

УДК 621.863.2

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СТЕНДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЪЕМНОЙ ГИДРОПЕРЕДАЧИ

Г.А. Аврунин, к.т.н., И.Г. Пимонов, к.т.н., И.И. Мороз, ст. преп.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Рассмотрены типовые гидравлические принципиальные схемы объемных гидropередач с разомкнутой и замкнутой цепями циркуляции рабочей жидкости с перечнем необходимых средств измерений для определения выходных параметров и потерь мощности в гидромашинах. Расчетные зависимости позволяют в полной мере определять выходные технические характеристики объемной гидropередачи.

*Ключевые слова:* объемная гидropередача, рабочая жидкость, перепад температуры, информационное табло, потеря мощности.

## РОЗРОБКА МЕТОДИКИ СТЕНДОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБ'ЄМНОЇ ГІДРОПЕРЕДАЧІ

Г.А. Аврунін, к.т.н., І.Г. Пімонов, к.т.н., І.І. Мороз, ст. викл.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Розглянуто типові гідравлічні принципові схеми об'ємних гідropередач з розімкненим і замкнутим ланцюгами циркуляції робочої рідини з переліком необхідних засобів вимірів для визначення вихідних параметрів і втрат потужності в гідромашинах. Розрахункові залежності дозволяють повною мірою визначати вихідні технічні характеристики об'ємної гідropередачі.

*Ключові слова:* об'ємна гідropередача, робоча рідина, перепад температури, інформаційне табло, втрата потужності.

## HYDROSTATIC TRANSMISSION BENCH TESTING PROCEDURE DEVELOPMENT

G. Avrunin, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.),  
I. Pimonov, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.), I. Moroz, Asst. Prof.,  
Kharkiv National Automobile and Highway University

*Abstract.* Standard hydraulic schematic diagrams of hydrostatic transmission systems with open and closed power liquid circuits have been considered. The measuring instruments required to determine output parameters and power losses in hydraulic machines have been listed. The calculation characteristics allow you to fully define output technical specifications of a hydrostatic transmission system.

*Key words:* hydrostatic transmission, power liquid, differential temperature, information display, power loss.

### Введение

Экспериментальные исследования объемной гидropередачи (ОГП) требуют определения целого ряда параметров, их обработки до

значений выходных параметров технической характеристики и последующего анализа. Современные преобразователи параметров – давления, частоты вращения, температуры рабочей жидкости (РЖ), крутящего момента

и т.д. – позволяют вести измерения в режиме реального времени с помощью так называемого информационного табло с визуальным наблюдением на экране персонального компьютера и фиксацией в его памяти. Для создания информационного табло необходим учет требований нормативных документов, регламентирующих параметры испытываемых насосов и гидромоторов (рис. 1), и разработка методики технического диагностирования технического состояния гидропередачи на основе сигнализации о выходе отдельных параметров работы за предельно установленные ограничения для предотвращения аварийных режимов при испытаниях. В частности, к диагностическим параметрам следует отнести перепады температур между отдельными участками ОГП, давления и перепады давлений, изменение потерь мощности и КПД.

### Анализ публикаций

Методы проведения испытаний отдельных гидромашин регламентируются рядом стандартов [1–3], однако при создании и стендовых исследованиях объемной гидропередачи требуется дополнительная информация по определению КПД и потерь мощности на различных скоростных, нагрузочных и температурных режимах, использование которой приводит к внедрению ряда мероприятий, направленных на повышение надежной работы объемного гидропривода.

### Цель и постановка задачи

Целью статьи является разработка рекомендаций по созданию информационного табло для стендовых испытаний ОГП с автоматизацией фиксирования результатов измерений, обработкой результатов измерений в виде параметров потерь мощности и КПД отдельных гидромашин и гидропередачи в целом, а также возможности проведения технического диагностирования состояния гидропередачи путем сигнализация о выходе отдельных параметров работы за предельно установленные ограничения для предотвращения аварийных режимов при испытаниях.

