

ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДОЗИРОВОЧНЫХ НАСОСОВ

Появление частотного регулирования дало возможность изменять подачу дозирующего насоса путем изменения частоты ходов плунжера, сохранив при этом традиционный метод регулирования подачи – изменением длины хода плунжера. Появление нового метода регулирования поставило и ряд вопросов: пределы изменения подачи при частотном регулировании, достоинства и недостатки частотного регулирования, сравнение двух методов регулирования подачи.

Для ответа на поставленные вопросы были проведены испытания дозирующих насосов НД производства компании «RINAR MAŠINBŪVE» (г. Рига, Латвия) и ООО «Гидромаш – Норнат» (г. Москва) - представителя компании в России.



Рис. 1. Дозировочный насос НД 1,ОР 10/100 К 13 МА с приводом Varicon на испытательном стенде

Испытываемые насосы в серийном исполнении выпускаются с трехфазным двигателем мощностью $N = 0,25$ кВт и синхронным числом оборотов $n = 1500$ об/мин. При проведении испытаний на насосах был установлен регулируемый привод Varicon фирмы «Hanning», Германия, с двигателем CCD-8C4-1-550 с параметрами: $U = 220$ В, $N = 0,37$ кВт, $n_{дв. макс.} = 2500$ об/мин (рис. 1). Привод представляет собой электродвигатель со встроенным преобразователем частоты и независимой вентиляцией, благодаря чему обеспечивается охлаждение двигателя на самых малых оборотах. На лицевую панель двигателя выведен потенциометр со шкалой 0...100 %, с помощью которого легко и удобно регулировать обороты двигателя и, соответственно, частоту ходов плунжера насоса.

Привод оснащен также выносным пультом управления, позволяющим простое и быстрое параметрирование привода с индикацией прямым текстом на русском языке. С приводом Varicon возможно изменять скорость разгона и торможения двигателя, выходить на заранее заданную частоту вращения двигателя после его включения (т. н. автостарт), подключать регулятор частоты вращения двигателя, осуществлять внешнее управление оборотами двигателя в соответствии с аналоговым сигналом 4 - 20 мА. Возможен также выбор температурного режима работы двигателя, когда при включении датчика температуры обмотки двигателя и превышении допустимой температуры происходит отключение привода. Встроенный вентилятор может быть настроен на режимы: *отключен, постоянная работа, включается при температуре $t > 45^\circ\text{C}$ и отключается при $t < 42^\circ\text{C}$.*

Испытываемый ряд насосов НД объединен общим приводом с полезным усилием по плунжеру $N_{пл.} = 80$ кг. Кинематическая схема насоса представлена на рис. 2. Привод – кулачково-пружинного типа. Ходы нагнетания и всасывания осуществляются путем преобразования вращательного движения эксцентрика (кулачка) 7 в возвратно-поступательное движение ползуна 3, соединенного с плунжером 2. С помощью пружины 4 осуществляется ход всасывания и прижим соединенного с ползуном ролика 6 к кулачку 7. Длина хода плунжера регулируется упором 5 и отмеряется от передней мертвой точки.

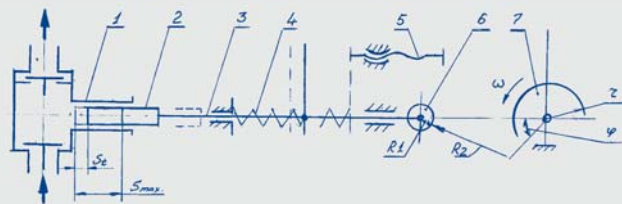


Рис.2. Кинематическая схема дозирующего насоса: 1 - гидроцилиндр, 2 - плунжер, 3 - ползун, 4 - пружина обратного хода, 5 - регулятор длины хода, 6 - ролик, 7 – эксцентрик

Зависимости текущего хода плунжера S_t и мгновенной геометрической подачи Q_t от угла поворота φ эксцентрика при полном ходе плунжера описываются уравнениями:

$$S_t = r \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{1}{4} \frac{r}{L} (1 - \cos 2\varphi) \right] \quad (1)$$

$$Q_t = Fr \omega \left(\sin \varphi \pm \frac{1}{2} \frac{r}{L} \sin 2\varphi \right) \quad (2)$$

где r – эксцентриситет эксцентрика,

$L = R_1 + R_2$ – длина шатуна,
 ω – угловая скорость эксцентрика,
 F – площадь плунжера.

