

*к.т.н. Чехлатый Н.А.,
(НИИГМ им. М.М.Федорова, г. Донецк, Украина)*

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПУСКЕ НАСОСОВ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА

Розглянуто питання підвищення енергетичної ефективності головних водовідливних установок і дана оцінка величини втрат електроенергії під час пуску насосів головного водовідливу.

***Ключові слова:** водовідливна установка, електродвигун, витрата електроенергії, перехідний процес, енергозбереження.*

Рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности главных водоотливных установок и дана оценка величины потерь электроэнергии при пуске насосов главного водоотлива.

***Ключевые слова:** водоотливная установка, электродвигатель, расход электроэнергии, переходный процесс, энергосбережение.*

Среди энергетических объектов угольных шахт главные водоотливные установки (ГВУ) являются одними из наиболее энергоемких (8-15 %); так, для откачки шахтных вод применяются центробежные насосы производительностью 300...500 м³/час с напором до 1000 м. Ежесуточное откачивание воды из угольных шахт Украины составляет около 1250 тыс. м³ с потреблением электроэнергии на сумму больше 320 млн.грн. На эти цели постоянно работает 1373 насосных агрегата общей мощностью более 880 тыс. кВт. Суммарный объем откачиваемых шахтных вод в целом по отрасли достигает 10 млрд. м³ в год и имеет тенденцию к дальнейшему росту [1]. В условиях жестких требований к экономии топливных, сырьевых и других материальных ресурсов проблема обеспечения энергоэффективности электрооборудования становится одним из основных вопросов перестройки хозяйственного механизма угледобывающей отрасли.

***Анализ исследований и публикаций.** Решению вопроса рационального использования электрической энергии на угольных шахтах уделяется достаточно внимания [2,3]. Известны методы снижения затрат электрической энергии, потребляемой водоотливными установками:*

- обеспечение соответствия паспортных параметров насосов характеристикам трубопроводов;
- снижение потерь напора в трубопроводе водоотливной установки;

- использование давления столба воды главного стояка на орошение;
- повышение КПД насосной установки.

Анализ результатов исследований показал, что в настоящее время отсутствует комплексное решение вопросов регулирования режимов электропотребления, направленных на поддержание заданных параметров установки, с задачами оптимизации режимов работы электроустановок угольных шахт и экономии энергии в целях достижения совокупного экономического эффекта.

Исследования [1,4] показывают, что резервом повышения эффективности работы водоотливной установки является строгое соблюдение режимов пуска и останова насосных агрегатов, а также снижение числа пусков. Проведенные в НИИГМ имени М.М. Федорова исследования показали, что число включений за сутки насосов водоливной установки на шахте изменяется от 30 до 50. Это обстоятельство, несмотря на относительно кратковременность переходных состояний, оказывает значительное влияние на общий баланс электропотребления шахты.

Цель исследований состоит в теоретическом обосновании величин пусковых затрат электроэнергии, что позволит раскрыть их зависимость от параметров двигателя и насосного агрегата в целом, а также даст возможность минимизации расхода электроэнергии путем целенаправленного изменения параметров системы. Для этого требуется вывести уравнение динамического состояния рассматриваемой установки в интервале времени пуска двигателя, установить зависимость во времени момента электродвигателя от его частоты вращения и определить полные затраты энергии на пуск.

Изложение материала и результаты.

Известно [3], что для короткозамкнутых асинхронных двигателей потери электроэнергии в роторной цепи в переходных процессах пуска определяются формулой

$$\Delta \mathcal{E} = M_H \omega_H s_H \Delta t, \quad (1)$$

где M_H , ω_H и s_H – номинальные момент, частота вращения и скольжение, Δt – длительность переходного процесса пуска, составляющая величину порядка одной секунды.