### Разработка методики стендовых исследований

На рис. 2 представлена принципиальная гидравлическая схема стенда для определения КПД ОГП вращательного движения с разо-

мкнутой цепью циркуляции РЖ [4], включающая насос Н с регулируемым рабочим объемом, который приводится во вращение двигателем «м1» и нагнетает РЖ через гидродиспределитель Р к гидромотору М. Из гидромотора РЖ сливается через гидродиспределитель Р, расходомер РА, фильтр Ф и маслоохладитель АТ с приводом вращения вентилятора от электродвигателя «м2» в гидробак Б. Для защиты от перегрузок служит предохранительный клапан КП.

Для измерения крутящего момента на валу насоса служит измеритель момента ИМн (обычно используют электродвигатель в балансирующем исполнении); частоту вращения определяют датчиком ДЧВн.

Нагрузочное устройство НУ (в качестве которого используют тормозные установки различных типов) создает необходимый момент сопротивления валу гидромотора, который измеряют с помощью измерителя ИМм. Для контроля расхода на выходе гидромотора служит расходомер РА. Давление в ОГП контролируют по манометрам МН1...МН3.

На рис. 3 приведена гидравлическая принципиальная схема стендовых испытаний объемной гидропередачи с замкнутой цепью циркуляции РЖ, состоящей из аксиально-поршневого насоса и гидромотора производства ОАО «Гидросила».

В состав ОГП входят блок насоса НП-112ЕР со встроенными гидроцилиндрами Ц1 и Ц2 для перемещения наклонного диска основного насоса Н, насос подпитки и управления Нп, клапан давления КПп, обратные (антикавитационные) клапаны КО1 и КО2 и дроссели ДР1н...ДР3н системы управления, блок гидромотора МП-112, включающий гидромотор с постоянным рабочим объемом М, предохранительные клапаны КП1 и КП2, «промывочный» гидродиспределитель Рп и клапан давления КД.

Блоки насоса и гидромотора соединены рукавами высокого давления РВД1 и РВД2. На всасывании в насос подпитки Нп установлен фильтр Ф с моновакуумметром МН1, в линии слива утечек РЖ из корпусов насоса и гидромотора в гидробак Т установлен маслоохладитель АТ1 с электродвигателем вращения вентилятора Э3.



Рис. 1. Технические параметры насосов и гидромоторов

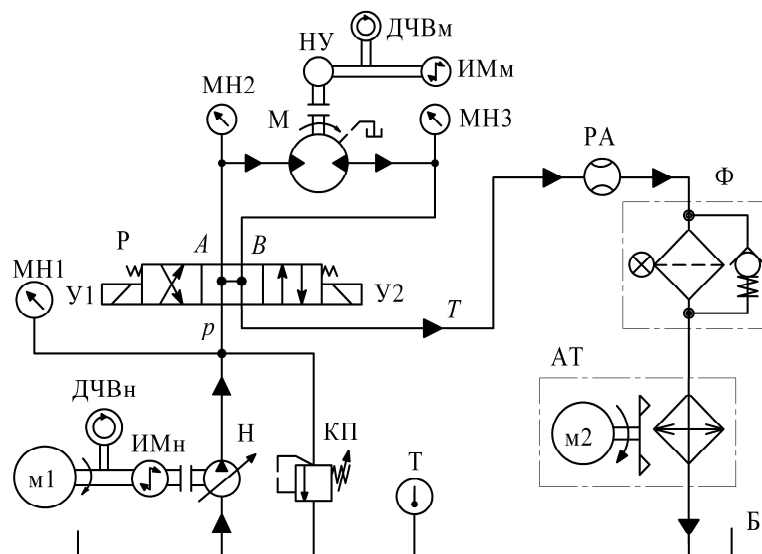


Рис. 2. Гидравлическая принципиальная схема станда для определения КПД ОГП с незамкнутой цепью циркуляции РЖ

