

Автоматизирана уредба за изпитване на зъбни помпи

Ивайло Николаев, Генчо Попов,
Уисам Мхана, Красимир Тужаров, Юлиян Ангелов

Automated system for testing gear pumpst: Test rig for to capture the main indicators of the gear pumps has been developed, combined with devices for visual reading of the measured values and an automated system for accurately reading. Thereby significantly is decreased the time to conduct the investigations, the subjective human factor in reading the values is excluded, also the random error is reduced with simultaneous and accurately reading of all measured values for the same time interval and is off the need for manual input of large amounts of experimental data.

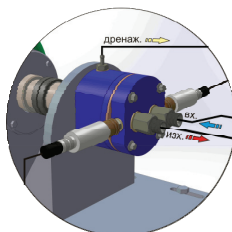
Key words: Gear pump, main indicators, test rig, conversion function (transfer function), automated measurement system.

ВЪВЕДЕНИЕ

Известно е, че изследването на обемни помпи се извършва с помощта на специализирани лабораторни уредби, даващи възможност опитно да се определят основните енергетични показатели при различни режими на работа на помпата. Обикновено тези показатели са:

- Показатели на входа:

n – честота на въртене min^{-1} ;
 M – въртящ момент, $N.m$;
 P – входяща мощност, kW ;



- Показатели на изхода:

Q – дебит l/min^{-1} ;
 p – налягане, MPa ;
 P_n – полезна мощност, kW ;

- Показатели за оценка на ефективната работа:

η – коефициент на полезно действие (пълнен), к.п.д.;
 η_o – обемен к.п.д.; $\eta_{хм}$ – хидромеханичен к.п.д.;

Провеждането на изследвания с помощта на традиционни лабораторни уредби с визуален метод на отчитане на измерваните величини е трудоемък и продължителен процес. Върху измерванията влияят много фактори, в това число и субективни и случайни. Заради случайните фактори режимът на работа на помпата постоянно се мени около установения. Отчитането с визуални уреди налага усредняването на измерваните стойности за определен интервал от време по субективната преценка на изследователя. Самото отчитане не може да се извърши за един и същ интервал от време на всички измервани величини. Всичко това значително увеличава времето за провеждане на експерименталните изследвания и внася допълнителни грешки.