Установлено [3], что напорная характеристика практически любого центробежного насоса как функция $H_n = H_n(Q)$, отражающая зависимость давления H_n (напора насоса в метрах водяного столба) от производительности насоса Q (подачи в m^3/c), описывается соотношени-

ем типа

$$H_n(Q) = n_k(H_0 + AQ - BQ^2), \quad (2)$$

где n_k – число рабочих колес насоса, H_0, m – напор одного колеса насоса при закрытой задвижке, $A, c/m^2$, $B, c^2/m^5$ – эмпирические коэффициенты, главным образом зависящие от конструкции насоса.

Процессу доставки воды на поверхность препятствуют естественные сопротивления в трубопроводе, которые подобно (2) с достаточной для инженерных целей точностью можно представить функцией

$$H_m(Q) = H_z + aQ^2, \quad (3)$$

где H_z, m – геометрический напор как расстояние по вертикали от «зеркала» водосборника до точки слива откачиваемой жидкости на поверхности шахты; $a, c^2/m^5$ – коэффициент сопротивления, зависящий от диаметра и длины подводящего напорного трубопровода и от типа трубопроводной арматуры.

Полагая, что в момент пуска двигателя трубопровод был заполнен водой (частично или полностью) массой $m_0, кг$ (в дальнейшем считается, что $m_0 = const$), то на основании принципа Даламбера можно записать с использованием (2) и (3)

$$m_\Sigma \frac{dV}{dt} = F_m \rho_0 g [H_n(Q) - H_m(Q)], \quad (4)$$

где F_m, m^2 – площадь поперечного сечения трубопровода; $\rho_0, кг/m^3$ – объемная плотность откачиваемой воды из шахты; $g, m/c^2$ – ускорение свободного падения; t, c – текущее время, отсчитываемое с момента пуска электродвигателя; $V, m/c$ – скорость центра инерции суммарной перемещающейся массы $m_\Sigma = m_0 + (J_p + J_n)/R_{экв}^2$, причем $J_p, J_n, кгm^2$ – соответственно кинетические осевые моменты инерции ротора двигателя и вращающихся элементов насоса, $R_{экв}, m$ – эквивалентный радиус колеса насоса, к окружности которого приводятся вращающиеся массы.

Из уравнения (4) следует, в частности, что в установившемся (стационарном) режиме движения, когда $V = const$, должно быть

$$H_n(Q) = H_m(Q), \quad (5)$$

на чем и основан общепринятый в настоящее время метод определения номинальных (рабочих) величин напора и подачи проектируемых насосных установок [на практике искомые величины $Q = Q_n$ и $H = H_n$ определяются в точке пересечения кривых $H_n = H_m(Q)$ и $H_m = H_m(Q)$]. Формально же соотношение (5) с учетом зависимостей (4.45) и (4.46) представляет собой относительно подачи Q квадратное уравнение

$$(a + n_k B)Q^2 - n_k A Q + H_z - n_k H_0 = 0,$$

одно из решений которого, представляющее практический смысл, записывается в форме

$$Q_H = \frac{n_k A + \sqrt{(n_k A)^2 + 4(n_k H_0 - H_z)(n_k B + a)}}{2(a + n_k B)}, \quad H_H = H_z + a Q_H^2. \quad (6)$$

Проверим это учитывая, что подача Q связана со скоростью истечения жидкости V соотношением

$$Q = F_m V, \quad (7)$$

то (4) следует рассматривать как дифференциальное уравнение относительно V . Так, подставляя (7) в (4) с использованием (2) и (3), получим

$$m_\Sigma \frac{dV}{dt} = F_m \rho_e g [(n_k H_0 - H_z) + n_k A F_m V - (n_k B + a) F_m^2 V^2]. \quad (8)$$

На практике должно быть $n_k H_0 - H_z > 0$, и в противном случае надо просто увеличить количество колес насоса n_k в разумном пределе, а когда и это «не помогает», то следует применить двухступенчатый во-

доотлив. В таком случае общее решение уравнения (8), удовлетворяющее естественному начальному условию $V(0) = 0$, запишем в форме [3]

$$t = \frac{2m_\Sigma}{F_m^2 \rho_g g \Delta} \cdot \text{Arth} \frac{F_m V \Delta}{2(n_\kappa H_0 - H_z) + n_\kappa A F_m V}, \quad (9)$$

