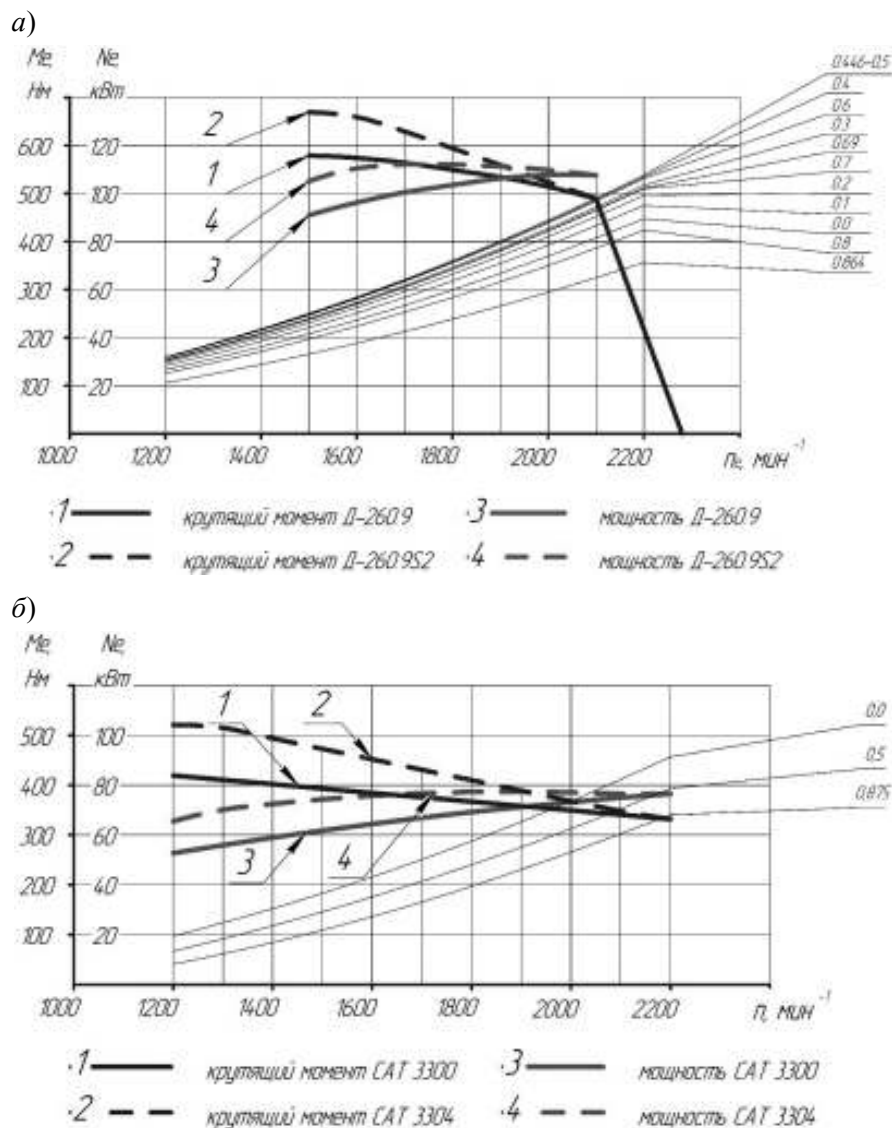


Рис. 1. Совместная работа дизелей Д-260.9, Д-260.9S2 (а) и САТ 3300, САТ 3304 (б) с исходным малопрозрачным ГТР