Целта на авторите бе да се разработи лабораторна уредба, в която

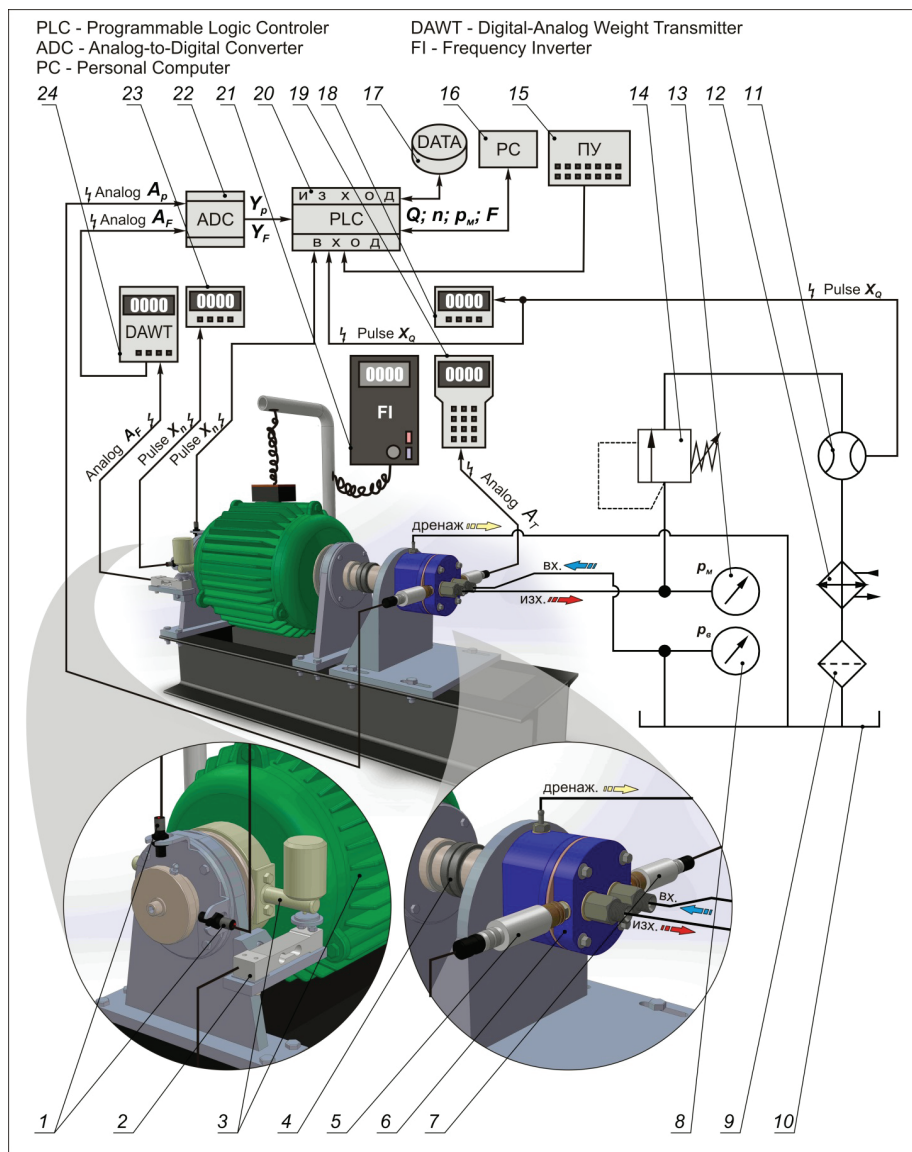
- да се сведе до минимум субективният фактор;
- да се намали грешката от влиянието на случайни фактори, чрез прецизно и едновременно отчитане на измерваните величини;
- значително да се съкрати времето за провеждане на изследванията;
- да се изключи ръчното въвеждане на голям обем експериментални данни;
- да се запази в същото време традиционният визуален метод за отчитане на измерваните величини.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Схема и описание на уредбата

Схемата на проектираната лабораторна уредба е представена на фиг. 1. Зъбната помпа 6, задвижвана от пендел електродвигателя 3 посредством съединителя 4, засмуква работна течност от открития резервоар 10 и я подава към товарния клапан 14 и тахометричния зъбен дебитомер с овални зъби 11. След това течността преминава през охладителя 12 и сливния филтър 9. Импулсният електрически сигнал ($Pulse\ X_Q$), генериран от дебитомера 11, постъпва към честотомера 18 и програмируеия логически контролер 20 (PLC). Честотомерът 18 служи за визуално отчитане на дебита Q , а автоматично отчитане се извършва от контролера 20, в който предварително е зададена преобразуваща функция $Q = f(X_Q)$. Свързаният към контролера пулт за управление 15 (ПУ) се използва за настройване и управление на програмата за провеждане на периодичните измервания и нулиране на независимата памет на контролера 17 (DATA). Персоналният компютър 16, (PC) служи за следене работата на контролера (20) и извеждане на получените експериментални данни от паметта 17. Двата импулсни преобразувателя 1 преобразуват честотата на въртене вала на помпата n в импулсен електрически сигнал ($Pulse\ X_n$) и го подават към честотомера 23 за визуално отчитане на тази величина, както и към контролера 20 за автоматичното ѝ отчитане. За измерване на въртящия момент M на вала на помпата се използва пендел електродвигателят 3. Този момент създава реактивен въртящ момент в статора на двигателя 3 и посредством рамо се преобразува в сила на натиск върху тензометричния преобразувател на сила 2. Той от своя страна преобразува силата в аналогов електрически сигнал ($Analog\ A_F$). Посредством трансмитера на сила с цифров индикатор 24 (DAWT) този сигнал се преобразува в стандартен аналогов сигнал $0 \div 20\text{mA}$ и се подава към аналогово-цифровия преобразувател 22 (ADC), който дискретизира сигнала и го превръща в 16 битово число Y_F . Това число постъпва в контролера и той по предварително зададена преобразуваща функция $F = f(Y_F)$ го преобразува в силата F , породена от въртящия момент. Трансмитерът на сила 24 (DAWT) служи и за визуалното отчитане на тази сила. Визуалното отчитане на манометричното налягане на изхода на помпата p_m се извършва по пружинния манометър 13. За автоматичното отчитане на налягането p_m се използва преобразувателя на налягане 5. Той от своя страна преобразува налягането в стандартен аналогов сигнал $0 \div 20\text{mA}$ ($Analog\ A_p$) и го подава към аналоговия цифров преобразувател 22. Този сигнал преобразувателят 22 също го дискретизира и превръща в 16-битово число, което се преобразува от контролера 20 в налягане p_m по предварително зададената в него преобразуваща функция. Температурата на работната течност на входа на помпата се измерва с помощта на температурния преобразувател 7, който преобразува температурата T в стандартен аналогов сигнал $0 \div 20\text{mA}$ ($Analog\ A_T$) и се подава за отчитане с регистриращото устройство 19. Регулирането и поддържането на постоянна честота на въртене се постига с помощта на честотния инвертор 21.