где принято

$$\Delta = \sqrt{(n_\kappa A)^2 + 4(n_\kappa H_0 - H_z)(n_\kappa B + a)^2}, \quad c / m^2, \quad (10)$$

причем символ Arth (*арха-тангенс*) означает обратную функцию гиперболического тангенса. Если с использованием (10) обозначить

$$\lambda = F_m^2 \rho_g g \Delta / (2m_\Sigma), \quad \mu = n_\kappa A / \Delta, \quad (11)$$

то обращение функции (9) $t = t(V)$ приводит к выражению

$$V = V_H \psi(t), \quad (12)$$

в котором ограниченная сверху единицей монотонно возрастающая функция

$$\psi(t) = \frac{(e^{\lambda t} - e^{-\lambda t})(1 - \mu)}{(e^{\lambda t} + e^{-\lambda t}) - \mu(e^{\lambda t} - e^{-\lambda t})}, \quad (13)$$

а номинальная скорость истечения жидкости обозначена как:

$$V_H = \frac{n_\kappa A + \Delta}{2(n_\kappa B + a)F_m}, \quad (14)$$

и эта величина, как следует из (12) и (13), получается практически уже при $\lambda t \geq 5$. Заметим, что формула (14) с учетом (10) в точности соответствует первому из выражений (6), которое получено в результате решения алгебраического уравнения статического состояния (5) относительно подачи с учетом (7). Таким образом, полученное решение (12) не противоречит общепринятому в расчетной практике подходу.

Следующим этапом рассматриваемой задачи является установление зависимости во времени момента электродвигателя от его частоты вращения. Для этого примем предположение о пропорциональности текущей угловой скорости ротора двигателя ω и линейной скорости истечения из трубопровода жидкости V при открытой задвижке в период пуска, то есть будем считать, что

$$V = R_{\text{экв}} \omega \quad (15)$$

отсюда получается численное выражение величины $R_{\text{экв}} = V_H / \omega_H$. В действительности зависимость V от ω является нелинейной, и в данном исследовании концепцию «линейности» следует рассматривать как *рабочую гипотезу*, достаточную для приближенных энергетических оценок.

Так как текущее и номинальное скольжение магнитного потока статора относительно ротора определяются соответственно выражениями

$$s = 1 - \omega / \omega_{\text{син}} \quad \text{и} \quad s_H = 1 - \omega_H / \omega_{\text{син}}, \quad (16)$$

где $\omega_{\text{син}}$ – синхронная циклическая частота вращения магнитного поля, то с помощью (16) и выражений (12), (13), (14) найдем

$$s(t) = 1 - (1 - s_H) \psi(t), \quad \omega(t) = \omega_{\text{син}} (1 - s_H) \psi(t). \quad (17)$$

Далее воспользуемся известной формулой Клосса [70], устанавливающую связь текущего электродинамического момента двигателя $M_{\text{э}}$ со скольжением s , которую для короткозамкнутого двигателя запишем в форме

$$M_{\text{э}} = M_{\text{кр}} \frac{2(1 + \beta)\beta\gamma s}{s^2 + 2\beta^2\gamma s + \beta^2\gamma^2}, \quad (18)$$

где критический момент «опрокидывания» обозначен как

$$M_{\text{кр}} = \frac{3U_0^2}{\omega_{\text{син}} R_1} \cdot \frac{\beta}{2(1 + \beta)}, \quad (19)$$

причем U_0, B – напряжение питающей сети;

$$\beta = 1/\sqrt{1+[(X_1 + X_2)/R_1]^2}, \quad \gamma = R_2/R_1; \quad (20)$$

R_1, R_2, Om – активные, а X_1, X_2, Om – реактивные сопротивления соответственно статорной и роторной цепей.

