

УДК 621.34

Т. С. Камалов, д-р техн. наук,
О. Х. Ишназаров, канд. техн. наук

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНИЗМОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. Представлены аналитические выражения для расчета режимов работы частотно-регулируемого электропривода насосной установки откачки пульпы с учетом параметров насосного агрегата в функции питающего напряжения сети и нагрузки на валу.

Ключевые слова: насос, электропривод, частотное регулирование, математическая модель, режим работы

T. Kamalov, ScD.,
O. Ishnazarov, PhD.

ANALYTICAL RESEARCH OF ELECTRIC DRIVE OF TURBO MACHINERY OF THE MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY

Abstract. The paper presents the analytical expressions for calculating modes pump unit pumping slurry within the parameters of the pump unit as a function of the supply voltage and the load on the shaft.

Keywords: pump, electric drive, frequency regulation, mathematical model, mode of operation

T. S. Kamalov, д-р техн. наук,
О. Х. Ишназаров, канд. техн. наук

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНІЗМІВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Анотація. Представлені аналітичні вирази для розрахунку режимів роботи частотно-регульованого електропривода помпової установки відкачування пульпи з врахуванням параметрів помпового агрегату в функції напруги живлячої мережі та навантаження на валу.

Ключові слова: помпа, електропривод, частотне регулювання, математична модель, режим роботи

Введение. Важной задачей для предприятий горно-металлургической промышленности является обеспечение энергосбережения, что соответствует Постановлению Кабинета Министров Республики Узбекистан от 8 января 2014 года № 5 «О дополнительных мерах по сокращению производственных затрат и снижению себестоимости продукции в промышленности». С этой целью в последнее время на предприятиях горно-металлургической промышленности широкое распространение получили современные системы автоматизации технологических процессов на основе частотно-регулируемого электропривода, особенно для турбомеханизмов (вентиляторы, насосы и компрессоры), которые объединяются в один класс производственных механизмов [1].

Как показали наши исследования, насосные установки откачки пульпы являются связующим звеном технологического процесса переработки руды и одним из наиболее массовых и энергоемких систем турбомеха-

низмов горно-металлургической промышленности. Наиболее распространёнными являются насосы 5Гр-8, 8Гр-8 и 12Гр-8, с мощностями 40, 110 (132) и 355 кВт соответственно.

Практика эксплуатации показывает, что в большинстве случаев электроприводы технологических установок насосов откачки пульпы являются нерегулируемыми, а регулирование производительности при этом осуществляется включением и отключением насоса.

На рис. 1 приведена схема насосной установки откачки пульпы с переменным статическим напором. На рис. 2 представлен график совместной работы зумпфа, насоса и пульпопровода с переменным статическим напором.

В циклическом режиме работы (рисунках 1 и 2) [2] при включении в работу насоса статический напор равен H_{n1} , а при отключении, соответственно, становится равным H_{n2} . Изменение статического напора определяется разностью отметок уровня включения (УВ) и уровня отключения (УО) насоса. По этой причине характеристика пульпопровода

© Камалов Т. С., Ишназаров О.Х., 2015

в начальный период откачки занимает положение 1, а в конце – положение 2 (рис. 2). При этом рабочая точка насоса, работающего с постоянной частотой вращения, перемещается по напорной характеристике насоса от точки *a* до точки *б*, т. е. насос работает с переменным напором от H_a до H_b .