Для обеспечения локального охлаждения высоконагруженных деталей гидромашин (поршневых групп и распределительного узла) РЖ из промывочного гидрораспределителя Рп поступает в корпус гидромотора М, затем с помощью РВД 3 (линия сообщения дренажей 1м–1н) – в корпус насоса и далее через отверстие 2н – в маслоохладитель АТ. Стрелками указано направление течения РЖ в основных, подпитки и дренажных магистралях ОГП. Регулирование рабочего объе-

ма, подачи насоса  $Q_n$  и частоты вращения гидромотора  $n_m$  осуществляется путем изменения поочередно электрического сигнала на пропорциональных электромагнитах редукционных клапанов КР1 или КР2. При этом давление редуцирования воздействует на торцевые камеры гидрораспределителя Р1, смещая его золотник вправо или влево и, благодаря этому, сообщая поршневые полости гидроцилиндров с давлением подпитки.

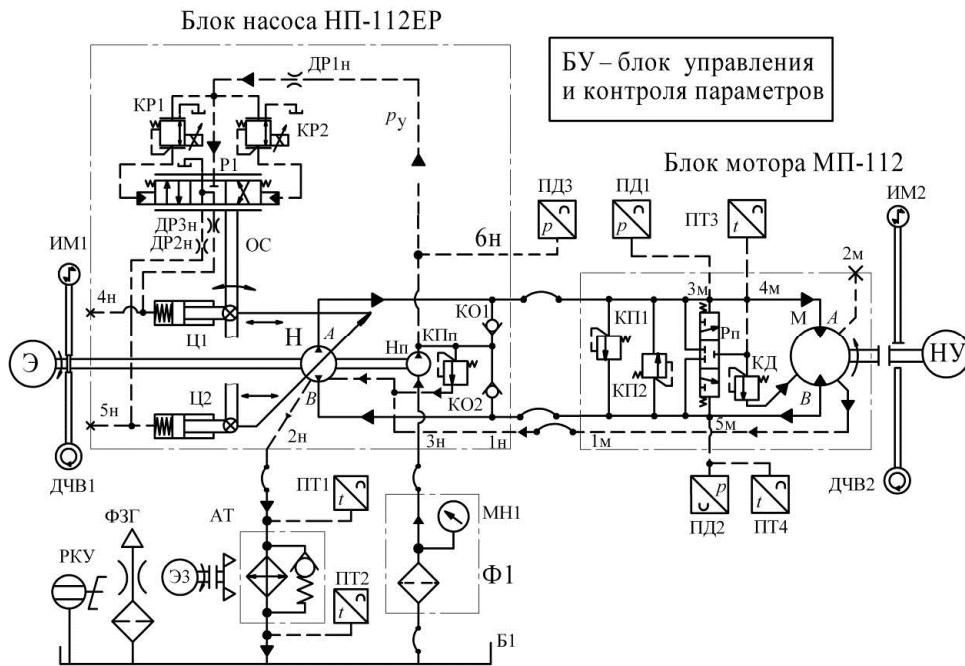


Рис. 3. Гидравлическая принципиальная схема стенда для испытаний объемной гидропередачи с дистанционным пропорциональным управлением (ДПУ) регулятором рабочего объема насоса

Под действием давления подпитки поршни гидроцилиндров Ц1 или Ц2 поочередно перемещают наклонный диск насоса, изменяя рабочий объем насоса по величине и направлению. Создаваемое информационное табло обеспечивает регистрацию рабочих технических параметров гидромашин при испытаниях и их автоматизированную обработку, с

целью получения значений потерь мощности и КПД отдельных гидромашин (насоса и гидромотора) и общего КПД гидропривода согласно действующим стандартам и методическим указаниям [1–4].

На рис. 4 представлен общий вид информационного табло стенда испытаний ОГП.