Графические изображения уравнений (1) и (2) в первом приближении, без учета шатунной поправки, представлены на **рис. 3**. Из графиков видно, что подача осуществляется на участке длиной π : от задней мертвой точки ($\varphi = 0$) до передней мертвой точки ($\varphi = \pi$).

Максимальная мгновенная подача Q_t^{\max} имеет место в точке $\varphi = 0,5\pi$ и равна $Q_t^{\max} = F\omega$.

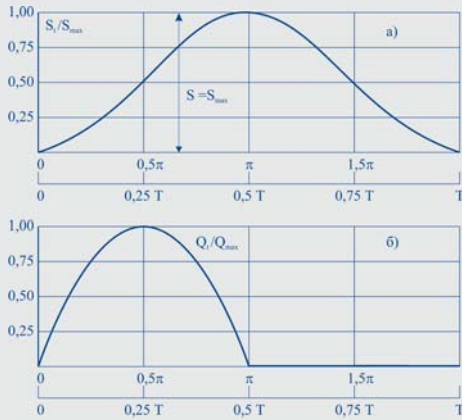


Рис. 3. График хода плунжера а) и подачи б) при $Q = Q_{\max}$ ($S = S_{\max}$)

Средняя геометрическая подача $Q_{\text{ср.}}$ равна:

$$Q_{\text{ср.}} = \frac{F \cdot S}{T} = \frac{FS\omega}{2\pi},$$

где S – ход плунжера,
 $T = 2\pi/\omega$ – период колебаний.

Уравнение ускорения плунжера K без шатунной поправки имеет вид:

$$K = \omega^2 r \cos\varphi, \quad (3)$$

откуда следует, что максимальное значение ускорения имеет место в точке $\varphi = 0$ и равно $K_{\max} = \omega^2 r$.

Для оценки кривой мгновенной геометрической подачи введем два понятия:

коэффициент неравномерности σ , как:

$$\sigma = \frac{Q_t^{\max} - Q_t^{\min}}{Q_{\text{ср.}}}$$

и коэффициент заполнения D , как:

$$D = \frac{\tau}{T},$$

где τ – длительность подачи.

Для случая полного хода $S = S_{\max}$ получаем $\sigma = \pi$, $D = 0,5$.

Рассмотрим далее зависимости $S = f(\varphi)$ и $Q_t = f(\varphi)$ для двух случаев частичного хода: $Q = 0,5 Q_{\max}$ ($S = 0,5 S_{\max}$), **рис. 4**, и $Q = 0,25 Q_{\max}$ ($S = 0,25 S_{\max}$), **рис. 5**. Следует отметить, что при регулировании подачи длиной хода диапазон регулирования хода 4:1 принят максимальным. Объясняется это тем, что полученная подача является минимально допустимой с точки зрения точности дозирования.

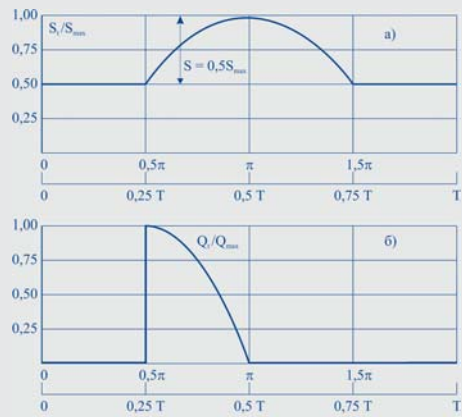


Рис. 4. График хода плунжера а) и подачи б) при $Q = 0,5 Q_{\max}$ ($S = 0,5 S_{\max}$)

