N&O 2_2012.qxd 23/5/12 12:18 Page 32

СРАВНЕНИЕ ЧАСТОТНОГО И ОБЪЕМНОГО МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДАЧИ ДОЗИРОВОЧНЫХ НАСОСОВ

Владимир Садошенко,
генеральный директор

Борис Чернявский,
главный инженер

ГИДРОМАШ НОРНАТ

ООО
«Гидромаш - Норнат»
Россия, 129626
г. Москва
ул. 2-я Мытищинская, 2
тел./факс:
+7 (495) 7864330 –
многоканальный
E-mail: nornat@yandex.ru
http://nornat.net

Леонид Пинегин,
главный конструктор

RINAR MAŠĪNBŪVE

SIA
«RINAR MAŠĪNBŪVE»
ул. Саламандрас, 1
г. Рига, Латвия, LV-1024
факс: +371-67014620
E-mail: rinarmb@inbox.lv
rinar@nornat.net
http://rinar.net

В работе [1] проводилось сравнение частотного (изменением частоты ходов плунжера) и объемного (изменением длины хода плунжера) методов регулирования подачи дозировочного насоса на примере насосов НД мощностью N = 0,25 кВт с приводом кулачково - пружинного типа производства ***компании «Rinar Masinbuve»*** **(г. Рига)** и ***ООО «Гидромаш – Норнат»*** **(г. Москва)** - представителя компании в России. В настоящей работе продолжилось сравнение двух методов регулирования подачи на примере дозировочных насосов НД с кривошипно - шатунным приводом мощностью N = 1,1÷3 кВт. Регулирование подачи насосов осуществлялось: объемное - изменением радиуса кривошипа кривошипно - шатунного механизма (и тем самым. длины хода плунжера), частотное - изменением числа оборотов двигателя регулируемого привода Varicon фирмы Hanning, Германия.

Запишем уравнение мгновенной геометрической подачи Q_t (без учета шатунной поправки), когда переменными являются и угловая скорость, и радиус кривошипа.

$$Q_t = F\,\omega R \sin 2\pi \frac{t}{T}, \qquad (1)$$

где F - площадь плунжера,
$\omega = \frac{2\pi}{T}$ - угловая скорость кривошипа,
R - радиус кривошипа,
T - период колебаний (двойных ходов) плунжера,
t - время.

Максимальное значение мгновенной геометрической подачи Q^{max}_t имеет место в точке $t = 0{,}25\,T^{nom}$ и равно:

$$Q_t^{max} = F\,\omega^{nom} R_{max},$$

где R_{max} - максимальный радиус кривошипа,
ω^{nom}, T^{nom} - угловая скорость и период, соответствующие номинальному режиму работы двигателя: n (синхр.) = 1500 об / мин. при υ = 50 Гц

В относительных координатах уравнение (1) запишется в виде:

$$\frac{Q_t}{Q_t^{max}} = \frac{\omega}{\omega^{nom}} \frac{R}{R_{max}} \sin 2\pi \frac{t}{T}. \qquad (2)$$

Для случая регулирования подачи длиной хода (R = var) при постоянной угловой скорости $\omega = \omega_{nom} = const$ ($T = T_{nom} = const$) уравнение (2) упростится:

$$\frac{Q_t}{Q_t^{max}} = \frac{R}{R_{max}} \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

При частотном регулировании (ω = var), когда $R = R_{max} = const$, уравнение (2) примет вид:

$$\frac{Q_t}{Q_t^{max}} = \frac{\omega}{\omega_{nom}} \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

График относительной мгновенной геометрической подачи для номинального режима $Q = Q_{nom}$ ($R = R_{max}$, $\omega = \omega_{nom}$) представлен на ***рис.1***, а на ***рис. 2, 3*** представлены графики относительной мгновенной подачи для режимов $Q = 0{,}5\,Q_{nom}$ и $Q = 0{,}25\,Q_{nom}$ при разных методах регулирования. Сравнение показывает, что параметры, характеризующие

N&O 2_2012.qxd 23/5/12 12:18 Page 33

процесс: максимальное значение относительной мгновенной подачи Q_t / Q^{max}_t и степень неравномерности подачи $\sigma = Q^{max}_t / Q_{cp}$, - равны для обоих методов регулирования. (Отметим: Q_{cp} =Q- подача насоса).