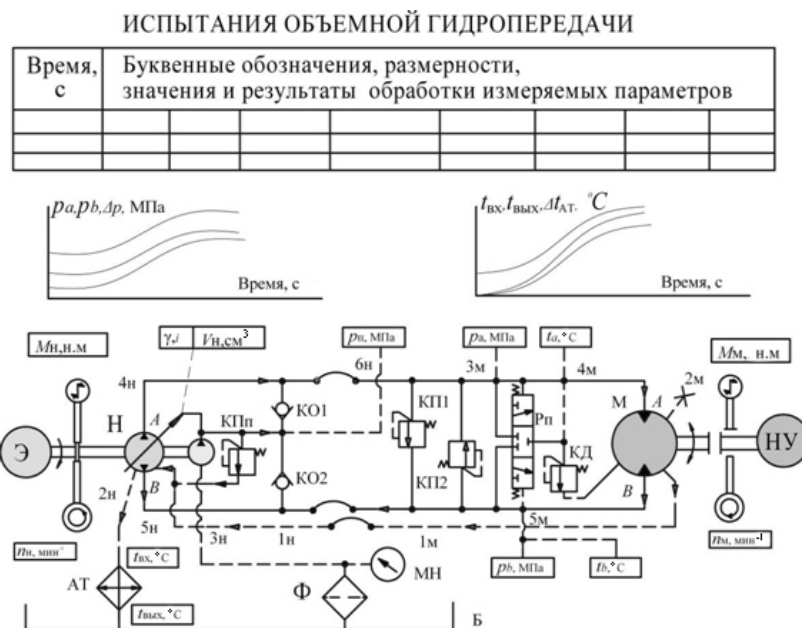


Рис. 4. Общий вид информационного табло стендовых испытаний ОГП с указанием измеряемых и обрабатываемых параметров и типовых графических зависимостей

Измерению и записи на информационное табло подлежат следующие преобразователи параметров работы ОГП:

ПД1 и ПД2 – преобразователи давления в основных магистралях ОГП  $A-A$  и  $B-B$  – до 40 МПа (обозначение на панели  $p_a$  и  $p_b$ );

ПД3 – давление  $p_y$  в линии подпитки и управления регулятором рабочего объема насоса – до 4 МПа (обозначение  $p_y$ );

ПТ1...ПТ4 – преобразователи температуры «минус» 20...100 °С:

ПТ1 – на входе в маслоохладитель АТ (обозначение  $t_{вх}$ );

ПТ2 – на выходе из маслоохладителя АТ (обозначение  $t_{вых}$ );

ПТ3 – в основной магистрали  $A-A$  (обозначение  $t_a$ );

ПТ4 – в основной магистрали  $B-B$  (обозначение  $t_b$ );

ДЧВ1 – преобразователь частоты вращения насоса Н (приводящего электродвигателя Э) в диапазоне 500...2500 мин<sup>-1</sup> (обозначение  $n_n$ );

ДЧВ2 – преобразователь частоты вращения гидромотора М в диапазоне 50...2500 мин<sup>-1</sup> с определением направления (обозначение  $n_m$ );

ИМ1 – измеритель крутящего момента приводящего электродвигателя Э в диапазоне 0...750 Н.м (обозначение  $M_n$ );

ИМ2 – измеритель крутящего момента нагрузочного устройства НУ (тормоза) 0...750 Н.м (обозначение  $M_m$ ).

Расчетные значения параметров при функциональном диагностировании:

перепад давлений –  $\Delta p = |p_a - p_b|$ , МПа;

перепад температур на маслоохладителе АТ –  $\Delta t_{АТ} = t_{вх} - t_{вых}$ ;

перепад температур в основных магистралях  $\Delta t = |t_a - t_b|$ .

Общий КПД ОГП ( $\eta_{огп}$ ) определяют по формуле

$$\eta_{огп} = \frac{P_m}{P_n} = \frac{M_m \cdot n_m}{M_n \cdot n_n}, \quad (1)$$

где  $P_m$  – выходная (полезная) мощность гидромотора, кВт,

$$P_m = \frac{M_m \cdot n_m}{9550}, \quad \text{кВт}, \quad (2)$$

где  $M_m$  – измеренный крутящий момент гидромотора с помощью измерителя ИМ2, Н.м;  $n_m$  – измеренная частота вращения гидромотора с помощью датчика ДЧВ2, мин<sup>-1</sup>;  $P_n$  – входная (потребляемая) мощность насоса, кВт,

$$P_n = \frac{M_n \cdot n_n}{9550}, \quad \text{кВт}, \quad (3)$$

где  $M_n$  – измеренный крутящий момент на валу приводящего электродвигателя с помощью измерителя ИМ1, мин<sup>-1</sup>;  $n_n$  – измеренная частота вращения вала насоса (приводящего электродвигателя) с помощью датчика ДЧВ1, мин<sup>-1</sup>.