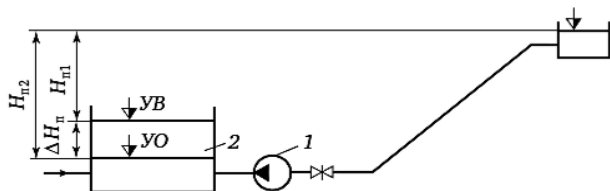


Рис. 1. Схема насосной установки откачки пульпы с переменным статическим напором:
УВ – уровень включения насоса;
УО – уровень отключения насоса;
1 – насос; 2 – зумпф

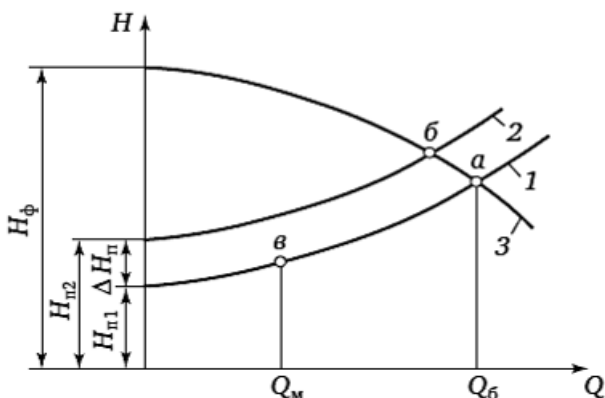


Рис. 2. График совместной работы зумпфа, насоса и пульпопровода с переменным статическим напором:
1 – характеристика пульпопровода при включении насоса в работу;
2 – то же при отключении насоса;
3 – характеристика насоса

Откачка пульпы с более высокого уровня требует меньших затрат электроэнергии, чем с нижнего [1 – 3]. В этом случае создается более экономичный режим работы насосной установки. Такой режим может быть обеспечен регулированием частоты вращения насоса. При этом рабочая точка насоса перемещается по характеристике пульпопровода от точки *a* до точки *в* (рис. 2), т. е. насос работает с переменным напором от H_a до H_b .

Как показали наши исследования, а также исследования авторов [1; 3 – 7], частотно-регулируемый электропривод является са-

мым экономичным способом регулирования производительности насосов. В соответствии с этим ниже рассмотрим режим работы насосной установки откачки пульпы с регулируемым и частотно-регулируемым электроприводом.

Реальные характеристики насосного агрегата могут быть получены только при совместном рассмотрении характеристик насоса и напорного трубопровода [3; 8]. В связи с этим нами разработана математическая модель функционирования системы «асинхронный двигатель – насос – напорный пульпопровод».

Основной характеристикой насоса является его расходно-напорная характеристика, т.е. зависимость напора от расхода. С достаточной точностью в пределах рабочей зоны эта характеристика может быть представлена параболой [1; 8]

$$H = H_0 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - A Q^2, \quad (1)$$

где $A = (H_0 - H_n) / Q_n^2$; H – полный напор насоса, м; Q – производительность, м³/с; H_0 – напор при $Q=0$ и $\omega=\omega_n$; ω – угловая скорость вращения рабочего колеса, рад/с; H_n, Q_n, ω_n – их номинальные значения.

Характеристику напорного пульпопровода можно описать следующим выражением [2]:

$$H = H_{cm} + R Q^2; \quad (2)$$

здесь H_{cm} – статический напор (м); R – коэффициент сопротивления напорного пульпопровода. Согласно [9] для прямого участка пульпопровода $R = 0,083 \lambda L / d^5$ и для местных сопротивлений $R = 0,083 \xi / d^4$:

здесь $\lambda = 0,04 \div 0,05$ – коэффициент трения пульпы о стенки пульпопровода; L – длина пульпопровода, м; d – диаметр пульпопровода, м; ξ – коэффициент местного сопротивления, равный для задвижек $\xi = 0,5$, для закругленного на 90° колена $\xi = 0,3$, для обратного клапана $\xi = 5,0$.

Выражения (1) и (2) определяют рабочий режим насосного агрегата. Решая их совместно относительно производительности, получим

$$Q = \frac{\sqrt{(A+R) \left(H_0 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - H_{cm} \right)}}{A+R}. \quad (3)$$

Используя (3), можно определить мощность на валу насоса, работающего на напорный пульпопровод,

$$N_{\text{мех}} = N_0 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^3 + B \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 Q, \quad (4)$$

где $B = (N_{\text{мех.н}} - N_0) / Q_n$; N_0 – мощность на валу при $Q=0$ и $\omega=\omega_n$; $N_{\text{мех.н}}$ – номинальное значение мощности на валу.