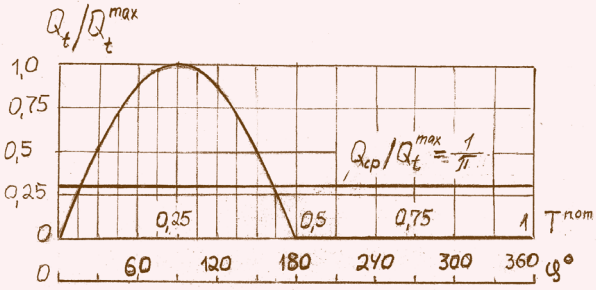

Рис. 1. График мгновенной подачи номинального режима $Q_{cp} = Q_{nom}$ ($R = R_{max}$, $\omega = \omega_{nom}$)

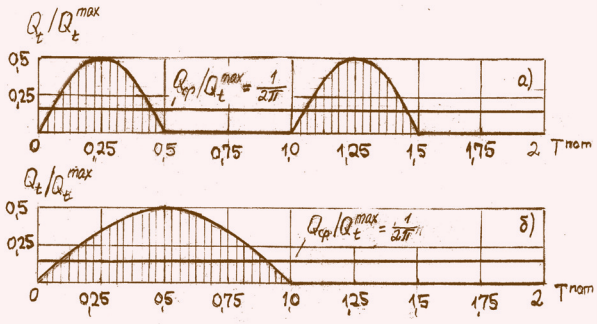

Рис. 2. График мгновенной подачи режима $Q_{cp} = 0,5\ Q_{nom}$ ***при:***
а) регулировании длиной хода $R = 0,5\ R_{max}$, $\omega = \omega_{nom}$
б) частотном регулировании $\omega = 0,5\ \omega_{nom}$, $R = R_{max}$

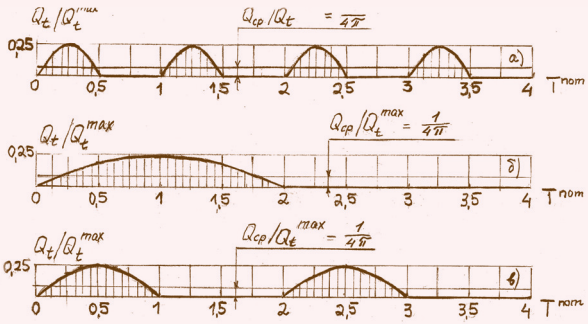

Рис. 3. График мгновенной подачи режима $Q_{cp} = 0,25\ Q_{nom}$ ***при:***
а) регулировании длиной хода $R = 0,25\ R_{max}$, $\omega = \omega_{nom}$
б) частотном регулировании $\omega = 0,25\ \omega_{nom}$, $R = R_{max}$
в) смешанном регулировании $R = 0,5\ R_{max}$, $\omega = 0,5\ \omega_{nom}$

Различие состоит в том, что при частотном регулировании, по сравнению с объемным, в связи с увеличением периода Т увеличивается как время наличия подачи жидкости (ход нагнетания), так и время отсутствия подачи жидкости (ход всасывания). Это может быть нежелательным для некоторых технологических процессов. Решением вопроса может стать смешанный метод регулирования подачи: как изменением в допустимых пределах частоты ходов плунжера (и тем самым периода Т), так и изменением длины хода плунжера (и тем самым, единичного объема V_0). Другой вариант - применение двух- и трехплунжерных насосов или насосов с дифференциальным поршнем, у которых подача осуществляется постоянно [2].

Согласно [1], для описания подачи насоса при переменных частоте и длине хода плунжера для насосов N = 0,25 кВт справедливо уравнение:

$$Q = 0,06n\left(V^{nom}_{ид}\frac{S}{S_{max}} - \Delta V\right), \qquad (3)$$

где Q, л/ч - подача, $\Delta V = V^{nom}_{ид} - V^{nom}$ - потеря единичного объема.

$V^{nom}_{ид}$, V^{nom}, $см^3$/ход - идеальная и действительная подачи за один двойной ход плунжера (единичный объем) на номинальном режиме,

n, ход/мин - установленная частота ходов плунжера,

S - установленный ход плунжера,

S_{max} - максимальный (номинальный) ход плунжера.

В целях проверки справедливости формулы (3) для насосов большей мощности были определены регулировочные характеристики насосов НДЭ 16/400К14А ***(рис. 4)*** и НД 2,5 Э630/10К14А ***(рис. 5)***. Характеристики определялись при предельном давлении нагнетания и максимальной длине хода плунжера, при этом частота ходов плунжера изменялась от нуля до 160 ход/мин.

