

УДК 62-83

<https://doi.org/10.36906/KSP-2021/74>

**Мезенцева А.В.**

*ORCID: 0000-0001-9927-0286, канд. техн. наук*

*Нижневартровский государственный университет*

*г. Нижневартовск, Россия*

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДАЧИ НАСОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

**Аннотация.** Проводится исследование электрического способа процесса регулирования подачи механизмов центробежного типов и сравнение его с механическим, посредством введения в нагнетающую магистраль различных заслонок, в ходе которого установлено, что способ регулирования в системе электрического привода создает широкие возможности автоматизации и является наиболее оптимальным с точки зрения энергоэффективности.

**Ключевые слова:** двигатель; центробежный механизм; способ регулирования; подача задвижкой; напор; насос; электрический привод; потери мощности.

**Mezentseva A.V.**

*ORCID: 0000-0001-9927-0286, Ph.D.*

*Nizhnevartovsk State University*

*Nizhnevartovsk, Russia*

## INVESTIGATION OF THE REGULATION OF THE PUMP SUPPLY BY ELECTRIC METHOD

**Abstract.** The study of the electric method of the process of regulating the supply of centrifugal mechanisms is carried out and its comparison with the mechanical one, by introducing various dampers into the discharge line, during which it is established that the control method in the electric drive system creates wide automation opportunities and is the most optimal from the point of view of energy efficiency.

**Key words:** motor, centrifugal mechanism, control method, valve feed, head, pump, electric drive, power loss.

Одним из наиболее эффективных способов регулирования подачи механизмов с вентиляторным моментом на валу является изменение скорости в системе регулируемого электрического привода. Для центробежных механизмов используют электропривод с

асинхронными двигателями, в котором используются методы параметрического регулирования или каскадные схемы включения (<https://clck.ru/ZADiU>).

В первом случае энергия скольжения рассеивается в виде тепла в двигателе и дополнительных регулировочных резисторах, во втором – энергия скольжения главного приводного двигателя направляется на главный ведущий вал с помощью преобразующих машин или возвращается в сеть.

Количество электроэнергии, потребляемой насосным агрегатом за время  $t$ , при работе с постоянной подачей и неизменным давлением, определяется по формуле [1, с. 37]:

$$W = P \cdot t, \quad (1)$$

где  $t$  – время работы, ч.;

$P$  – мощность насосного агрегата.

В реальных установках насосные агрегаты обычно работают с переменной подачей и, соответственно, с переменным давлением. Вследствие этого мощность, потребляемая агрегатом в течение некоторого времени, изменяется. Использование формулы (1) ограничивается теми случаями, когда насосная установка длительно работает в равномерном установившемся режиме. Для того чтобы оценить возможности энергосберегающего режима при регулировании нужно проанализировать и задать работу двигателя в установившемся режиме работы таким, чтобы при заданном моменте нагрузки и заданной скорости ротора получить условия, при которых обеспечивается минимум потерь в двигателе [3, с. 49].

Традиционные способы регулирования подачи насосных установок состоят в дросселировании (изменении крутизны характеристики трубопровода для уменьшения или увеличения подачи путем открытия или закрытия задвижки) напорных линий насосов и изменении общего числа работающих агрегатов по одному из технологических параметров – давлению на коллекторе или в диктующей точке сети, уровню в приемном или регулирующем резервуаре и др. Эти способы регулирования направлены на решение технологических задач и практически не учитывают энергетических аспектов транспорта жидкости [4, с. 21].

При таком регулировании от 5 до 15%, а в отдельных случаях до 25–30% потребляемой электроэнергии затрачивается нерационально из-за: потерь энергии в дросселирующем органе, создания избыточных напоров в трубопроводной сети, утечек и непроизводительных расходов воды в сети и у потребителя, а также увеличения геометрического подъема при откачке воды из резервуаров канализационных насосных станций и т. д. [2, с. 16].

Насосные установки работают круглосуточно и круглогодично. От их работы напрямую зависит энерго- и ресурсосбережение.

Экономичность электрического привода оценивается потерями мощности при регулировании производительности механизма, которые можно определить как:

$$\Delta P = P_{12} - P_2. \quad (2)$$

где  $P_{12}$  – мощность, потребляемая двигателем из сети, кВт:

$$P_{12} = \frac{P_2}{(1-s)} = \frac{\omega_0}{\omega} P_2, \quad (3)$$

$P_2$  – мощность на валу двигателя, кВт.