Формула Клосса (18) описывает, так сказать, стационарные квазидинамические процессы, то есть без учета изменений во времени электромагнитных потокосцеплений статора и ротора в переходных динамических состояниях, что в специальных случаях можно и принять во внимание. Здесь, однако, эти обстоятельства не учитываются на основании результатов предварительных исследований.

Критический момент связан с номинальным посредством формулы

$$M_{кр} = k_{кр} M_H,$$

где $k_{кр}$ – нормативный коэффициент «опрокидывания» в критическом состоянии (коэффициент перегрузочной способности), указываемый в каталогах. В свою очередь номинальный момент двигателя с использованием соотношения (15) определяется как

$$M_H = V_H F_m \rho_g g H_H / (\eta_n \omega_H),$$

где в силу второго выражения из (3) и (7) номинальный рабочий напор

$$H_H = H_c + a(F_m V_H)^2,$$

η_n – КПД насосного агрегата.

Пусковой $M_{п}$ и номинальный M_H электродинамические моменты реализуются соответственно при $s = 1$ и $s = s_H$, причем

$$M_{п} = k_{п} M_H,$$

где коэффициент пускового момента $k_{п}$ подчиняется для короткозамкнутых двигателей условию $1 \leq k_{п} < 1,2$. Тогда с помощью выражений (18) получим

$$k_{II} = k_{кр} \frac{2(1+\beta)\beta\gamma}{1+2\beta^2\gamma+\beta^2\gamma^2}, \quad I = k_{кр} \frac{2(1+\beta)\beta\gamma s_H}{s_H^2+2\beta^2\gamma s_H+\beta^2\gamma^2}. \quad (21)$$

Соотношения (21) необходимо рассматривать как систему уравнений относительно параметров γ и s_H при заданной величине $\beta < 1$ и принятого значения $k_{кр}$. Этим самым, в силу обозначений (20), определяют необходимые величины активного и реактивного омического сопротивлений цепи ротора. Так, из второго уравнения системы (21) находим

$$\gamma = \frac{s_H}{\beta} \left\{ k_{кр} (1+\beta) - \beta + \sqrt{[k_{кр} (1+\beta) - \beta]^2 - 1} \right\}, \quad (22)$$

а подстановка этого выражения в первое уравнение (21) при удовлетворении естественного условия $k_{II} \geq 1$ приводит в итоге к важному требованию для возможной величины номинального скольжения

$$s_H \geq \left\{ k_{кр} (1+\beta) - \beta - \sqrt{[k_{кр} (1+\beta) - \beta]^2 - 1} \right\}^2, \quad (23)$$

от которого зависит не только величина параметра γ в силу (22), но и значение коэффициента пуска k_{II} из (21).

Заметим, что при выполнении в условии (23) строгого равенства, обуславливающего минимальную величину номинального скольжения s_H^{\min} , коэффициент пуска $k_{II} = 1$, и тогда из (22) следует

$$\gamma = s_H^{\min} / \beta.$$

С увеличением коэффициента пуска примерно пропорционально увеличивается параметр, что в силу обозначений (20) требует увеличение омического сопротивления роторной цепи.

Для промышленных двигателей соотношения (21) заведомо удовлетворяются (или, по крайней мере, должны удовлетворяться), но здесь они приведены в целях согласованности принимаемых параметров двигателя с формулой Клосса (18), необходимой для дальнейших исследований. Кроме того, уравнения (21) могут быть использованы для поиска рациональных параметров системы «привод-насос-трубопровод», обеспечивающих минимальный расход электроэнергии при пуске. На рисунке 1 изображена серия кривых, иллюстрирующих изложенный выше алгоритм.