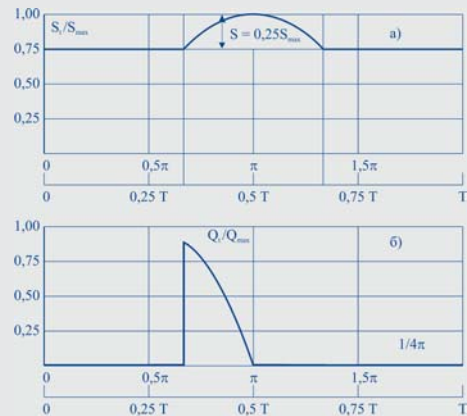


Рис. 5. График хода плунжера а) и подачи б) при $Q = 0,25 Q_{\max}$ ($S = 0,25 S_{\max}$)

Сравнение графиков рис. 3, 4, 5 показывает, что при уменьшении длины хода плунжера подача осуществляется на меньшей части синусоиды: при $Q = 0,5 Q_{\max}$ – на участке длиной $\pi/2$, при $Q = 0,25 Q_{\max}$ – на участке длиной $\pi/3$. Это приводит к увеличению коэффициента неравномерности σ и уменьшению коэффициента заполнения D . Для $Q = 0,5 Q_{\max}$ ($S = 0,5 S_{\max}$) получаем $\sigma = 2\pi$, $D = 0,25$, а для $Q = 0,25 Q_{\max}$ ($S = 0,25 S_{\max}$) получаем $\sigma = 3,46\pi$, $D = 0,167$.

Теперь произведем сравнение двух методов регулирования подачи: длиной хода и частотой ходов плунжера для рассматриваемых случаев $Q = 0,5 Q_{\max}$ (**рис. 6**) и $Q = 0,25 Q_{\max}$ (**рис. 7**).

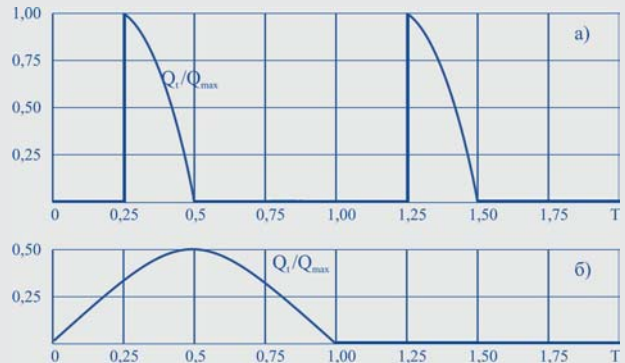


Рис. 6. Сравнение двух методов регулирования подачи $Q = 0,5 Q_{\max}$: а) длиной хода плунжера $S = 0,5 S_{\max}$; $n = n_{\max}$ б) частотой ходов плунжера $S = S_{\max}$; $n = 0,5 n_{\max}$

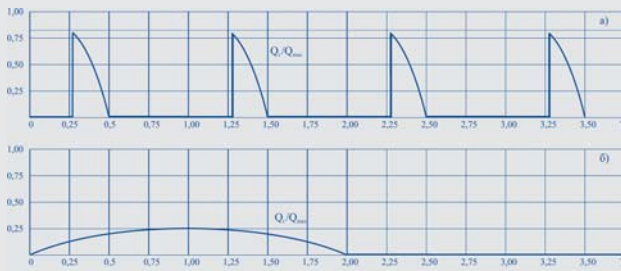


Рис. 7. Сравнение двух методов регулирования подачи $Q = 0,25 Q_{max}$:
а) длиной хода плунжера $S = 0,25 S_{max}$; $n = n_{max}$
б) частотой ходов плунжера $S = S_{max}$; $n = 0,25 n_{max}$

Прежде всего отметим, что при регулировании длиной хода происходит резкое изменение подачи в начале нагнетания. При $Q = 0,5 Q_{max}$ текущая подача мгновенно меняется от значения $Q_t = 0$ до $Q_t = Q_t^{max} = Fr\omega$. Это приводит к повышенным ускорениям движения жидкости и перегрузкам привода насоса.