Параметрите на описаните по-горе уреди и преобразуватели са дадени в таблица 1.



Фиг. 1. Схема на автоматизирана лабораторна уредба за изпитване на зъбни помпи

1 – Импулсни индукционни преобразуватели; 2 – Тензопреобразувател на сила; 3 – Пендел ел. двигател; 4 – Твърд съединител; 5 – Преобразувател на налягане; 6 – Зъбна помпа; 7 – Преобразувател на температура; 8 – Пружинен вакууметър; 9 – Сливен филтър; 10 – Открит резервоар; 11 – Зъбен дебитометър с овални зъби; 12 – Охладител; 13 – Пружинен манометър; 14 – Товарен клапан; 15 – Управяващ пулт; 16 – Персонален компютър; 17 – Независима памет на контролера 20; 18 и 23 – Цифрови честотометри; 19 – Мултифункционално портативно регистриращо устройство; 20 – Програмируем логически контролер – PLC; 21 – Честотен инвертор; 22 – Аналогово-цифров преобразувател – ADC; 24 – Трансмисия на сила с цифров индикатор;

Таблица 1. Параметри на използваните уреди и преобразуватели в автоматизираната уредба за изпитване на зъбни помпи

Поз.	Вид	Марка	Модел	Технически параметри
1	Индукционни импулсни преобразуватели	ESA Control	P1-12.21.KC	Разст. на вкл. – 4,5 mm; Макс. честота – 800 Hz; Размери M12x1, 45 mm
2	Тензометричен преобразувател на сила	Zemic Europe	L6D-C3-40kg-0.40B	Обхват 0-10 kg; точност $\pm 0,2\%$
5	Преобразувател на налягане	Hydrotechnik	PR15 ISDS	Обхват 0÷600 bar; аналогов изходен сигнал: 0÷20mA; точност $\pm 0,25\%$
7	Преобразувател на температура	Hydrotechnik	Pt100 ISDS	Обхват -50÷200 °C, аналогов изходен сигнал: 0÷20mA
11	Тахометричен зъбен дебитомер с овални зъби	Kobold	DOM-A20H R4 1 H0 0	Обхват 0÷40 l/min; максимално налягане 40 bar; Точност $\pm 0,5\%$
18, 23	Цифрови честотомери	ESA Control	CMD6-4 /220VAC	Честота на входните импулси 0,05Hz÷11kHz
19	Мултифункционално портативно регистриращо устройство	Hydrotechnik	MultiHandy 3050	3 аналогови входа, 1 честотен вход, памет 0,9 MB
20	Програмируем логически контролер	Siemens	S7-200 CPU224	14 цифрови входа и 10 цифрови изхода
21	Честотен инвертор	Електроинвент	ELDI/DF	Максимална мощност на задв-я ел. двигател 11 kW
22	Аналогово-цифров преобразувател	Siemens	EM 235	4 аналогови входа, 1 аналогов изход
24	Тегловен трансмитер с цифров индикатор	LAUMAS Electronica	TLS	Оптично изолиран аналогов изходен сигнал: 0÷20mA; 4÷20mA; 0÷10V; 0÷5V; $\pm 10V$;