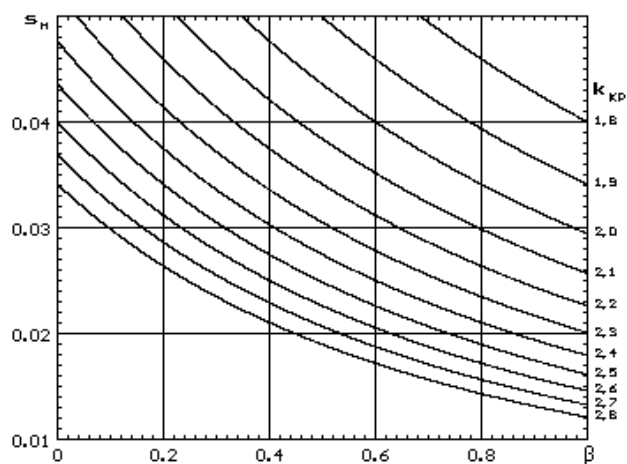


Рисунок 1– Зависимости номинального скольжения от параметров двигателя

Как видно отсюда, между основными параметрами двигателя имеется строгая взаимообусловленность, нарушение которой может привести к искаженным результатам исследований и вычислений [графики на рисунке 1 построены для s_H^{\min} в соответствии с выражением (23)].

На рисунке 2 изображена типичная характеристика асинхронного короткозамкнутого двигателя в координатах $\bar{M} = M_{\text{э}} / M_{\text{кр}}$ [см. (18) и (19)] и переменного параметра $1 - s$, который зависит от циклической частоты вращения ротора $\omega(t)$. Числа $\bar{M}_H = 1/k_{\text{кр}}$, $\bar{M}_\Pi = k_\Pi / k_{\text{кр}}$ и формально $\bar{M}_{\text{кр}} = 1$.

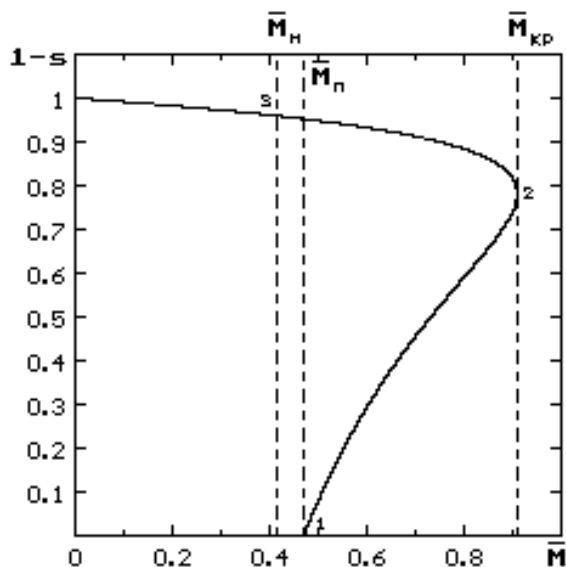


Рисунок 2 – Характеристика короткозамкнутого двигателя

Здесь кривая 1-2-3 отображает последовательность генерируемых двигателем величин электродвижущего момента в соответствии с (8) при монотонном уменьшении скольжения $s(t)$, подчиняющейся временной зависимости (7). Как отсюда видно, в точке 2 электродвижущий момент в некоторый момент времени неизбежно принимает максимальное значение, равное $M_{кр}$, и именно это важное обстоятельство главным образом порождает повышенный расход электроэнергии при пуске двигателя.

Монотонность функции (13) на сегменте $[0, 1)$ обуславливает зависимость кривой $\overline{M} = \overline{M}(1 - s)$ на рисунке 2 с кривой $\overline{M} = \overline{M}(t)$. А так как функция $\overline{\omega}(t) = \omega(t) / \omega_{син}$ также является положительно определенной, то и интеграл представляющий затраты электроэнергии

$$\mathcal{E}(t) = M_{кр} \omega_{син} \int_0^t \overline{M}(t) \overline{\omega}(t) dt \quad (24)$$

за время t , является заведомо положительно определенной монотонно возрастающей функцией.