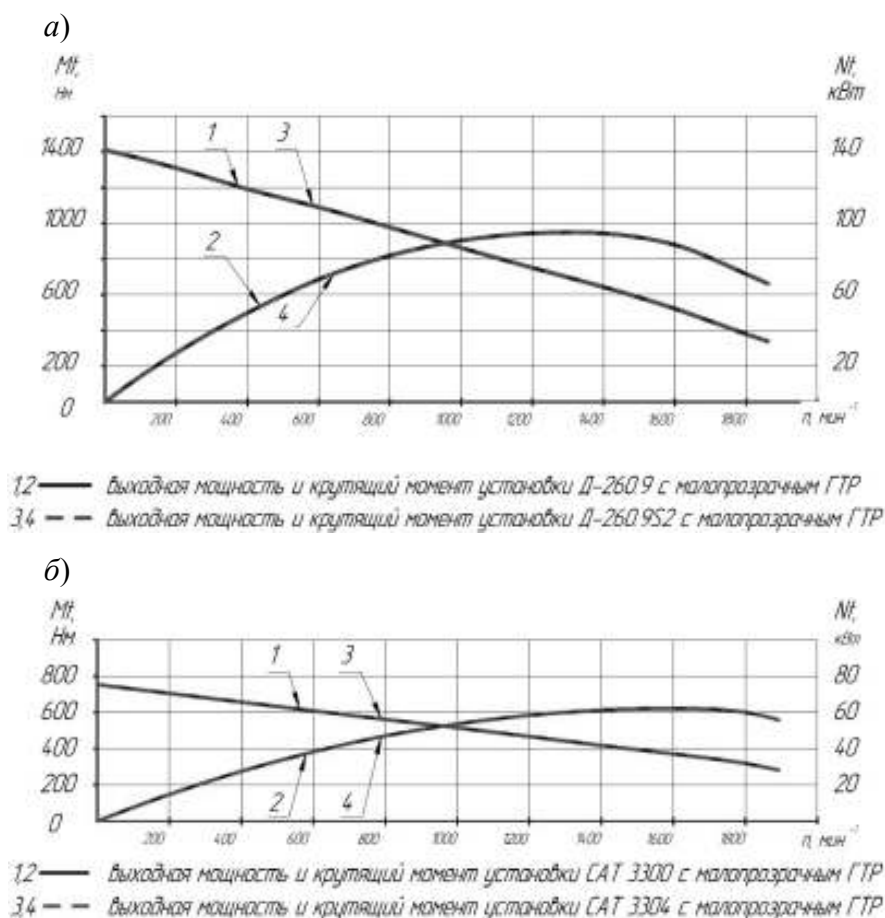


Рис. 2. Выходные характеристики установок Д-260.9, Д-260.9S2 (а) и САТ 3300, САТ 3304 (б) с исходным малопрозрачным ГТР

Теоретические вопросы определения нагружающих характеристик ГТР, позволяющих наилучшим образом использовать мощность дизелей ранее были поставлены в работах [Довжик, 1974; Куликов, 1952]. Однако в то время, по существу, еще не было ДПМ и, кроме того, в расчетных моделях применялись линеаризованные характеристики коэффициента трансформации ( $k$ ), а скоростная характеристика дизеля аппроксимировалась в упрощенном виде по формуле Лейдермана, которая не может адекватно описать характеристику ДПМ:

$$N_{\max} = \frac{N_E}{a \left( \frac{w_{\max}}{w_N} \right) + b \left( \frac{w_{\max}}{w_N} \right)^2 + c \left( \frac{w_{\max}}{w_N} \right)^3}, \quad (1)$$

где  $a, b, c$  – эмпирические коэффициенты;  $w_{\max}$  – максимальная частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $w_N$  – частота вращения коленчатого вала соответствующая  $N_{\max}$ ,  $\text{мин}^{-1}$ .

Нами предложен способ оптимизации нагружающих характеристик ГТР с использованием реальных стендовых характеристик дизелей и ГТР.

Для реализации методики создана компьютерная программа, позволяющая быстро и точно определять оптимальные режимы совместной работы ДПМ и ГТР. Используя программу, мы рассчитали оптимальные нагружающие характеристики для дизелей Д-260.9 и Д-260.9S2. Расчеты проводились на основании технических характеристик ГТР с активным диаметром 0,37 м (см. табл. 2). Полученные нагружающие характеристики приведены на рис. 3, там же приведена нагружающая характеристика исходного малопрозрачного ГТР. На рис. 4 приведены выходные характеристики установок с дизелями Д-260.9, Д-260.9S2 с оптимальными и исходным малопрозрачным ГТР.