Пресмятането на показателите става по общо известните зависимости, дадени по-долу:

- теоретичен дебит – $Q_t = qn$, l/min , където q е работният обем на помпата;
- налягане – $p = p_m + p_s$, bar ;
- въртящ момент – $M = F \cdot l$, N.m , (l е дължината на рамото на пендела);
- мощност – $P = M \frac{\pi n}{30000}$, kW ;
- полезна мощност – $P_n = \frac{pQ}{600}$, kW ;
- пълен к.п.д. – $\eta = P_n / P$;
- обемен к.п.д. – $\eta_o = Q / Q_t$;
- хидромеханичен к.п.д. – $\eta_{xm} = \eta / \eta_o$.

2. Описание на програмата за автоматизирани измервания

Във връзка с автоматизираното отчитане на измерваните величини е създадена специална програма, даваща възможност:

- Периодично да се измерват две импулсни и две аналогови величини, съответно: честота на въртене n , обемен дебит Q , сила, породена от въртящия момент, F и манометрично налягане p_m ;

- Всички измервани величини да се натрупват за един и същ интервал от време и в края на всеки период на измерване да се осредняват и да се записват в независимата памет на контролера, като стойностите за честотата n се записват като цяло число от тип *Long Integer* (16 bit), а за останалите стойности като реални числа от тип *Double Word* (32 bit);

- Да се преобразуват числовите стойности на измерените сигнали със преобразуващи функции от типа:

за дебита –

$$Q = k_Q X_Q, \quad (1)$$

за силата породена от въртящия момент –

$$F = k_F Y_F + \text{offset}_F, \quad (2)$$

за манометричното налягане –

$$p_m = k_p Y_p + \text{offset}_p; \quad (3)$$

- Да се въвеждат коефициентите на преобразуващите функции: k_Q , k_p , offset_p , k_F и offset_F ;

- Да се задава времето за един измервателен цикъл $t_{\text{общо}}$, времето за провеждане на измервания $t_{\text{изм}}$ и времето за изчакване $t_{\text{изч}}$ в рамките на един цикъл – $t_{\text{общо}} = t_{\text{изм}} + t_{\text{изч}}$.

Така създадената програма се зарежда в контролера и дава възможност той да работи автономно. Свързаният към контролера компютър се използва само за следене на текущите измервания, за въвеждане на коефициентите на преобразуващите функции и за извеждане на измерените стойности. Паметта на контролера е достатъчна за снемане на основните показатели на 279 цикъла на измерване.

3. Тариране на преобразувателите

За получаване на коефициентите в преобразуващите функции (1), (2) и (3) опитно са тарирани използваните преобразуватели.

Тариране на преобразувателя на налягане

При тариране на преобразувателя на налягане 7 еталонното налягане p_e е създавано с помощта на стандартна преса за тариране на манометри, като са задавани наляганя в целия измервателен обхват $p_e = 0 \div 280 \text{ bar}$. За всяко налягане със системата за периодични измервания са извършени по 15 измервания на сигнала, преобразуван в реално число Y_p от аналоговоцифровия преобразувател (22). За тази цел във функцията на преобразуване (2) са заложили следните коефициенти: $k_p = 1$ и $\text{offset}_p = 0$.

Пресметнати са средните стойности на Y_p за всяко налягане и е построена тарировъчната характеристика. След апроксимиране на числовите данни по метода на най-малките квадрати са определени реалните коефициенти на функцията на преобразуване:

$$p_m = k_p Y_p + \text{offset}_p = 0.0183 \cdot Y_p + 0.64, \text{ bar} \quad (4)$$

с коефициент на линейна корелация $R = 1$.