На рисунке 3 изображены безразмерные функции $\overline{M}(t)$, $\overline{\omega}(t)$, обозначенные последовательно цифрами 1, 2. Так как кривые 1 и 2 асимптотически приближаются при $t \rightarrow \infty$ соответственно к величинам $M_H / M_{кр}$ и $\omega_H / \omega_{син}$, то в этом случае в определении продолжительности времени пуска Δt содержится естественная неопределенность – например, можно полагать, что Δt является моментом времени, при котором частота вращения ротора отличается от номинальной на некоторую наперед заданную малую величину. Поэтому интеграл (24) при $t = \Delta t$ может принимать самые различные значения, что затрудняет численные оценки. Второй немаловажной задачей является неординарный вопрос: чтобы оценить перерасход электроэнергии, с чем же все-таки сравнивать величину интеграла (24), пусть, даже если в нем $t = \Delta t$ определено каким-либо обоснованным образом? Так как однозначного ответа на поставленный вопрос принципиально не существует, то поэтому будем сравнивать фактические затраты энергии с идеальным «гипотетическим» случаем, когда момент двигателя при пуске подчиняется зависимости типа (пунктирная кривая 3 на рисунке 3)

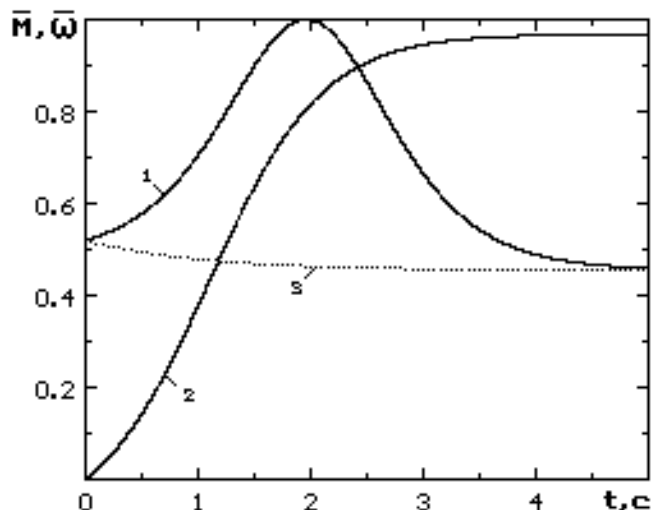


Рисунок 3 – Характер изменения момента (1) и частоты вращения ротора (2) при пуске двигателя

$$M^*(t) = M_H + (M_{II} - M_H) \exp(-\lambda t) = M_H [1 + (k_{II} - 1) \exp(-\lambda t)], \quad (25)$$

где в данном случае величина $1/\lambda$ есть постоянная времени воображаемой характеристики, и при этом предполагается, что частота вращения его ротора изменяется по зависимости (17), как и для реального двигателя (кривая 2 на рисунке 3). Как следует из (25), функция $M^*(t)$ непрерывным образом описывает изменения момента от M_{II} при $t = 0$ до M_H при $t \rightarrow \infty$.

Тогда искомая величина «добавочного» количества расхода электроэнергии с учетом (24) и (25) определится интегралом

$$\Delta \mathcal{E}^* = M_{кр} \omega_{син} \int_0^{\Delta t} \left\{ \overline{M}(t) - [1 + (k_{II} - 1) \exp(-\lambda t)] / k_{кр} \right\} \overline{\omega}(t) dt, \quad (26)$$

причем в таком случае к величине Δt не предъявляются особых требований, так как $\lim_{\Delta t \rightarrow \infty} (\Delta \mathcal{E}) = const$. Достаточно, например, принять в (26) для определенности $\Delta t = 5/\lambda$.

Выражение (26), путем введения безразмерного параметра $\overline{\mathcal{E}} = \Delta \mathcal{E}^* / (k_{кр} M_{кр} \omega_{син} \Delta t)$ запишем в форме

$$\bar{\mathcal{E}} = \frac{1}{k_{кр} \Delta t} \int_0^{\Delta t} \left\{ \bar{M}(t) - [1 + (k_{II} - 1) \exp(-\lambda t)] / k_{кр} \right\} \bar{\omega}(t) dt, \quad (27)$$

причем, как показывают вычисления, этот параметр практически не зависит от величины Δt , если ее минимальное значение принять равным $5/\lambda$.