Потери мощности в ОГП определяют по формуле

$$\Delta P_{огп} = P_n - P_m, \quad \text{кВт}. \quad (4)$$

Гидромеханический КПД гидромотора  $\eta_{гм.м}$  вычисляют по формуле

$$\eta_{гм.м} = \frac{M_m}{M_{теор}} = \frac{M_m}{0,159 \cdot V_m \cdot \Delta p}, \quad (5)$$

где  $M_m$  – измеренный крутящий момент с помощью измерителя ИМ2, Н.м;  $M_{теор}$  – теоретический крутящий момент

$$M_{теор} = \frac{1}{2 \cdot \pi} V_m \cdot \Delta p = 0,159 \cdot V_m \cdot \Delta p, \quad \text{Н.м}, \quad (6)$$

где  $V_m$  – рабочий объем гидромотора (принимаем по паспорту изделия), см<sup>3</sup>;  $\Delta p = |p_a - p_b|$  – перепад давлений, МПа.

Объемный КПД ОГП определяют по формуле

$$\eta_{огп,об} = \frac{Q_{м.т}}{Q_{н.т}} = \frac{10^{-3} \cdot V_m \cdot n_m}{10^{-3} \cdot V_{н,i} \cdot n_n} = \frac{V_m \cdot n_m}{V_m \cdot n_{м,х.х} \cdot n_n} \quad (7)$$

где  $Q_{м.т} = 10^{-3} \cdot V_m \cdot n_m$  – теоретический расход, потребляемый гидромотором при измеренной частоте вращения  $n_m$  (минимальное полезное значение);  $Q_{н.т} = 10^{-3} \cdot V_{н,i} \cdot n_n$  – теоретическая подача насоса, которая определяется предварительно при работе ОГП в режиме холостого хода, т.е. при минимальных давлении и утечке рабочей жидкости

$$Q_{н.т} = V_{н,i} \cdot n_n = \frac{V_m \cdot n_{м,х.х}}{n_{н,х.х}} n_n, \text{ см}^3/\text{мин}, \quad (8)$$

где  $n_{м,х.х}$  – частота вращения гидромотора в режиме холостого хода,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $n_{н,х.х}$  – частота вращения насоса в режиме холостого хода,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $V_m$  – рабочий объем гидромотора (принимают по паспорту изделия, если предварительно не проводились точные измерения),  $\text{см}^3$ .

А текущее ( $i$ -е) значение рабочего объема насоса вычисляют предварительно по формуле

$$V_{н,i} = \frac{V_m \cdot n_{м,х.х}}{n_{н,х.х}}, \text{ см}^3. \quad (9)$$

Гидромеханический КПД ОГП определяют по формуле

$$\eta_{гм.огп} = \frac{\eta_{огп}}{\eta_{огп.об}}, \quad (10)$$

и далее гидромеханический КПД насоса

$$\eta_{гм.н} = \frac{\eta_{гм.огп}}{\eta_{гм.м}}. \quad (11)$$

Значение утечек и перетечек РЖ в насосе и гидромоторе, приводящее к снижению частоты вращения гидромотора, определяют исходя из данных (7) по следующей формуле

$$\Delta Q_{ут} = Q_{н.т} - Q_{м.т}, \text{ л/мин}. \quad (12)$$

Все расчеты по приведенным выше формулам проводят непрерывно путем обработки получаемых при измерениях значений параметров, за исключением формул (1)–(9), которые используются только после предварительного тестирования ОГП с целью определения текущего значения рабочего объема насоса при работе в режиме холостого хода (при минимальном перепаде давлений  $\Delta p = |p_a - p_b|$  между основными магистралями).

