

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ВИБРОАКТИВНОСТЬ НАСОСНОГО АГРЕГАТА С БЕЗРЕДУКТОРНЫМ ПРИВОДОМ ОТ ТИХОХОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Гуляев В.Г., докт. техн. наук, проф., Кравченко Е.С.,
магистрант, Донецкий национальный технический
университет, Китаева С.А., аспирант, МакНИИ

Рассмотрен аналитический метод исследования динамических свойств насосных агрегатов с учетом динамической характеристики приводных электродвигателей. На примере насосного агрегата с параметрами СНД100/32 показана возможность исключения резонансных крутильных колебаний в приводе с тихоходным электродвигателем и снижения виброактивности агрегата.

Розглянут аналітичний метод дослідження динамічних властивостей насосних агрегатів з урахуванням динамічної характеристики приводних електродвигунів. На прикладі насосного агрегату з параметрами СНД100/32 показана можливість виключення резонансних крутильних коливань в приводі з тихохідним електродвигуном і зниження віброактивності агрегату.

The analytical method of research of dynamic properties of pump aggregates taking into account dynamic description of drive electric motors is considered. The possibility of exception of resonance turning vibrations in the drive with a slow electric motor and declines of vibration activity aggregate is shown on the example of pump aggregate with the parameters СНД 100/32.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Повышение эффективности и безопасности применения очистных механизированных комплексов (ОМК) является важной научно-технической проблемой. Для ее решения требуется разработка новых и совершенствование существующих систем гидропривода и механизированных крепей, являющихся базой современных ОКМ.

Параметры и структура применяющихся в составе гидропривода высоконапорных насосных агрегатов (ВНА) обуславливают при работе высокие уровни вибрации и шума, что отрицательно влияет на их надежность и ухудшает условия труда обслуживающего

персонала. Поэтому важной научно-технической задачей является обоснование путей совершенствования динамических свойств ВНА и снижения их виброактивности.

Анализ исследований и публикаций.

Исследованиями ДонНТУ установлено, что весьма существенное влияние на динамические свойства и виброактивность ВНА оказывают их структура, параметры кривошипно-шатунных механизмов и характеристики приводных двигателей [1,2]. Так, в работе [2] показано, что привод ВНА СНТ32 работает в режиме резонансных крутильных колебаний. В режиме разгрузки силового насоса зубчатая передача в приводе эксцентрикового вала функционирует с перекладкой бокового зазора, что увеличивает общий уровень виброактивности ВНА. Рекомендации работы [2] сводятся к совершенствованию динамических свойств ВНА путем устранения из его привода зубчатой передачи и применения двигателя с параметрами, исключающими резонансные режимы.

Постановка задач исследований.

Задачами данной работы являются рассмотрение метода анализа динамических свойств ВНА и разработка на примере ВНА СНД100/32 предложений по их совершенствованию на основе реализации рекомендаций работы [2].

Изложение материала и результаты.

Не учитывая упругодемпфирующих свойств механической части ВНА, уравнение динамики его движения представим в виде

$$\left[J_p + J_{nn}(\varphi) \right] \frac{d\omega_d}{dt} + \frac{1}{2} \omega_d^2 \frac{dJ_{nn}(\varphi)}{d\varphi} = M_d - M_c, \quad (1)$$

где J_p - момент инерции ротора асинхронного двигателя (АД);

$J_{nn}(\varphi)$ - приведенный к валу двигателя момент инерции силового и подпиточного насосов;

φ - угол поворота эксцентрикового вала;

ω_d - угловая скорость приводного двигателя;

M_d , M_c - моменты соответственно двигателя и сил сопротивления.

Переменный момент инерции насосов представим в виде

$$J_{nn}(\varphi) = \bar{J}_{nn} + \tilde{J}_{nn}(\varphi) \approx \bar{J}_{nn} = const \quad (2)$$

где \bar{J}_{nn} - постоянная составляющая суммы моментов инерции силового и подпиточного насосов;

$\tilde{J}_{nn}(\varphi)$ - переменная составляющая момента инерции силового насоса, которой в первом приближении можно пренебречь.