Анализ свидетельствует о том (см. рисунке 4), что параметр $\bar{\mathcal{E}}$, вычисленный в соответствии с (27), «слабо» зависит от номинального скольжения и практически не зависит от коэффициента перегрузочной

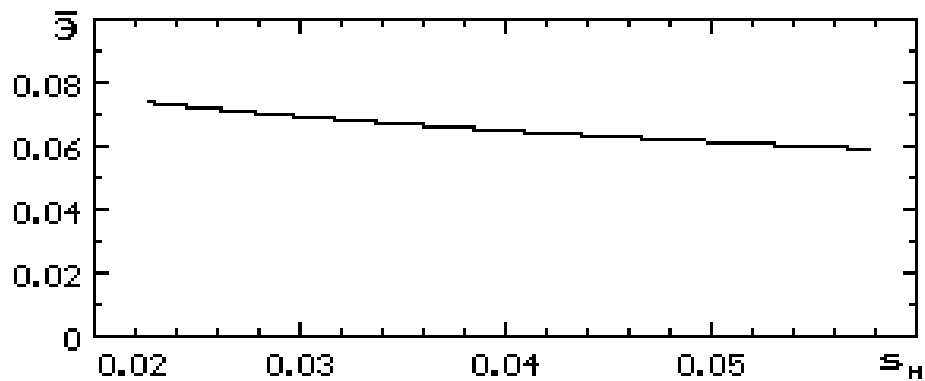


Рисунок 4 – Зависимость расхода электроэнергии от основных параметров двигателя

способности (кривые, построенные при различных значениях $k_{кр}$ визуально неотличимы от показанной на рисунке 4). Это дает возможность значительно упростить порядок расчета затрат электроэнергии в период пуска насосного агрегата, приближенно принимая $\bar{\mathcal{E}} = 0,06$. Учитывая также, что $\Delta t = 5/\lambda$ и $M_{кр} = k_{кр} M_H$, формулу для определения фактического расхода запишем в следующем виде

$$\Delta \mathcal{E}^* = 0,3 \frac{k_{кр}^2 M_H \omega_{син}}{\lambda} = 0,6 \frac{m_{\Sigma} k_{кр}^2 M_H \omega_{син}}{F_m^2 \rho_s g \Delta}, \quad (28)$$

где использовано определение (11) для параметра λ ; при этом величина Δ определяется выражением (10).

Соотношение (28), прежде всего, отличается от канонической формулы (1) в структурном отношении. В соотношении (28), обнаруживается взаимовлияние многочисленных параметров динамической сис-

темы «двигатель–насос–трубопровод», в связи с чем представляется возможным влиять на дополнительные расходы электроэнергии путем целенаправленного изменения исходных параметров.

На рисунке 5 представлена зависимость $\Delta \mathcal{E}$ от M_H и F_m .