В табл. 1 сведены измеряемые и расчетные параметры ОГП.

Таблица 1 Результаты измерений параметров и их обработки для ОГП (типовая форма)

$n_n$ $\text{мин}^{-1}$ *	$M_n$ Н.М*	$P_{н.к}$ Вт	$n_m$ $\text{мин}^{-1}$ *	$M_m$ Н.М*	$P_m$ кВт	$\eta_{огп}$	$\Delta P_{огп}$ кВт	$p_a$ *	$p_b$ *	$\Delta p$	$p_y$ *	$M_{теор}$ Н.М	$\eta_{гм.м}$
$n_{м,х.х}$ *	$n_{н,х.х}$ *	$V_{н,i}$ $\text{см}^3$	$Q_{н.т}$ л/мин	$\Delta Q_{ут}$ л/мин	$\eta_{огп.об}$	$\eta_{гм.огп}$	$\eta_{гм.н}$	$t_{вх}$ *	$t_{вых}$ *	$\Delta t_{AT}$	$t_a$ *	$t_b$ *	$\Delta t$
$\text{мин}^{-1}$								$^{\circ}C$					

Примечание: \* – измеренные параметры, остальные – расчетные.

Назначение или оценка оптимальных режимов эксплуатации объемных гидромашин и ОГП в целом тесно связаны с понятием «угловая мощность» [5] и значениями номинального, максимального и пикового давлений (причем последние два имеют существенные ограничения по длительности воздействия), в связи с чем на рис. 5 приве-

дены соответствующие графические зависимости.

Максимальная «угловая мощность» (Corner Power), согласно рис. 5, а, определяется как произведение максимальных значений крутящего момента и частоты вращения гидромотора