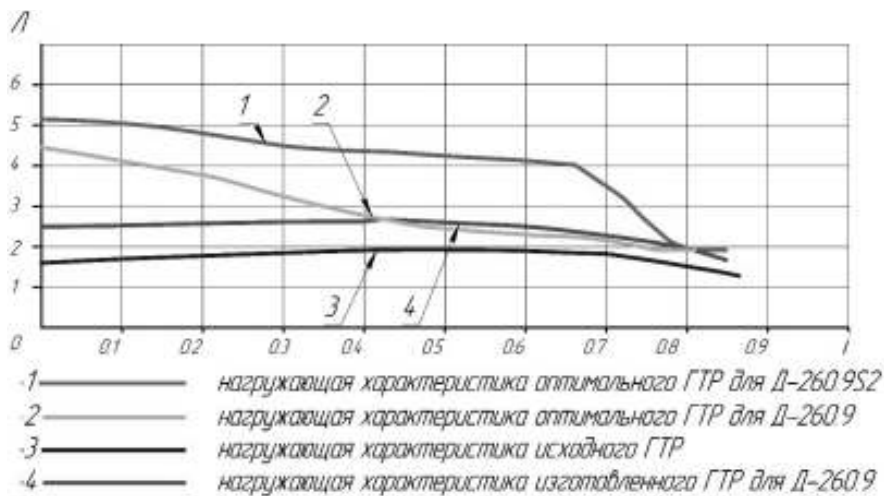


Рис. 3. Нагружающие характеристики оптимальных и исходного ГТР

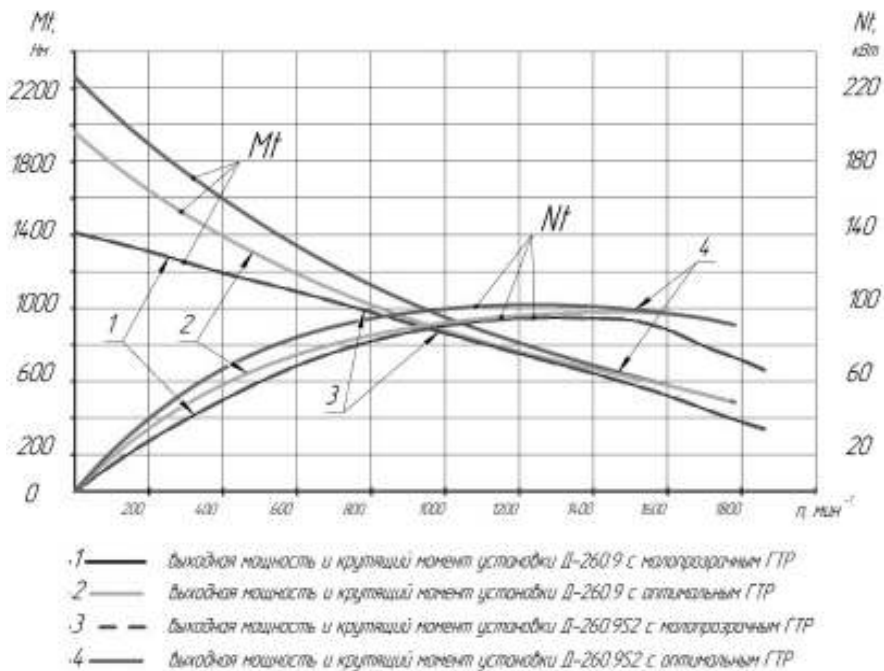


Рис. 4. Выходные характеристики установок с Д-260.9, Д-260.9S2 с оптимальными и исходным малопрозрачным ГТР