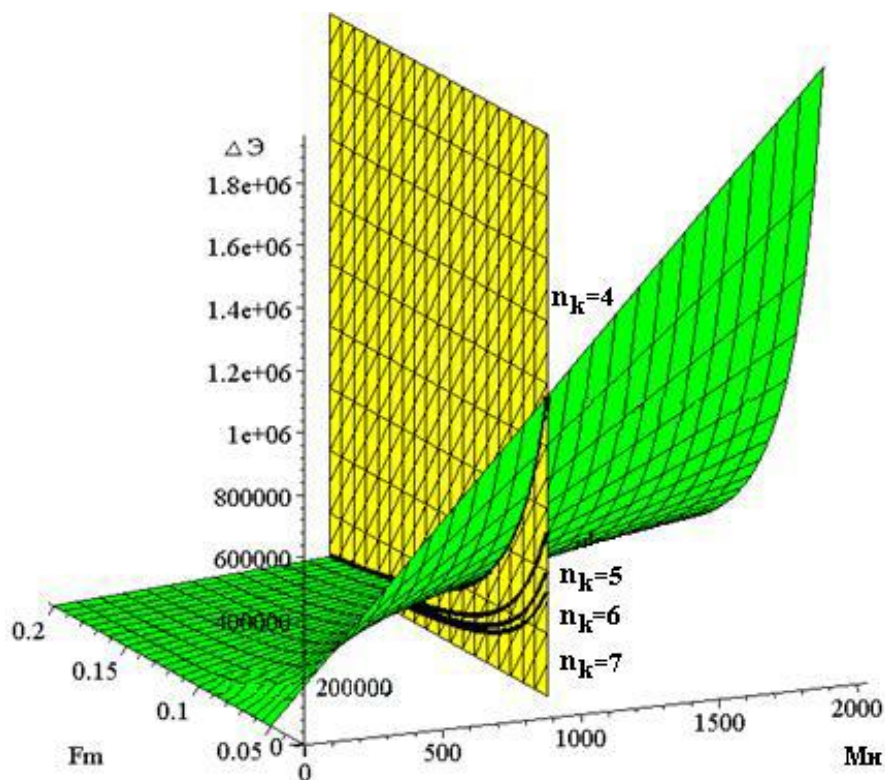


Рисунок 5 – Зависимость $\Delta \mathcal{E}$ от M_H и F_m

Рассмотрим сечение получившейся поверхности плоскостью $M_H=1000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (пусть данное значение момента является типовым). В сечении получим кривую (гиперболу) в координатах Сечение-Экономия. При построении поверхности число рабочих колёс насоса n_k было принято равным 4. Тогда из графика видно, что с увеличением сечения отводящей трубы (коэффициент сопротивления трубопровода принят равным 0,01, что соответствует случаю трубопровода без засоров и изгибов) потери при пуске насоса уменьшаются обратнопропорционально сечению трубопровода. Если учесть, что на большинстве водоотливных установок существует некоторый запас мощности приводного двигателя, то можно увеличить число рабочих колёс насоса. Так, случаю $n_k=5,6,7$ соответствуют чёрные кривые, лежащие ниже исходной поверхности (см. рисунок 5). Т.е. в случае, когда у насоса существует запас по мощности двигателя, можно добиться экономии при пуске за счёт наращивания количества ступеней гидравлической части.

Выводы. Впервые определена величина потерь электроэнергии при пуске насосов главного водоотлива, что позволяет раскрыть их зависимость от параметров двигателя и насосного агрегата в целом, а также дает возможность минимизации расхода электроэнергии путем целенаправленного изменения параметров системы.

Библиографический список

1. Антонов Э.И., Яценко А.М., Галанин А.Н., Литвинов В.В. Исследование фактических режимов работы, удельных энергозатрат и некоторых особенностей эксплуатационного снижения напорных характеристик насосов водоотлива: Сб. научн. трудов НИИГМ имени М.М. Федорова. – Вып. 100. – Донецк: НИИГМ имени М.М. Федорова, 2006. – С. 215–230.

2. СОУ10.1.00185790.005–2006 Энергозбереження. Засоби зниження витрат електричної енергії у системах електропостачання вугільних шахт; Грядущий Б.А., Мялковский В.Й., Чехлатий М.О., Фисенко А.И., Иноземцева Л.П. – К.: Мінвуглепром України, 2006. – 84 с.

3. Энергосбережение в угольной промышленности: Монография/ В.И. Мялковский, Н.А. Чехлатый, Г.Н. Лисовой, В.В. Лобода, А.Н. Коваль, В.А. Корсун; Под редакцией Б.А. Грядущего. – Донецк: НИИГМ им. М.М. Федорова, 2006. – 336 с.

4. Антонов Э.И., Яценко А.М., Яценко И.А. Причины возникновения аварийных ситуаций на водоотливе и пути повышения безопасности и экономичности его эксплуатации: Сб. научн. трудов НИИГМ имени М.М. Федорова. – Вып. 99. – Донецк: НИИГМ имени М.М. Федорова, 2005. – С. 141–149.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Алиевым М.А.