Полезная мощность насоса определяется формулой

$$N = \frac{\rho H Q}{102}, \quad (5)$$

где ρ – плотность пульпы, значение которой принимают $1200 \div 1400$ кг/м³ (плотность меняется в зависимости от состава и твердости добываемой руды).

Отношение полезной мощности (5) к мощности на валу (4) дает КПД насоса, работающего на напорный пульпопровод,

$$\eta_N = N / N_{\text{мех}}. \quad (6)$$

Разделив обе части (4) на угловую частоту вращения рабочего колеса ω , получим момент сопротивления на валу насосного агрегата

$$M_c = M_0 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 + (M_n - M_0) \frac{\omega}{\omega_n} Q. \quad (7)$$

Выражения для потребляемой, электромагнитной мощности и мощности на валу двигателя имеют следующий вид:

$$P_1 = \left(\frac{K_u}{F} \right)^2 \frac{m U_n^2}{D^2} \left\{ r_1 \left[\left(\frac{r_2}{\beta} \right)^2 + x_r^2 + \frac{r_2'}{\beta} x_{\mu n}^2 F \right] \right\}, \quad (8)$$

$$P_3 = \left(\frac{K_u}{F} \right)^2 \frac{m U_n^2 r_2' x_{\mu n}^2 F}{\beta D^2}, \quad (9)$$

$$P_2 = \left(\frac{K_u}{F} \right)^2 \frac{m U_n^2 r_2' x_{\mu n}^2}{\beta D^2} (F - s), \quad (10)$$

$$\text{где } D = \sqrt{\left(\frac{r_1 r_2'}{F \beta} - x_s x_r \sigma \right)^2 + \left(\frac{r_2'}{\beta} x_s + \frac{r_1}{\beta} x_{\mu n} \right)^2},$$

$a = mp / 19,62 f_n \pi$, а p и m – число пар полюсов двигателя и число фаз статора; $K_u = U / U_n$ – относительное напряжение; $F = f / f_n$ – относительная частота; $x_s = x_{1n} + x_{\mu n}$, $x_r = x_{2n} + x_{\mu n}$, $\sigma = 1 - x_{2n}^2 / x_s x_r$, r_1 и x_1 – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора; r_2' и x_2' – приведенные активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора; $x_{\mu n}$ – индуктивное сопротивление намагничивающей цепи двигателя, s – скольжение двигателя; $\beta = Fs$ – абсолютное скольжение.

Электромагнитный момент двигателя

$$M_3 = \frac{2M_{\text{эк}}(1+q\beta_\kappa)}{\frac{\beta}{\beta_\kappa} + \frac{\beta_\kappa}{\beta} + 2q\beta_\kappa}, \quad (11)$$

где

$$M_{\text{эк}} = \left(\frac{K_u}{F} \right)^2 \frac{a U_n^2 x_{\mu n}^2 / 2}{x_r \sqrt{\left[\left(\frac{r_1}{F} \right)^2 + x_s^2 \right] \left[\left(\frac{r_1}{F} \right)^2 + (x_s \sigma)^2 \right]} + \frac{r_1}{F} x_{\mu n}^2},$$

$$q = \frac{r_1 x_{\mu n}^2 / r_2' F}{\left(\frac{r_1}{F} \right)^2 + x_s^2}, \quad \beta_\kappa = \frac{r_2'}{x_r} \sqrt{\frac{\left(\frac{r_1}{F} \right)^2 + x_s^2}{\left(\frac{r_1}{F} \right)^2 + x_s^2 \sigma^2}}.$$

Из (8) и (10) определяется КПД двигателя

$$\eta_d = P_2 / P_1. \quad (12)$$

Найдем зависимости скольжения от питающего напряжения и момента нагрузки на валу с учетом полного уравнения механической характеристики двигателя (11). При этом учитываем, что в установившемся режиме $M_3 = M_c$, так как момент механических потерь весьма мал по сравнению с полезным вращающимся моментом, который равен моменту сопротивления на валу.