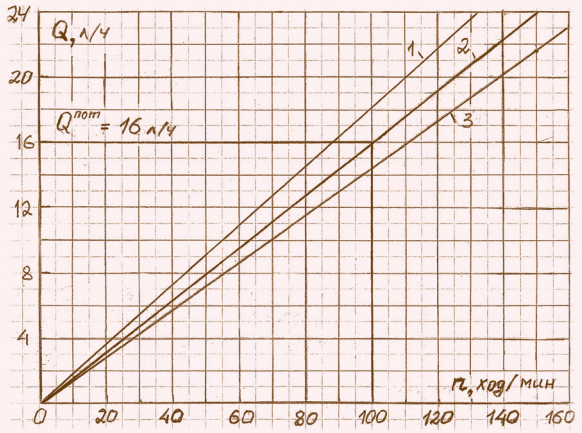

Рис. 4. Регулировочные характеристики насоса НДЭ 16/400К14А (n = var, S = Smax = const):
1 - идеальная; 2 - реальная, $\eta^{nom} = 0,88$;
3 – пограничная, согласно уравнению (4), $[\eta^{nom}] = 0,8$.

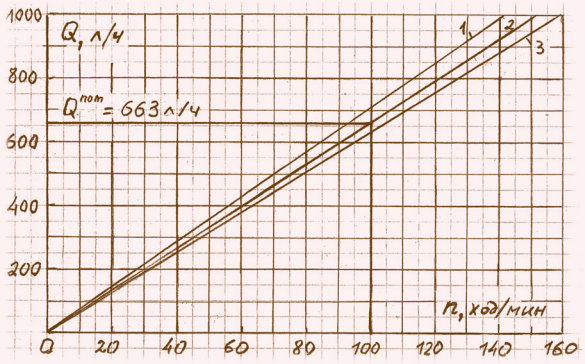

Рис. 5. Регулировочные характеристики насоса НД 2,5Э 630/16К14А (n = var, S = Smax = const):
1 - идеальная; 2 – реальная, $\eta^{nom} = 0,93$;
3 – пограничная, согласно уравнению (4), $[\eta^{nom}] = 0,9$.

N&O 2_2012.qxd 23/5/12 12:18 Page 34

Напомним, что согласно [3], дозировочные насосы НД разделены по категориям точности дозирования (к. т. д.) в соответствии с допустимыми значениями коэффициента подачи на номинальном режиме: $[\eta^{nom}]$ = 0,9 - 0,925 - 0,975 для насосов к. т. д. 2,5 - 1,0 - 0,5 соответственно. Полученные для исследуемых насосов коэффициенты подач оказались постоянными, не опускающимися ниже значений $[\eta^{nom}]$ во всем диапазоне частот 0 -160 ход/мин. Это говорит о линейности функции Q = f(n) и справедливости уравнения (3) для насосов НД мощностью до 3 кВт. Подобные результаты были получены в работе (4): коэффициент подачи насоса НД 0,5 100/10К14А (ООО «Ареопаг») в диапазоне частот 20 -160 ход/мин изменялся в пределах η = 0,99 - 0,976 и не выходил за предел допустимого для данного насоса значения $[\eta^{nom}]$ = 0,975.

Уравнение (3) можно представить в ином виде:

$$Q = Q_{ид}^{nom} \frac{n}{n^{nom}} \left(\frac{S}{S_{max}} - \Delta\eta^{nom} \right), \qquad (4)$$

где $Q^{nom}_{ид} = V^{nom}_{ид}\, n^{nom}$ - идеальная подача на номинальном режиме,

$\eta^{nom} = \frac{Q^{nom}}{Q^{nom}_{ид}}$ - коэффициент подачи на номинальном режиме ($S = S_{max}$, $n = n^{nom}$),

$\Delta\eta^{nom} = 1 - \eta^{nom}$ - коэффициент потери подачи на номинальном режиме.

Уравнение (4) - это семейство регулировочных характеристик Q = f (S, n), в котором хорошо видна роль коэффициента потери подачи. Семейство допустимых (пограничных) регулировочных характеристик можно получить, подставив в уравнение (4) значения допустимых коэффициентов потери подачи: $[\Delta\eta^{nom}]$ = 0,1 - 0,075 - 0,025 для насосов к. т. д. 2,5 - 1,0 - 0,5 соответственно. Это семейство для насосов к. т. д. 2,5 представлено на ***рис. 6***. Видно, что диапазон регулирования по частоте находится в пределах n^{nom}...0, а диапазон регулирования длиной хода ограничен S_{max}... ($S_{max}\, \Delta\eta^{nom}$]), что свидетельствует в пользу частотного метода с точки зрения глубины регулирования.

Уравнение (4) дает возможность провести сравнение двух методов регулирования подачи, с точки зрения коэффициента подачи η и с точки зрения точности дозирования.