При частотном регулировании изменение подачи носит плавный характер, а уменьшение угловой скорости ω , согласно уравнению (3), приводит к уменьшению ускорения K и, соответственно, уменьшению инерционной составляющей гидравлических потерь, улучшению кавитационной характеристики, уменьшению нагрузки на привод насоса.

Следует отметить также, что при частотном регулировании значения коэффициентов $\sigma = \pi$, $D = 0,5$ постоянны во всем диапазоне частот. Сравнение этих значений со значениями σ и D для случаев $Q = 0,5 Q_{max}$ и $Q = 0,25 Q_{max}$ при регулировании длиной хода также указывает на предпочтение частотного регулирования: коэффициент неравномерности меньше, а коэффициент заполнения больше, что особенно заметно при больших значениях регулирования. Однако следует отметить, что при больших значениях регулирования частотным методом увеличивается абсолютное значение времени отсутствия нагнетания жидкости. Например, при частоте ходов $n = 15$ ход/мин, когда период равен $T = 60/15 = 4$ сек, время отсутствия нагнетания равно $T/2 = 2$ сек. Возможно, что в некоторых случаях такое время является недопустимым по технологическим соображениям.

Рассмотрим вопрос о диапазоне регулирования подачи при частотном регулировании.

На рис. 8, 9, 10 представлены регулировочные характеристики – зависимости подачи от частоты ходов плунжера для трех насосов НД. Характеристики были определены при предельном давлении и максимальной длине хода $S = 32$ мм. Частота $n = 92$ ход/мин определена как номинальная, ввиду ее соответствия частоте ходов плунжера насосов НД с серийным двигателем мощностью $N = 0,25$ кВт и синхронными оборотами $n = 1500$ об/мин.

Полученные частотно - регулировочные характеристики линейны: это говорит о том, что единичный объем (подача за один ход) постоянен, не зависит от частоты ходов, а сама характеристика может быть описана простым уравнением:

$$Q = 0,06 \cdot n \cdot V_0 \quad (4)$$

где Q , л/ч – подача насоса, V_0 , см³/ход – действительная подача за один максимальный ход плунжера (приводится в паспорте на насос), n , ход/мин – частота ходов.

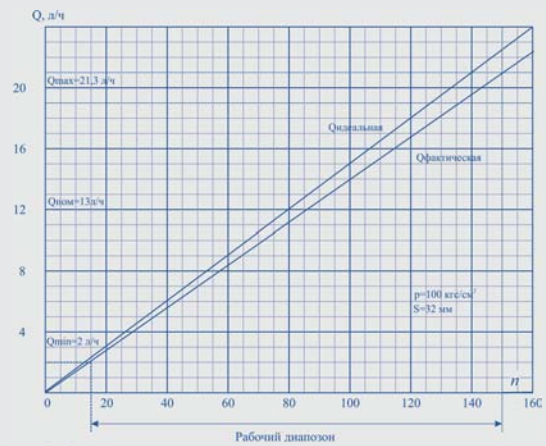


Рис. 8. Регулировочная характеристика насоса НД1,ОР 10/100К13МА (рабочий диапазон – n , ходов/мин.)

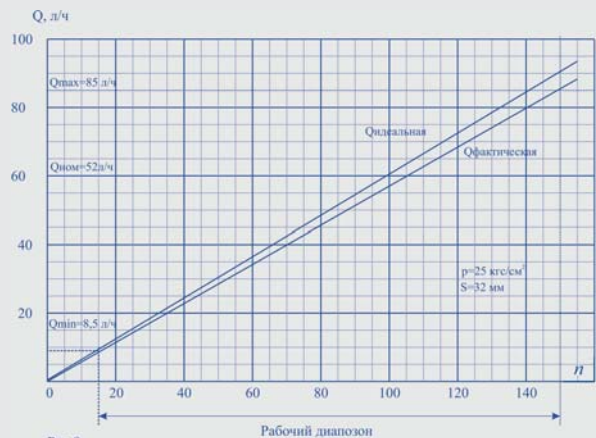


Рис. 9. Регулировочная характеристика насоса НД1,ОР 40/25К13МА (рабочий диапазон – n , ходов/мин.)