Разделив обе части (11) на номинальный электромагнитный момент, получим

$$\mu = \frac{2\lambda(1+q\beta_\kappa)}{2q\beta\beta_\kappa^2 + \beta^2 + \beta_\kappa^2}, \quad (13)$$

где
$$\lambda = \frac{M_{эк}}{M_{эн}}, \mu = \frac{M_c}{M_{сн}} = \frac{M_{э}}{M_{эн}}.$$

Решив (13) относительно абсолютного скольжения, получим

$$\beta_{1,2} = \pm \frac{1}{\mu} \left[\left(\lambda q \beta_k - \mu q \beta_k + \sqrt{\lambda^2 q^2 \beta_k^2 - 2\lambda \mu q^2 \beta_k^2 + \mu^2 q^2 \beta_k^2 + 2\lambda^2 q \beta_k - \lambda} \right) \beta_k \right] \quad (14)$$

Так как $\omega = \omega_n (F - \beta)$, если считать $\omega_n = \omega_0$, то относительная скорость вращения определяется

$$\frac{\omega}{\omega_n} = F - \beta. \quad (15)$$

Выразим относительную скорость рабочего колеса насоса, входящую в (3) и (4), через относительную частоту и параметр абсолютного скольжения. Подставив (15) в (3) и выполнив некоторые преобразования, найдем производительность насоса в функции относительной частоты и параметра абсолютного скольжения

$$Q = \frac{\sqrt{(F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm})(A+R)}}{A+R}. \quad (16)$$

Из (5) и (16) полезная мощность насоса в функции относительной частоты и абсолютного скольжения

$$N = \frac{\rho H}{102} \frac{\sqrt{(F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm})(A+R)}}{A+R}. \quad (17)$$

Аналогично из (4) и (7) механическая мощность и момент сопротивления на валу насосного агрегата в функции относительной частоты и абсолютного скольжения

$$N_{мех} = \frac{1}{A+R} \left((F-\beta)^2 (AFN_0 - AN_0\beta) + FN_0R - N_0R\beta + B\sqrt{(F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm})(A+R)} \right), \quad (18)$$

$$M_c = M_0 (F - \beta)^2 + \frac{1}{A+R} \left((M_n - M_0)(F - \beta) \times \sqrt{(F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm})(A+R)} \right). \quad (19)$$

Отношение (17) к (18) дает КПД насоса в функции относительной частоты и абсолютного скольжения приводного двигателя

$$\eta_N = \frac{1}{102} \times \frac{\rho H \sqrt{(F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm})(A+R)}}{(F-\beta)^2 (AFN_0 - AN_0\beta + FN_0R - N_0R\beta + B\sqrt{(F^2 H_0 - 2FH_0\beta + H_0\beta^2 - H_{cm})(A+R)})}. \quad (20)$$

КПД насосного агрегата в функции относительной частоты и абсолютного скольжения определяются с помощью (20) и (12)

$$\eta_{НА} = \eta_N \eta_0. \quad (21)$$

При выполнении указанных расчетов необходимо знать закон частотного управления и диапазон изменения частоты. Для обеспечения устойчивой работы электродвигателя, ограничения его перегрузки по току и магнитному потоку, поддержания высоких энергетических показателей в частотном преобразователе должно поддерживаться определенное соотношение между напряжением и частотой, зависящее от вида механической характеристики насоса. Как известно, закон частотного управления для насосов записывается следующим образом [2; 4; 10]:

$$K_U = F^2. \quad (22)$$

Диапазон регулирования частоты при рассматриваемых условиях определяется верхним значением, которое соответствует номинальной частоте сети f_n , и нижним её значением, которое зависит от технологических условий эксплуатации насосов

$$f_{\min} = f_n \sqrt{\frac{H_{cm \min}}{H_n}}, \quad (23)$$

где $H_{cm \min}$ – минимально возможный напор насоса.