Тариране на тензопреобразувателя на сила

Тарирането на тензопреобразувателя на сила 2 е направено аналогично на преобразувателя на налягане, като тук силата, действаща върху преобразувателя 2, е създавана с помощта на еталонни тежести от 0 до 10 kg. Получената тарировъчна характеристика също е апроксимиране и за преобразуващата функция на тензопреобразувателя е получено:

$$F = k_F Y_F + \text{offset}_F = 0.0030765 \cdot Y_F - 0.196, \text{ N}. \quad (5)$$

с коефициент на линейна корелация $R = 1$.

Тариране на дебитомера

При тариране на дебитомера 11 средният дебит, минаващ през него, е измерван по обемния метод с помощта на хронометър и мерен съд, включен към хидравличната система на уредбата:

$$Q = \frac{V}{t}, \text{ l/min}, \quad (6)$$

където t е времето за запълване на мерния съд, $V = 9$, l е обемът му.

Дебитът към дебитомера се подава от помпата 6, а регулирането му чрез промяна на честотата на въртене на помпата посредством честотния инвертор 21. За всеки измерен дебит с контролера 20 са отчетени от 4 и 8 пъти броят импулси k_Q , генерирани от дебитомера за интервал от време $\Delta t_{\text{имп}}$. Този времеви интервал е желателно да бъде колкото е приетото време за измерване при периодичните измервания $\Delta t_{\text{имп}} = t_{\text{изм}} = 8 \text{ s}$. След апроксимиране на тарировъчната характеристика за преобразуващата функция на тензопреобразувателя е получено:

$$Q = k_Q X_Q = 0.3666 \cdot X_Q, \text{ l/min} \quad (7)$$

с коефициент на линейна корелация $R = 0.9999$.

4. Оценка на точността на измерваните величини и на показателите на помпата

Измервани величини

Действителната стойност A_i^* на измерваната величина A_i се приема равна на изчислената величина A_{xi} с помощта на преобразуващата функция на съответния преобразувател и с максимално допустима грешка ΔA_{xi} на съответното измерване:

$$A_i^* = A_{xi} \pm \Delta A_{xi} = k \cdot x_i + \text{offset} \pm \Delta A_{xi}, \quad (8)$$

където k и offset са коефициентите на преобразуващата функция, а x_i - текущата числовата стойност на сигнала от преобразувателя.

Тази грешка може да се пресметне по зависимостта:

$$\Delta A_{xi} = t_{\alpha, n-2} \cdot \sigma_{\Delta A_i}, \quad (9)$$

където: $t_{\alpha, n-2}$ е квантил на Стьудънт при степени на свобода $n-2$ и приета стойност на доверителната вероятност $\alpha = 0.95$; n – броят на измерванията на величината A ; $\sigma_{\Delta A_i}$ – средноквадратичното отклонение на грешката $\Delta A_i = A_i - A_{xi}$ (фиг. 3.г); A_i – текущата измерена величина при отчетени сигнали $x_{i1}, x_{i2} \dots x_{im}$ от преобразувателя;

Средноквадратичното отклонение $\sigma_{\Delta A_i}$ се пресмята по зависимостта:

$$\sigma_{\Delta A_i} = \sqrt{\sigma^2 \left[1 + \frac{1}{n} (\bar{x}_i - \bar{x}_{\text{All}})^2 \right] / \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{x}_{\text{All}})^2}, \quad (10)$$

където: σ е остатъчната дисперсия (грешка на модела); $\bar{x}_i = \sum_{j=1}^m \bar{x}_{ij} / m$ – средната стойност на отчетените сигнали $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$ за съответната величина A_i ; $\bar{x}_{All} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i / n$ – средната стойност на осреднените сигнали $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ от всички измервания;

Остатъчната дисперсия σ се пресмята по зависимостта:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta A_i^2}{n-2}}. \quad (11)$$

По описаната по-горе методика са пресметнати грешките от тарирането на преобразувателя на налягане, тензопреобразувателя на сила и зъбния дебитометр и са представени по-долу заедно с преобразуващите им функции:

$$\begin{aligned} p_m &= 0.0183 \cdot Y_p + 0.64, \text{ bar} \pm 0.12\% \\ F &= 0.0030765 \cdot Y_F - 0.196, \text{ N} \pm 0.01\% \\ Q &= 0.3666 \cdot X_Q, \text{ l/min} \pm 0.39\%. \end{aligned} \quad (12)$$