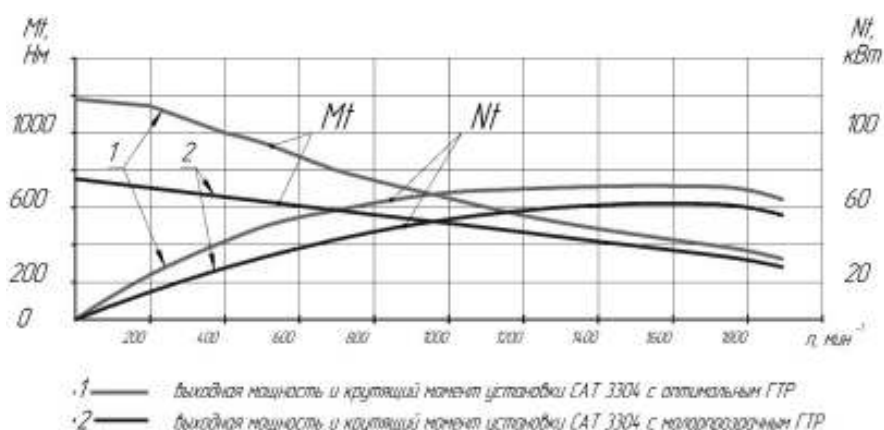


Рис. 5. Выходные характеристики установки САТ 3304 с оптимальным и исходным малопрозрачным ГТР

Как видим из графика (рис. 4), оптимизация нагружающих характеристик ГТР для дизеля с  $K_3 = 1,15$  дала выигрыш по мощности во всем диапазоне частоты вращения турбины от 2 до 9 кВт (максимальный выигрыш составляет 17 %) и увеличение крутящего момента во всем диапазоне оборотов турбины от 2 до 549 Нм.

Для дизеля с  $K_3 = 1,3$  применение ГТР с оптимальной нагружающей характеристикой дает увеличение выходной мощности во всем диапазоне частоты вращения турбины от 2 до 17 кВт (максимальный выигрыш составляет 34 %) и увеличение крутящего момента во всем диапазоне оборотов турбины от 2 до 853 Нм.

Анализ результатов показывает, что применение оптимальных нагружающих характеристик ГТР позволяет увеличить выходную мощность при переходе от дизеля с малым  $K_3$  к большему. Переход от дизеля с  $K_3 = 1,15$  к  $K_3 = 1,3$  дает выигрыш по мощности от 2 до 10 кВт в диапазоне частот вращения турбины от 0 до  $1680 \text{ мин}^{-1}$  (максимальный выигрыш составляет 13 %), с учетом одинаковых номинальных мощностей этих дизелей.

По этой же методике рассчитана оптимальная нагружающая характеристика ГТР для дизеля САТ 3304 с  $K_3 = 1,49$ . Выходные характеристики с оптимальным и исходным ГТР приведены на рис. 5.

Из графика (рис. 5) видим, что оптимизация нагружающих характеристик позволила увеличить выходную мощность во всем диапазоне частот вращения турбины от 2 до 16 кВт (максимальный выигрыш составил 43 %) и увеличение крутящего момента во всем диапазоне оборотов турбины от 2 до 412 Нм.

По приведенным данным можно сделать вывод, что чем выше  $K_3$ , тем выше эффект достигается от использования оптимальной нагружающей характеристики. Также стоит обратить внимание, что чем больше  $K_3$ , тем большая прозрачность ГТР необходима.

Таблица 4

**Безразмерная характеристика изготовленного ГТР для дизеля Д-260.9**

$i$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,446	0,5	0,6	0,69	0,7	0,8	0,864	0,9	0,94
$k$	3,38	2,96	2,58	0,267	1,96	1,842	1,704	1,483	1,315	1,297	1,103	0,995	0,994	0,994
$\eta$	0	0,296	0,56	0,68	0,784	0,801	0,852	0,89	0,908	0,908	0,882	0,844	0,895	0,934
$\lambda \cdot 10^6$	2,495	2,525	2,575	2,613	2,625	2,68	2,6	2,5	2,275	2,25	1,95	1,675	1,35	0,925

Вышеприведенный анализ показал, что для реализации оптимальных характеристик ГТР должен обладать полной прозрачностью: 2,32 для дизеля с  $K_3 = 1,15$  и 2,68 для дизеля с  $K_3 = 1,3$ . В силу особенностей КПД ГТР на режимах низких  $i$  за рабочую зону принимается участок с КПД не ниже 80 %. Для исходного ГТР рабочая зона находится в диапазоне  $i = 0,4-0,848$ .