Таким образом, разработана математическая модель всего комплекса, включающего частотно-регулируемый электропривод и насос, позволяющая исследовать их как систему взаимосвязанных элементов. Данная модель позволяет исследовать режим работы агрегата и в частном случае, когда скорость двигателя не регулируется ($F = 1$).

Список использованной литературы

1. Онищенко Г. Б. Электропривод турбомеханизмов / Г. Б. Онищенко, М. Г. Юньков. – М. : Энергия, 1972. – 240 с.
2. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б. С. Лезнов. – М. : Машиностроение, 2013. – 176 с.

3. Камалов Т. С. Влияние параметров насоса, напорного трубопровода и питающей сети на энергетическую эффективность электропривода насоса / Т. С. Камалов, О. Х. Ишназаров, К. Муминов // Сборник статей республиканской научно-практической конференции. – Ташкент : – 2003. ТИИМ. – С. 100 – 105.

4. Камалов Т. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных станций систем машинного орошения / Т. С. Камалов. – Ташкент : Фан, 2014. – 368 с.

5. ООО «АББ». Анализ технических решений: устройства плавного пуска, частотно-регулируемый привод или параллельная схема управления центробежными насосами / Журнал «ИСУП». – М. : – 2011. – № 6 (36). – С. 43 – 50.

6. Ильинский Н. Ф. Электропривод: энерго – и ресурсосбережение / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 202 с.

7. Vasquez H., and Parker J., (2004), A new Simplified Mathematical Model for a Switched Reluctance Motor in a Variable Speed Pumping Application, *Mechatronics 14*, pp. 1055 – 1068.

8. Ghafouri J, Khayatzadeh F., and Khayatzadeh A., (2012), Dynamic Modeling of Variable Speed Centrifugal Pump Utilizing MATLAB / SIMULINK, *International Journal of Science and Engineering Investigation*, Vol. 1, Iss. 5, June 2012.

9. Копытов Ю. В. Экономия электроэнергии в промышленности. Справочник / Ю. В. Копытов, Б. А. Чуланов. – М. : Энергия, 1978. – 117 с.

10. Осташевский Н. А. Потери в частотно-управляемом асинхронном двигателе при различных законах регулирования и типах преобразователей частоты / Н. А. Осташевский, В. Н. Иваненко, А. Н. Петренко // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 3. – С. 37 – 41.

11. Дядюн С. В. Математическое моделирование систем водоснабжения совместно с активными источниками и регулирующими емкостями / С. В. Дядюн, О. Н. Штельма // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – № 4 (15). – Том 1. – С. 16 – 18.

12. Свистунов В. А. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода / В. А. Свистунов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки* – 2013. – № 12-2. – С. 135 – 140.

Получено 10.01.2015

References

1. Onishchenko G.B., and Yunkov M.G., *Elektroprivod turbomekhanizmov* [Electric Drive of the Turbo Machinery], (1972), Moscow, Russian Federation, *Energy*, 240 p. (In Russian).

2. Leznov B.S. *Chastotno-reguliruemiyi elektroprivod nasosnykh ustanovok*, [Variable Frequency Drive of Pump Installations], (2013), Moscow, Russian Federation, *Engineering*, 176 p. (In Russian).

3. Kamalov T.S, Ishnazarov O.Kh., and Muminov K. *Vliyanie parametrov nasosa, naporного truboprovoda i pitayushchei seti na energeticheskuyu effektivnost' elektroprivoda nasosa*, [Influence of Pump, Pressure Pipe and Supply on the Energy Efficiency of the Electric Pump], (2003), *Collection of Articles of the Republican Scientific and Practical Conference*. Tashkent, Republic of Uzbekistan, *TIIM*, pp. 100 – 105 (In Russian).