Косвени величини

Относителна грешката на получените чрез пресмятане показатели се определя по общата зависимост за косвени еднократни измервания

$$\frac{\Delta_{\max y}}{y} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{\Delta_{\max x1}}{y} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{\Delta_{\max x2}}{y} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \frac{\Delta_{\max xn}}{y} \right)^2}, \quad (13)$$

където $\Delta_{\max x1}, \Delta_{\max x2}, \dots, \Delta_{\max xn}$ са абсолютните грешки от преките измервания, а $\Delta_{\max y}/y$ е относителната грешка на косвената величина и $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функционалната зависимост между преките измерване величини и косвената.

Резултатите за грешката на показателите, определени по косвен път, са представени в таблица 2.

Таблица 2. Максимални относителни грешки на измерените показатели на помпата

Показател на помпата	Максимална относителна ртешка	
	Функционална зависимост	Стойност
Налягане	$\delta_p = \sqrt{\frac{(p_m \delta_{p_m})^2 + (p_e \delta_{p_e})^2}{(p_m + p_e)^2}}$	0.18% при $p_{\min m} = 10 \text{ kgf/cm}^2$ и $p_{\max e} = 1 \text{ kgf/cm}^2$
Въртящ момент	$\delta_M = \sqrt{\delta_F^2 + \delta_\ell^2}$	0.08%
Мощност	$\delta_P = \sqrt{\delta_M^2 + \delta_n^2}$	0.15%
Полезна мощност	$\delta_{P_n} = \sqrt{\delta_P^2 + \delta_Q^2}$	0.43%
Теоретичен дебит	$\delta_{Q_m} = \sqrt{\delta_q^2 + \delta_n^2}$	0.26%
Пълен к.п.д.	$\delta_\eta = \sqrt{\delta_{P_n}^2 + \delta_P^2}$	0.46%
Обемен к.п.д.	$\delta_{\eta_o} = \sqrt{\delta_{Q_m}^2 + \delta_Q^2}$	0.47%
Хидромеханичен к.п.д.	$\delta_p = \sqrt{\delta_{p_m}^2 + \delta_{p_e}^2}$	0.66%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение може да се каже, че създадената опитна уредба има следните предимства:

- изключва се влиянието на субективния фактор върху точността на измерванията;
- намалява се случайната грешка от колебанията в установения режим на помпата;
- значително се съкращава времето за провеждане на експериментите;
- измерителната система може да се използва и за измерване на други физични величини чрез възможността за въвеждане на коефициентите на преобразуващите функции;
- автоматизираната система за периодични измервания опростява работата с уредбата и получаването на работните характеристики;
- при опитното определяне на хидромеханичния КПД се постига максимална грешка от 0,66%.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Попов, Г. Обемни хидравлични машини. Русе, 2013 г..
- [2] Раичков Г. Измерване и уреди в топлотехниката. Академично издателство на УХТ, Пловдив, 2012.
- [3] Савчук, В. Обработка резултатов измервания. Физика, Одеса, 2002.

За контакти:

гл. ас. инж. Ивайло Николаев, катедра “Топлотехника, хидравлика и екология”, Русенски университет, Тел.: 082/888-582, e-mail: nikolaev@uni-ruse.bg;
проф. д-р инж. Генчо Попов, катедра “Топлотехника, хидравлика и екология”, Русенски университет, Тел.: 082/888-580, e-mail: gsporov@uni-ruse.bg;
инж. Уисам Мхана, “Топлотехника, хидро и пневмотехника”, Русенски университет, Тел.: 082/888-766, E-mail: tujarov@uni-ruse.bg;
доц. д-р инж. Красимир Тужаров, “Топлотехника, хидро и пневмотехника”, Русенски университет, Тел.: 082/888-581, E-mail: tujarov@uni-ruse.bg;
гл. ас. д-р инж. Юлиан Ангелов, “Техническа механика”, Русенски университет, Тел.: 082/888-572, E-mail: julian@uni-ruse.bg;

Докладът е рецензиран.