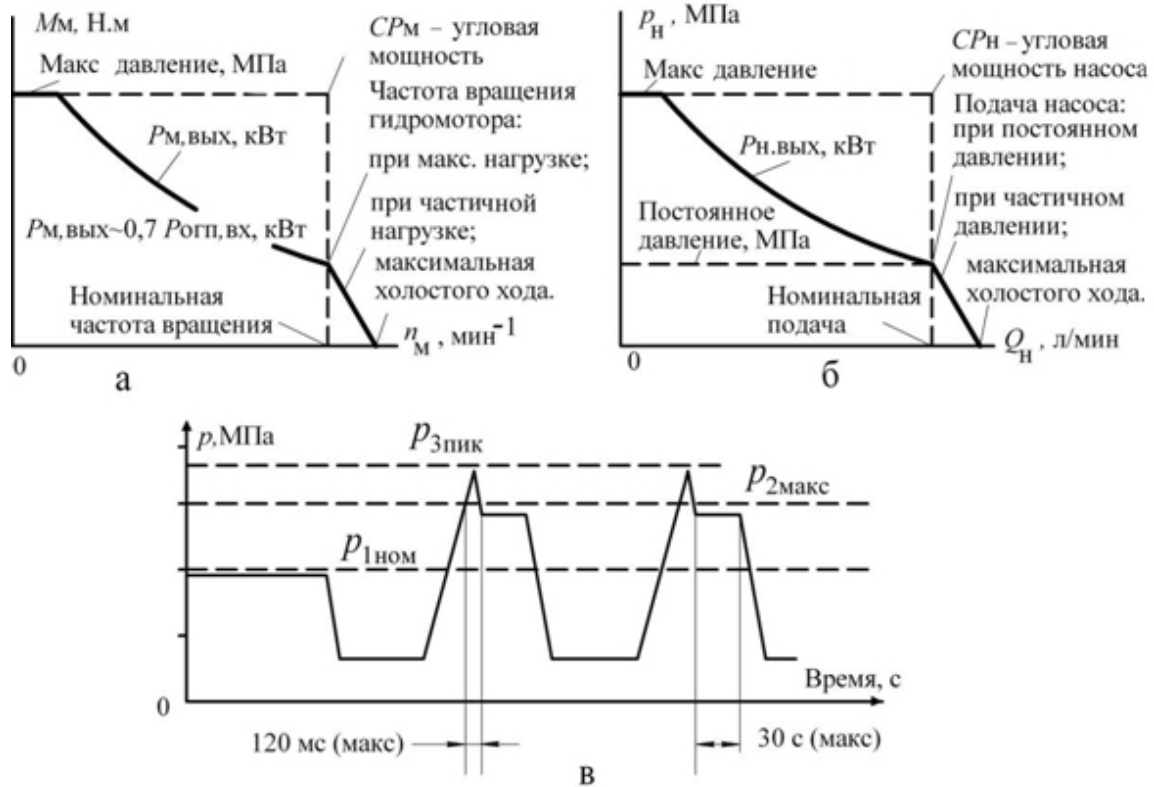


Рис. 5. Графическая интерпретация определения «угловой мощности» в ОГП (а – для гидромотора, б – для насоса) и значений номинального, максимального и пикового давлений (в) с временными ограничениями

$$CP_M = \frac{M_{\text{м, макс}} \cdot n_{\text{м, макс}}}{9550}, \text{ кВт}, \quad (13)$$

где  $M_{\text{м, макс}}$  и  $n_{\text{м, макс}}$  – максимальные значения крутящего момента [Н.м] и частоты вращения [ $\text{мин}^{-1}$ ] гидромотора соответственно.

Для транспортного средства «угловая мощность» представляет собой произведение максимального тягового усилия и линейной скорости

$$CP_{\text{тр. ср}} = \frac{F_{\text{макс}} \cdot v_{\text{макс}}}{3600}, \text{ кВт}, \quad (14)$$

где  $F_{\text{макс}}$  – максимальное тяговое усилие, Н;  $v_{\text{макс}}$  – максимальная скорость транспортного средства, км/ч.

По аналогии с угловой мощностью для гидромотора характеристика насоса в координатах «давление – подача» (рис. 5, б) позволяет определить угловую мощность насоса как произведение максимальных значений давления и подачи РЖ

$$CP_H = \frac{p_{\text{н, макс}} \cdot Q_{\text{н, макс}}}{60}, \text{ кВт}, \quad (15)$$

где  $p_{\text{н, макс}}$  – максимальное давление, развиваемое насосом, МПа;  $Q_{\text{н, макс}}$  – максимальная подача (расход) насоса, л/мин.

Следует подчеркнуть, что значения угловой мощности относятся к теоретическим, эксплуатация ОГП при которых не допускается, и являются своего рода «визитной карточкой» изделия, используемой в рекламных целях.

## Выводы

Приведенные в статье расчетные зависимости и номенклатура применяемых средств измерений позволяют в полной мере определять выходные технические характеристики объемной гидропередачи, потери мощности и специфические параметры режимов работы на различных частотах вращения, при различных давлениях и температурах РЖ. Компьютерное обеспечение испытаний позволя-

ет создать информационное табло для наблюдения за параметрами гидropередачи в реальном времени и определения предельно допустимых режимов работы с соответствующей сигнализацией.

### Литература

1. Насосы объемных гидроприводов. Правила приемки и методы испытаний : ГОСТ 14658. – Введен 1988-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 13 с. (Межгосударственный стандарт).
2. Гидромоторы. Правила приемки и методы испытаний: ГОСТ 20719-83. – Введен 1985-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 23 с. – (Государственный стандарт СССР).
3. Гидропривод объемный. Методы измерения параметров : ГОСТ 17108-79. – Введен с 1988-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 15 с. – (Межгосударственный стандарт).
4. Аврунин Г.А. Эксплуатация гидравлического оборудования строительных и дорожных машин: учебное пособие / Г.А. Аврунин, И.Г. Кириченко, В.Б. Самородов; под ред. Г.А. Аврунина. – Х.: ХНАДУ, 2013. – 438 с.
5. SAUER DANFOSS. Application Manual. Section 1 of Driveline Components, 1997. – 32 p.

Рецензент: Е.С. Венцель, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2016 г.

---