Согласно уравнению (4), имеем:

$$\eta = \frac{Q}{Q_{ид}} = 1 - \frac{\Delta\eta^{nom}}{S/S_{max}} \qquad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что коэффициент подачи зависит от длины хода плунжера: уменьшается при уменьшении длины хода. На ***рис. 7*** представлено уравнение (5) для насосов категории точности дозирования 0,5; 1,0 и 2,5 для случая $\Delta\eta^{nom} = [\Delta\eta^{nom}]$. Видно, что с уменьшением хода S коэффициент подачи η уменьшается вначале незначительно, но после некоторой (критической) величины хода начинается его резкое падение. Напомним, что с изменением частоты (в принятом для дозировочных насосов диапазоне n ⩽ 200 ход/мин) коэффициент подачи не изменяется и во всем частотном диапазоне равен максимальному значению $\eta = \eta^{nom}$ = const. Это постоянство коэффициента подачи в отдельных случаях позволяет определить значение коэффициента подачи (и тем самым категорию точности дозирования насоса) на частичном режиме: на пониженном числе двойных ходов плунжера, но, естественно, при условии $S = S_{max}$.

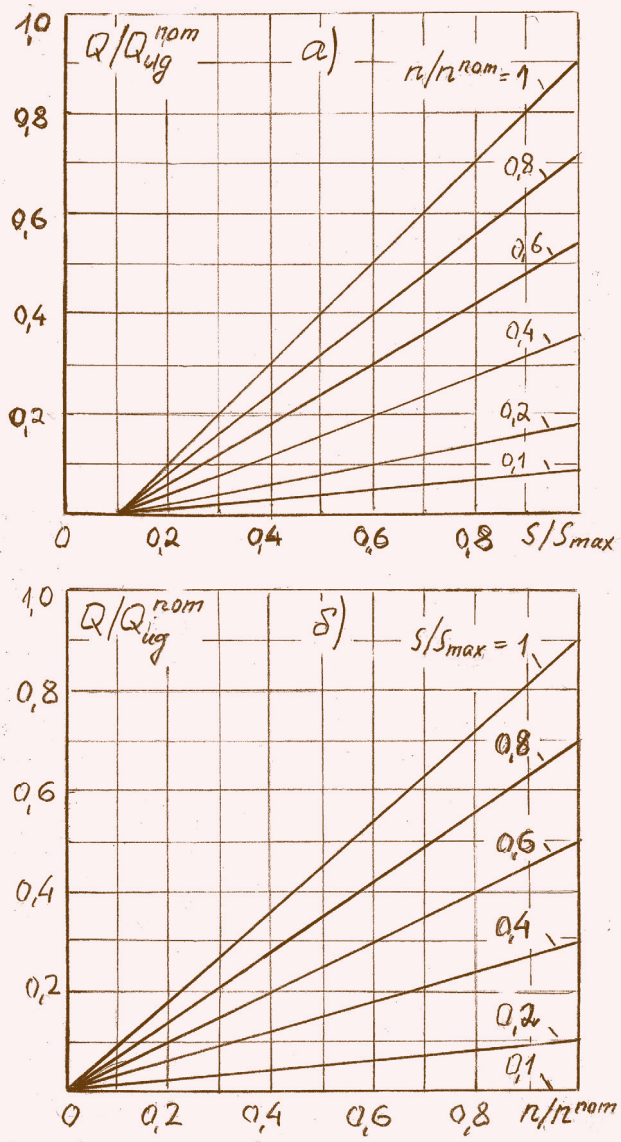

Рис. 6. Семейство относительных регулировочных характеристик насоса согласно уравнению (4) при: $\Delta\eta^{nom} = [\Delta\eta^{nom}]$ = 0,1 ***:***
а) в координатах Q - S;
б) в координатах Q - n.

Далее сравним два метода регулирования подачи, с точки зрения точности дозирования. Потеря подачи $\Delta Q = Q_{ид} - Q$ является абсолютной погрешностью подачи, откуда относительная ошибка дозирования δ равна:

N&O 2_2012.qxd 23/5/12 12:18 Page 35

$$\delta = \frac{Q_{ид} - Q}{Q} = \frac{1-\eta}{\eta}. \qquad (6)$$

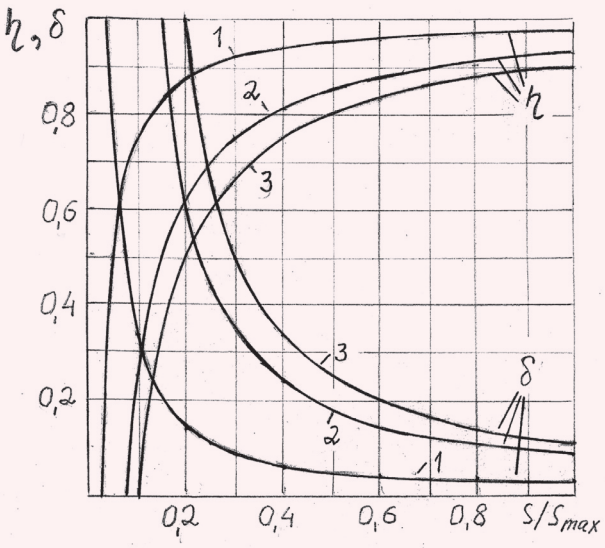

Рис. 7. Зависимости коэффициента подачи и относительной ошибки дозирования δ от длины хода плунжера S и коэффициента потери подачи на номинальном режиме: $\Delta\eta^{nom} = [\Delta\eta^{nom}] = 0{,}025$ ***(кривые 1) - 0^075 (кривые 2) - 0,1 (кривые 3)***

Совместно решая уравнения (5) и (6), получаем:

$$\delta = \frac{\Delta\eta^{nom}}{\frac{S}{S_{max}} - \Delta\eta^{nom}}. \qquad (7)$$

Представленные на ***рис. 7*** кривые, согласно уравнению (7) для случая $\Delta\eta^{nom} = [\Delta\eta^{nom}]$, показывают, как стремительно растет ошибка дозирования δ с уменьшением длины хода. Например, у насоса категории точности дозирования 2,5 при изменении длины хода плунжера в четыре раза, от S_{max} до 0,25 S_{max}, коэффициент подачи уменьшается в 1,5 раза (η = 0,9 - 0,6), а относительная ошибка дозирования увеличивается в 6 раз (δ = 0,11 - 0,66). Вместе с тем при частотном регулировании, т. к. коэффициент потери подачи постоянен $\Delta\eta = \Delta\eta^{nom} = const$, получаем, что и ошибка дозирования постоянна и равна номинальному значению

$$\delta^{nom} = \frac{\Delta\eta^{nom}}{1-\Delta\eta^{nom}}$$

во всем диапазоне частот.

В пользу частотного метода регулирования свидетельствует и тот факт, что при работе с максимальной длиной хода плунжера насос имеет наилучшие кавитационные и самовсасывающие способности [5].

Заключение

При частотном регулировании во всем диапазоне регулирования коэффициент подачи имеет максимальное, а относительная ошибка дозирования - минимальное значение. При объемном регулировании с уменьшением длины хода плунжера коэффициент подачи уменьшается, а относительная ошибка дозирования увеличивается.

Таким образом, сравнение двух методов регулирования подачи дозировочных насосов, с точки зрения коэффициента подачи, точности дозирования и глубины регулирования, говорит в пользу частотного метода. Недостаток частотного метода: в виде отсутствия подачи при ходе всасывания, - можно ликвидировать посредством перехода на двух- и трехплунжерные насосы или насосы с дифференциальным поршнем. Для полного сравнения двух методов следует произвести сравнение по полному КПД насосного агрегата, включающего и КПД электродвигателя в рабочем диапазоне. Более того, эффективность частотно - регулируемого насоса и насоса, регулируемого длиной хода, желательно рассмотреть на протяжении всего его «жизненного цикла» [6].

Литература

1. *В. Садошенко, Б. Чернявский, С. Березовский*. Частотное регулирование дозировочных насосов. **«Насосы&оборудование»**, № 1, 2009 г.

2. *В. Бурданов*. Методы снижения неравномерности подачи дозировочных насосов возвратно - поступательного действия. **«Насосы&оборудование»**, № 4 - 5 , 2010 г.

3. ОСТ 26-06 -2003.Насосы дозировочные плунжерные и агрегаты электронасосные на их базе. Технические условия.

4. *В. Бурданов*. Особенности регулирования подачи дозировочного насоса изменением частоты ходов плунжера. **«Насосы&оборудование»**, № 2 , 2009 г.

5. *В. Садошенко, Б. Чернявский, С. Березовский*. Работа поршневого насоса в режиме самовсасывания. **«Насосы&оборудование»**, № 4, 2011 г.

6. *В. Караханьян*. Энергосбережение и повышение энергоэффективности насосного оборудования в России в период до 2020 г. **«Насосы&оборудование»**, № 4-5, 2010 г.

© В. Садошенко, Б. Чернявский, Л. Пинегин, 2012

ГИДРОМАШ НОРИАТ

RINAR MAŠĪNBŪVE