Поэтому при формулировании ТУ на модернизацию ГТР необходимо выдержать параметры нагружающей характеристики в этом диапазоне.

Следовательно, для дизеля с  $K_3 = 1,15$  ГТР должен обладать прозрачностью 1,45 в рабочем диапазоне ( $i = 0,4-0,848$ ) и  $\lambda_{\max} = 2,77$  при  $i = 0,4$ , а для дизеля с  $K_3 = 1,3$  необходима прозрачность 2,27 в рабочем диапазоне ( $i = 0,4-0,848$ ) и  $\lambda_{\max} = 4,36$  при  $i = 0,4$ .

Рассчитанные оптимальные нагружающие характеристики позволили нам сформулировать требования к ГТР для дизеля с  $K_3 = 1,15$ .

По данным ТУ тракторным отделом Института стали была спроектирована, изготовлена и испытана лопаточная система в пределах того же активного диаметра  $D_a = 0,37$  м. Полная безразмерная характеристика этого ГТР приведена в табл. 4, а на рис. 3 изображена его нагружающая характеристика (в сравнении с ранее найденными оптимальными нагружающими характеристиками и характеристикой исходного малопрозрачного ГТР). Выходная характеристика приведена на рис. 6.

Из графика (рис. 6,а) видим, что изготовленный ГТР, по сравнению со старым дает увеличение мощности во всем диапазоне частоты вращения турбины от 2 до 15 кВт (максимальный выигрыш составляет 17 %), увеличение крутящего момента во всем диапазоне оборотов турбины от 2 до 392 Нм и незначительно уступает оптимальному в зоне низких  $i$ .

Для дизеля с  $K_3 = 1,3$  проводятся работы по модернизации. Тем не менее расчеты показали (рис. 6,б), что новый ГТР, по сравнению с исходным, дает увеличение по мощности во всем диапазоне оборотов турбины – от 2 до 16 кВт (выигрыш составляет 18 %).