4. Kamalov T.S. *Chastotno-reguliruemiyi elektroprivod nasosnykh stantsii sistem mashinnogo orosheniya*, [Variable Frequency Drive Pump Stations of Machine Irrigation Systems], (2014), Tashkent, Republic of Uzbekistan, *Fan*, 368 p. (In Russian).

5. ООО “АББ” *Analiz tekhnicheskikh reshenii: ustroystva plavnogo puska, chas-totno-reguliruemiyi privod ili parallel'-naya skhema upravleniya tsentrobezhnymi naso-sami*, [Analysis of Technical Solutions: Soft Starters, Variable Frequency Drive or Parallel Circuit of the Centrifugal Pump], (2011), Moscow, Russian Federation, *Magazine “PMIS”*, No. 6 (36), pp. 43 – 50 (In Russian).

6. Il'inskiy N.F., and Moskalenko V.V. *Elektroprivod: energo – i resursosberezhenie*, [Electro Drive: Energy – and Resource Saving], (2008), Moscow, Russian Federation, *Publishing Center “Academy”*, 202 p. (In Russian).

7. Vasquez H., and Parker J., (2004), A new Simplified Mathematical Model for a Switched Reluctance Motor in a Variable Speed Pumping Application, *Mechatronics 14*, pp 1055 – 1068.

8. Ghafouri J, Khayatzadeh F., and Khayatzadeh A., (2012), Dynamic Modeling of Variable Speed Centrifugal Pump Utilizing MATLAB / SIMULINK, *International Journal of Science and Engineering Investigations*, Vol. 1, Iss. 5, June 2012.

9. Kopitov J., and Chulanov B.A. *Ekonomiya elektroenergii v promyshlennosti. Spravochnik [Energy Savings in the Industry. Dictionary]*, (1978), Moscow, Russian Federation, *Energy*, 117 p. (In Russian).

10. Ostashevsky N.A, Ivanenko V.N., and Petrenko A.N., *Poteri v chastotno-upravlyаемом asinkhronnom dvigatele pri razlichnykh zakonakh regulirovaniya i tipakh preobrazovatelei chastoty*, [Loss in the Frequency-Controlled Induction Motor with Various Laws Regulating and Types of the Frequency Converters], (2009), *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. No. 3, pp. 37 – 41 (In Russian) (In Russian).

11. Dyadyun S.V., and Shtelma O.H. *Matematicheskoe modelirovanie sistem vodosnabzheniya sovместно s aktivnymi istochnikami i reguliruyushchimi emkostyami*, [Mathematical Modeling of Water Supply Systems in Conjunction with the Active Sources and Regulatory Capacities], (2014), *Technology Audit and Production Reserves*, No. 4 (15), Vol. 1, pp. 16 – 18 (In Russian).

12. Svistunov V.A. *Avtomatizatsiya nasosnoi stantsii s primeneniem chastotno-reguliruемого электропривода*, [Automation of Pump Stations with Variable Frequency Drive], (2013), *Bulletin of the Tula State University. Technical Sciences*, No. 12-2, pp. 135 – 140 (In Russian).



Камалов
Толяган Сиражиддинович,
д-р тех. наук, проф., зав.
лабораторий автоматизи-
рованного электропривода
Ин-та энергетики и
автоматики Академии наук
Республики Узбекистан.
Узбекистан, г. Ташкент,
ул. Дурмон йули, 29.
E-mail: tkamalov@yandex.ru



Ишназаров
Ойбек Хайриллаевич,
канд. тех. наук, зам. дирек-
тора по науке Ин-та энер-
гетики и автоматики Ака-
демии наук Республики
Узбекистан.
Узбекистан, г. Ташкент,
ул. Дурмон йули, 29.
E-mail: iozbek@gmail.com