Из мощности, потребляемой двигателем из сети (3), выразим мощность на валу двигателя  $P_2$ , необходимую для работы механизма с вентиляторной характеристикой, используя формулы пропорциональности:

$$P_2 = \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^3 P_{2H}. \quad (4)$$

Получим выражение:

$$P_{12} = \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^3 \frac{\omega_0}{\omega} P_{2H} = \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 \frac{\omega_0}{\omega_H} P_{2H}. \quad (5)$$

Подставив выражения (4) и (5) в исходное уравнение (2), получим:

$$\Delta P = \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 \frac{\omega_0}{\omega_H} P_{2H} - \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^3 P_{2H}. \quad (6)$$

Определим максимальные потери в роторной цепи электродвигателя при регулировании скорости. Для этого возьмем производную по скорости в (6) и приравняем ее к нулю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\omega} \Delta P = 2\omega \frac{\omega_0}{\omega_H^3} P_{2H} - \frac{3\omega^2}{\omega_H^3} P_{2H} = 0; \\ (2\omega_0 - 3\omega) \frac{\omega_0}{\omega_H^3} P_{2H} = 0; \quad \omega_{\max} = \frac{2}{3} \omega_0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

откуда

$$\Delta P_{\max} = \frac{4}{9} \left(\frac{\omega_0}{\omega_H}\right)^3 P_{2H} - \frac{8}{27} \left(\frac{\omega_0}{\omega_H}\right)^3 P_{2H} = \frac{4}{27} \left(\frac{\omega_0}{\omega_H}\right)^3 P_{2H}. \quad (8)$$

В соответствии с выражениями (4-6) на рисунке 1 построены зависимости  $P_{12}$ ,  $P_2$  и  $\Delta P$  от  $\omega$ .

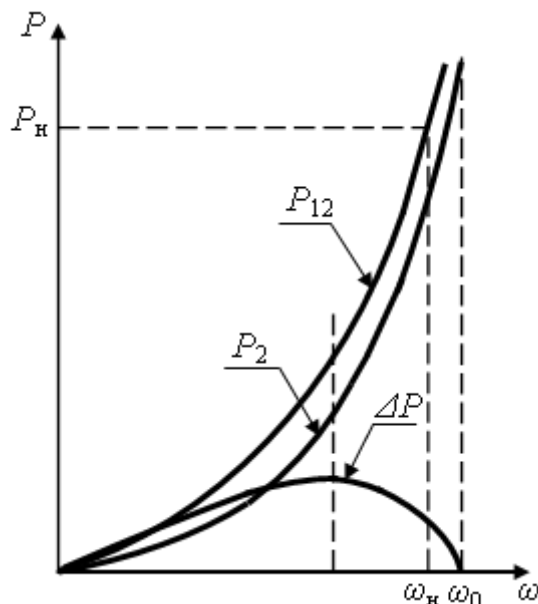


Рис. 1. Зависимости  $P_{12}$ ,  $P_2$ ,  $\Delta P=f(\omega)$  при регулировании скорости двигателя

Из рисунка 1 видно, что максимум потерь составляет примерно  $(0,15 \div 0,17)P_2$  мощности на валу и соответствует скорости 67% от синхронной.

В реализации регулирования подачи наиболее простым является способ дросселирования посредством введения в нагнетающую магистраль различных заслонок. Этот способ основан на изменении результирующего сопротивления магистрали (<https://clck.ru/ZAEDx>). График характеристик насоса и магистрали приведен на рисунке 2.

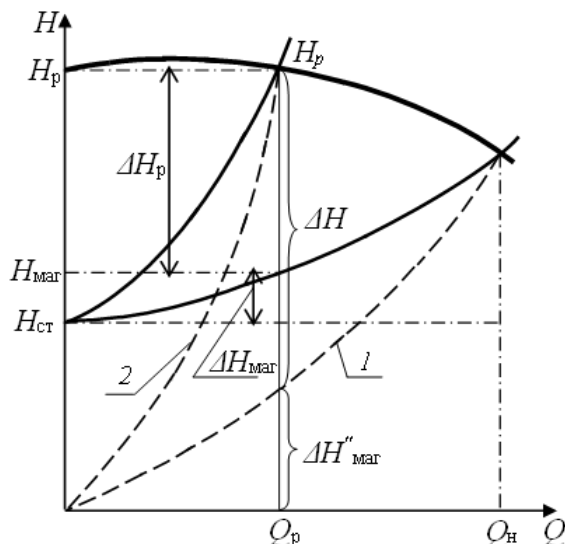


Рис. 2.  $Q$ - $H$ -характеристики при регулировании подачи насоса

При изменении скорости рабочая точка механизма перемещается по  $Q$ - $H$ -характеристике до точки пересечения  $H_1$  с новой характеристикой магистрали в сторону снижения подачи. Часть напора  $\Delta H_p$  на результирующем устройстве при этом теряется. Для оценки КПД данного способа регулирования  $\eta_{м.с.}$  примем, что КПД механизма и электродвигателя при изменении подачи остается неизменным.