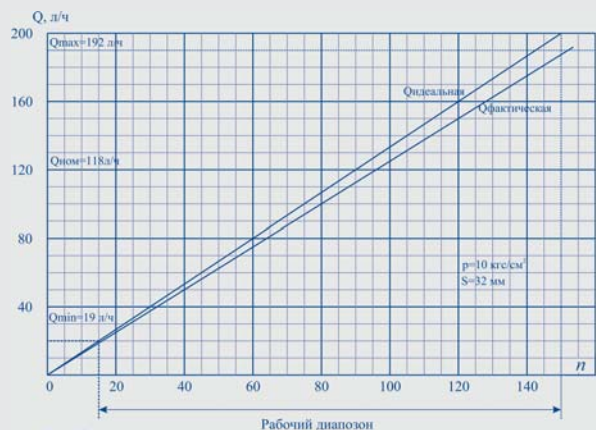


Рис. 10. Регулировочная характеристика насоса НДО,5Р 100/10К13МА (рабочий диапазон – n , ходов/мин.)

При описании зависимости подачи от длины хода плунжера принимаем, что потери единичного объема плунжера постоянны во всем диапазоне ходов. В этом случае уравнение подачи Q , л/ч при одновременном регулировании частотой n , ход/мин и длиной хода S запишется в виде:

$$Q = 0,06 \cdot n \cdot (V_0^{ид} \cdot \frac{S}{S_{max}} - \Delta V_0) , \quad (5)$$

где $V_0^{ид}$, см³/ход – идеальная подача за один максимальный ход плунжера (приводится в паспорте на насос),

$$\Delta V_0 = V_0^{ид} - V_0 - \text{потери единичного объема.}$$

Видно, что уравнение (4) представляет собой частный случай уравнения (5) для $S = S_{max}$. Анализ уравнения (5) также показывает, что имеется предельный ход S_0 :

$$\frac{S_0}{S_{max}} = \frac{\Delta V_0}{V_0^{ид}} = 1 - \frac{V_0}{V_0^{ид}},$$

при котором подача будет равна нулю при любой частоте ходов плунжера. Например, для исследуемого насоса НД 1,0Р 40/25 К13МА имеем $V_0^{ид} = 10,04$ см³/ход, $V_0 = 9,49$ см³/ход, $S_{max} = 32$ мм, откуда $S_0 = 1,8$ мм.

Чем определяется рабочий диапазон частоты ходов плунжера?

Верхнее значение частоты ходов определялось максимальными оборотами двигателя привода Varicon и оказалось равным $n_{max} = 150$ ход/мин. Возможность работы на этой частоте была подтверждена кавитационной характеристикой насоса НД 0,5 Р 100/10 К14МА, наиболее напряженного в кавитационном отношении (рис. 11). Определенная согласно [1], допустимая высота всасывания оказалась равной $H_{вс. доп.} = 6$ м, что соответствует требованиям к дозировочным насосам НД.

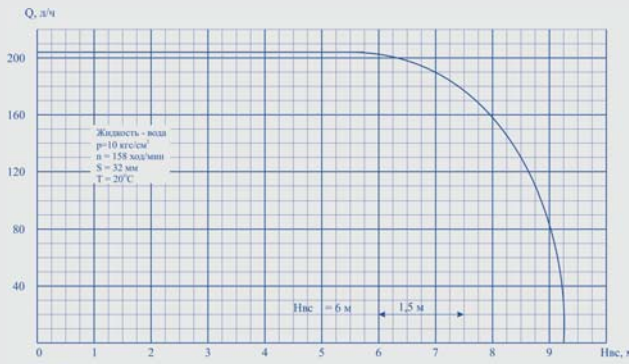


Рис. 11. Кавитационная характеристика насоса НД0,5Р 100/10К14МА

Нижнее значение частоты ходов определяется границей устойчивого, равномерного движения плунжера. Оно оказалось равным $n_{min} = 15$ ход/мин. Ниже этой границы движение плунжера носит неустойчивый, прерывистый характер.