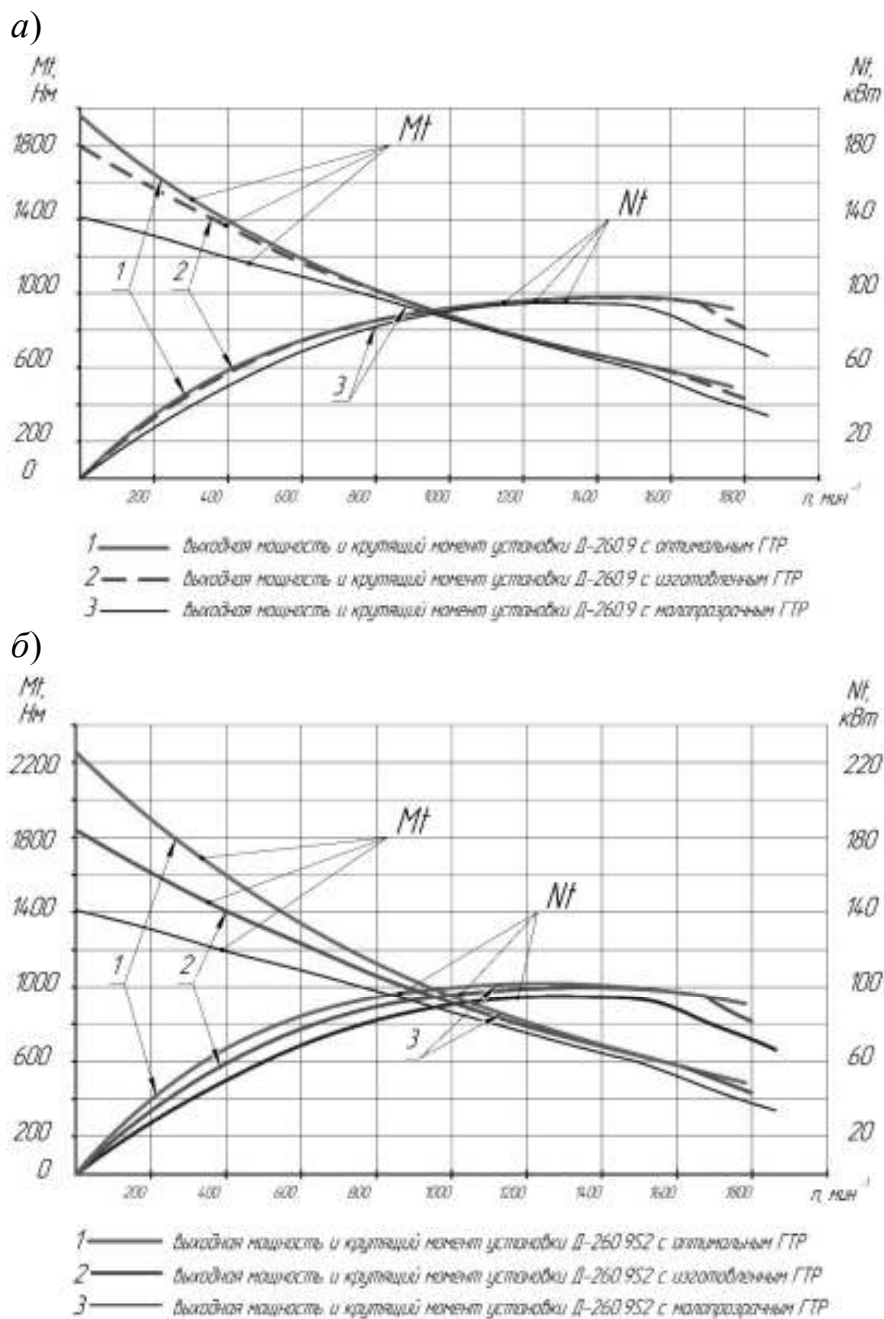


Рис. 6. Выходные характеристики установок Д-260.9 ( $K_3 = 1,15$ ) – а, Д-260.9S2 ( $K_3 = 1,3$ ) – б с исходным малопрозрачным, оптимальным и изготовленным ГТР

**Выводы.** Широко применяемые на современных отечественных и зарубежных ЛПТ гидродинамические трансмиссии являются перспективными в силу автоматического регулирования тяги и скорости при изменении внешней нагрузки и высокого защитного демпфирующего свойства, обеспечивающего высокую надежность машин. В то же время наблюдается тенденция появления дизелей с высокими  $K_3$ , имеющими постоянную мощность в широком диапазоне частоты вращения КВ, так называемые ДПМ.

Применяемые в настоящее время малопрозрачные ГТР не позволяют реализовать повышенные мощностные свойства дизелей. Это обстоятельство требует поиска нового подхода к выбору параметров ГТР (в первую очередь, к поиску нагружающих характеристик ГТР) для работы с современными ДПМ.

Разработана методика определения оптимальных нагружающих характеристик ГТР с учетом параметров ДПМ и КПД исходного ГТР. На основе этой методики определены оптимальные нагружающие характеристики для дизелей с различными  $K_3$  от 1,15 до 1,49. Установлено, что использование найденных нагружающих характеристик дает повышение выходной мощности по сравнению с существующими, в то же время чем больше величина  $K_3$  дизеля, тем больший эффект от применения ГТР с оптимальной нагружающей характеристикой.

На основе данной методики нами разработаны технические требования на модернизацию ГТР, применяемых на конкретной ЛПТ фирмы Амкодор. Изготовленный ГТР дал повышение мощности на выходной характеристике при работе с дизелем с  $K_3 = 1,15$  до 17 % и с дизелем с  $K_3 = 1,3$  до 18 %.

### Библиографический список

*Харитончик Е.М.* Теоретические основы методов повышения эффективности тракторов с двигателями постоянной мощности // Сборник научных трудов Воронежского сельскохозяйственного института. Т. 109. 1980. С. 5–18.

*Михайлов О.А.* Улучшение тягово-скоростных свойств трелевочного трактора и снижение энергоемкости трелевки путем увеличения приспособляемости дизеля: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛТА, 1986. 198 с.