Тогда

$$\eta_{м.с.} = \frac{H_{\text{маг}} Q_p}{(H_{\text{маг}} + \Delta H_p) Q_p} = \frac{H_{\text{ст}}}{H_p} + \frac{\Delta H_{\text{маг}}}{H_p}, \quad (9)$$

где  $H_{\text{маг}}$  – напор, создаваемый механизмом после регулирующего органа;

$H_p = H_1$  – напор в магистрали перед регулирующим органом;

$\Delta H_p$ ,  $\Delta H_{\text{маг}}$  – потери напора в магистрали;

$H_{\text{ст}}$  – статический напор;

$Q_p = Q_1$  – подача механизма совместно с регулирующим органом.

Из (9) и рисунка 2 следует, что при использовании данного способа регулирования КПД тем ниже, чем меньше статический напор  $H_{\text{ст}}$ .

При  $H_{\text{ст}} = 0$  получаем:

$$\eta_{м.с.} = \frac{\Delta H'_{\text{маг}}}{H_p} = \frac{H_n}{H_p} \left( \frac{Q_1}{Q_n} \right)^2 < \left( \frac{Q_p}{Q_n} \right)^2, \quad (10)$$

где  $H_n$ ,  $Q_n$  – номинальные значения напора и подачи механизма.

Из (10) при  $H_{ст}=0$  следует, что КПД снижается квадратично от диапазона регулирования подачи.

Определим потери мощности при  $H_{ст}=0$  и регулировании производительности задвижкой. На рисунке 2 характеристика 1 соответствует случаю отсутствия на магистрали дополнительного сопротивления, а характеристика 2 – увеличению сопротивления магистрали и снижению подачи до уровня  $Q_1$ . При этом в магистрали на задвижке создается перепад напора:

$$\Delta H = H_p - \Delta H'_{\text{маг}}, \quad (11)$$

и потеря мощности:

$$\Delta P_{\text{зад}} = cQ_1 \Delta H = cQ_1 (H_p - \Delta H'_{\text{маг}}). \quad (12)$$

С учетом того, что характеристики 1 и 2 являются параболами можно записать:

$$\Delta H'_{\text{маг}} = H_n \left( \frac{Q_1}{Q_n} \right)^2. \quad (13)$$

Тогда получим:

$$\Delta P_{\text{зад}} = cQ_1 H_n \left[ \frac{H_p}{H_n} - \left( \frac{Q_1}{Q_n} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

Если для упрощения принять  $H_p \approx H_n$  и ввести обозначение  $Q_1/Q_n = q$  и с учетом формул пропорциональности для мощности, получим:

$$\Delta P_{\text{зад}} = (1 - q^2)qP_n. \quad (15)$$

Из данного выражения следует, что зависимость  $\Delta P_{\text{зад}}(q)$  имеет максимум:

$$\frac{d}{dq} \Delta P_{\text{зад}} = (1 - 3q^2) = 0, \quad (16)$$

откуда

$$q_{\text{max}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,576. \quad (17)$$

Тогда максимальные потери при регулировании подачи задвижкой

$$\Delta P_{\text{зад,max}} = \frac{2}{3\sqrt{3}} P_n = 0,385 P_n. \quad (18)$$

Сравнение (8) с полученным результатом (18) показывает, что регулирование изменением скорости при наличии потерь скольжения приводит к уменьшению максимума потерь мощности более, чем в 2 раза по сравнению с регулированием подачи задвижкой. Регулирование подачи задвижкой (дрессельное регулирование) целесообразно применять только в установках мощностью в несколько киловатт при небольшом диапазоне и плавности регулирования.

Таким образом, электрический способ создает широкие возможности автоматизации процесса регулирования подачи механизмов центробежного типов и является наиболее оптимальным, так как исключает механические регулирующие устройства, снижает потери мощности при регулировании и повышает эффективность работы.

### Литература

1. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
2. Лищенко С.А. Регулирование работы насосов на водопроводных насосных станциях. М.: Стройиздат, 2015. 84 с.
3. Мезенцева А.В., Шалимов М.С. Анализ условий эффективной работы электропривода в системе управления асинхронным двигателем // Энерго- и ресурсосбережение - XXI век: Материалы XV международной научно-практической интернет-конференции. 2017. С. 49-52.
4. Родин И.Я., Сидорин А.Е. Каскадно-частотное управление асинхронными двигателями на насосных станциях // Электротехнические комплексы и системы управления. 2006. № 2. С. 21-28.

© Мезенцева А.В., 2021