Таким образом, диапазон частот определен $n = 15 \dots 150$ ход/мин, т. е. изменяется в 10 раз, что при линейности регулировочной характеристики приводит к изменению подачи также в 10 раз.

Отметим также, что максимальное значение подачи превышает номинальное значение в 1,6 раза. Значения подачи: номинальной $Q_{ном}$ ($n = 92$ ход/мин), максимальной Q_{max} ($n = 150$ ход/мин) и минимальной Q_{min} ($n = 15$ ход/мин) для ряда насосов НД приведены в табл. 1.

Скоростная характеристика насосов НД с приводом Varicon – зависимость частоты ходов n плунжера насоса от показания Π на шкале потенциометра двигателя приведена на рис. 12. Из графика видно, что рабочему диапазону частот $n = 15 \dots 150$ ход/мин соответствует рабочий диапазон по шкале $\Pi = 17 \dots 94$ %.

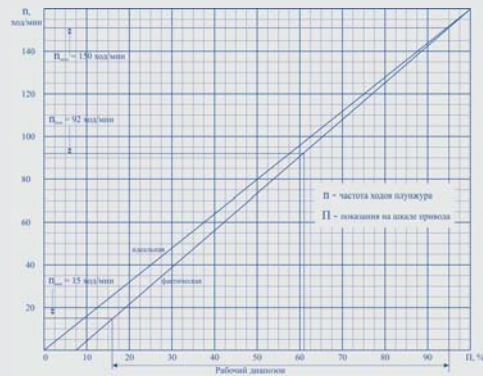


Рис. 12. Скоростная характеристика насоса НД с приводом VARICON

Таблица 1

№ п/п	Насос НД К13 (4) МА (В)	Подача, л/ч		
		$Q_{ном}$	Q_{max}	Q_{min}
1	Р 2,5/400	2,7	4,5	0,4
2	1,0Р 6,3/160	8,0	13,5	1,3
3	1,0Р 10/100	13	21	2,0
4	1,0Р 16/63	18	30	3,0
5	1,0Р 25/40	25	42	4,2
6	1,0Р 40/25	50	85	8,5
7	0,5Р 63/16	83	136	13,5
8	0,5Р 100/10	118	192	19,0

Заключение

1. Применение в дозировочных насосах НД частотно-регулируемого привода Varicon дает возможность:
– увеличить максимальное значение подачи в 1,6 раза,
– увеличить диапазон регулирования подачи до 10:1,
– улучшить качество регулирования подачи.

2. Присоединительные размеры привода Varicon совпадают с размерами двигателей, устанавливаемых на серийных дозировочных насосах НД производства компании «RINAR MAŠINBŪVE» и ООО «Гидромаш – Норнат». Установка приводов Varicon позволит увеличить подачу насоса, диапазон регулирования подачи, срок службы насоса.

[1] ОСТ26-06-2003. Насосы дозировочные плунжерные и агрегаты электронасосные на их базе. Технические условия.

**ГИДРОМАШ
НОРНАТ**

**Владимир Садошенко,
генеральный директор ООО
«Гидромаш - Норнат»**

**Борис Чернявский,
главный инженер 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>

**RINAR
MAŠINBŪVE**

**Сергей Березовский,
руководитель
коммерческого отдела
SIA «RINAR MAŠINBŪVE»,**

ул. Саламандрас, 1, г. Рига, LV-1024, Латвия
тел.: +371-67014664
факс: +371-67014620
E-mail: rinarmb@inbox.lv E-mail: rinar@nornat.net
<http://rinar.net>

© В. Садошенко, Б. Чернявский,
С. Березовский, 2009