*Довжик В.Л.* Оптимальные нагружающие характеристики гидротрансформаторов промышленных тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 1974. № 1. С. 10–12 с.

*Куликов Н.К.* Оптимизация режимов работы ДВС и ГТР // Автомобильная промышленность. 1952. № 5.

### Bibliography

*Kharitonchik E.M.* Teoreticheskie osnovy metodov povysheniia effektivnosti traktorov s dvigateliami postoiannoii moshchnosti. *Sbornik nauchnykh trudov Voronezhskogo sel'skokhoziaistvennogo instituta*. T. 109. 1980. S. 5–18. (Rus)

*Mikhailov O.A.* Uluchshenie tiagovo-skorostnykh svoistv trelevochnogo traktora i snizhenie energoemkosti trelevki putem uvelicheniia prisposobliaemosti dizelia: dis. ... kand. tekhn. nauk. L.: LTA, 1986. 198 s. (Rus)

*Dovzhik V.L.* Optimal'nye nagruzhaiushchie kharakteristiki gidrotransformatorov promyshlennykh traktorov. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 1974. № 1. S. 10–12 s. (Rus)

*Kulikov N.K.* Optimizatsiia rezhimov raboty DVS i GTR. *Avtomobil'naia promyshlennost'*. 1952. № 5. (Rus)

**Мартынов Б.Г., Михайлов О.А., Козленок А.В.** Повышение производительности лесозаготовительных машин путем оптимизации параметров гидродинамической трансмиссии // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2015. Вып. 210. С. 119–130.

Рассмотрены тенденции развития моторно-трансмиссионных установок современных лесопромышленных машин. Показано, что сегодня широкое распространение находят двигатели постоянной мощности (ДПМ) с повышенным коэффициентом запаса крутящего момента ( $K_z$ ). Установлено, что для реализации этих повышенных свойств ДПМ необходимо и целесообразно применение гидротрансформаторов с существенно скорректированными нагружающими свойствами. На основе разработанной методики определены оптимальные нагружающие характеристики ГТР, показана высокая эффективность их применения.

**Ключевые слова:** лесопромышленные тракторы, коэффициент запаса крутящего момента, гидротрансформаторы.

**Martynov B.G., Mikhailov O.A., Kozlenok A.V.** Improving performance of forest machines by optimization their hydrodynamic transmissions. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehneskoj Akademii*, 2015, is. 210, pp. 119–130 (in Russian with English summary).

The development trend of engines and powertrains of modern forest industry machines is discussed in this paper. It is shown that nowadays widespread engines are constant power ones with an increased torque rise factor, it is found that for the implementation of these properties it is necessary and appropriate to use torque converters with significantly adjusted properties. Based on the methodology developed by the authors of this article the optimal characteristics of torque converters have been found and high efficiency of their application has been shown. The material in this work can be used in the educational process of students and teachers of higher educational institutions, and in design departments which produce forest machines.

**Key words:** forest machines, torque rise, torque converters.

---

**МАРТЫНОВ Борис Григорьевич** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Эксплуатации транспортных и технологических машин» Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета.

194021, Институтский пер, д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lesbisnes@mail.ru

**MARTYNOV Boris G.** – DSc (Engineering), head of «Maintenance of transport and technological machines» department St. Petersburg State Forest University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: lesbisnes@mail.ru

**МИХАЙЛОВ Олег Андреевич** – кандидат технических наук, доцент  
194021, Институтский пер, д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [lts55@mail.ru](mailto:lts55@mail.ru)

**MIKHAILOV Oleg A.** – PhD (Engineering), Associate Professor, St. Petersburg State Forest University.  
194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: [lts55@mail.ru](mailto:lts55@mail.ru)

**КОЗЛЕНОК Александр Владимирович** – студент лесомеханического факультета Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета.  
194021, Институтский пер, д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [Kozlenok.a.v@gmail.com](mailto:Kozlenok.a.v@gmail.com)

**KOZLENOK Alexander V.** – student of St. Petersburg State Forest University.  
194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: [Kozlenok.a.v@gmail.com](mailto:Kozlenok.a.v@gmail.com)