С учетом принятого допущения $\tilde{J}_{nn}(\varphi)=0$, уравнение (1) примет вид

$$(J_p + \bar{J}_{nn}) \frac{d\omega_\partial}{dt} = M_\partial - M_c, \quad (3)$$

где M_∂ – момент двигателя, соответствующий его динамической характеристике:

$$\omega_\partial = \omega_0 \left[1 - \nu \left(M_\partial + T_\partial \frac{dM_\partial}{dt} \right) \right]. \quad (4)$$

В уравнении (4):

ω_0 – скорость идеального хода двигателя,

$\omega_0 = \frac{\omega_c}{p} = (\omega_c = 2\pi f_c = 314^{-1}$ – угловая частота сети, p – число пар полюсов);

$\nu = \frac{S_k}{2M_k}$ - крутизна статической характеристики двигателя (S_k ,

M_k критические значения скольжения и момента АД;

$S_k = \left(1 - \frac{\omega_\partial}{\omega_0} \right) \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right)$, где $\xi = \frac{M_k}{M_n}$ - перегрузочная способность

АД).

$T_\partial = (\omega_c S_k)^{-1}$ - электромагнитная постоянная времени.

Решая совместно уравнения (3) и (4), получим

$$\nu T_\partial J_{na} \frac{d^2 \omega_\partial}{dt^2} + \nu J_{na} \frac{d\omega_\partial}{dt} + \frac{\omega_\partial}{\omega_0} = 1 - \nu \left(M_c + T_\partial \frac{dM_c}{dt} \right), \quad (5)$$

где $J_{na} = J_p + \bar{J}_{nn}$ - приведенный к валу АД момент инерции ВНА (сумма моментов инерции ротора АД, силового и подпиточного насоса).

Момент сил сопротивления $M_c(t)$ и угловую скорость АД $\omega_\partial(t)$ представим в виде сумм постоянных и переменных составляющих

$$\begin{aligned} M_c(t) &= \bar{M}_c + \tilde{M}_c(t); \\ \omega_\partial(t) &= \bar{\omega}_\partial + \tilde{\omega}_\partial(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Постоянную составляющую $\bar{\omega}_\partial$ определим, пользуясь статической характеристикой АД при $\bar{M}_\partial = \bar{M}_c$

$$\bar{\omega}_\partial = \omega_0(1 - \nu \bar{M}_c) \quad (7)$$

Подставив (7) в (5), после нескольких преобразований получим линеаризированное дифференциальное уравнение второго порядка относительно угловой скорости АД $\tilde{\omega}_\partial$ с правой частью

$$\frac{d^2 \tilde{\omega}_\partial}{dt^2} + 2n \frac{d\tilde{\omega}_\partial}{dt} + K^2 \tilde{\omega}_\partial = W(t) \quad (8)$$

В уравнении (8):

$n = (2T_\partial)^{-1}$ – характеристика диссипативных свойств ВНА;

$K^2 = (\nu T_\partial J_{na} \omega_0)^{-1}$ – квадрат усредненной собственной круговой частоты колебаний привода ВНА.

$$W(t) = -J_{na}^{-1} \left[T_\partial^{-1} \tilde{M}_c(t) + \frac{d\tilde{M}_c(t)}{dt} \right] \quad \text{функция}$$

возмущения, характеризующая воздействие на привод технологических сил сопротивления и сил инерции, формирующихся при функционировании кривошипно-шатунных механизмов с функцией положения

$$P(\varphi) = \frac{1}{2} P_{\max} [1 - \cos \varphi + 0.25 \lambda (1 - \cos 2\varphi)], \quad [2]$$

Рассмотрим решение поставленной задачи применительно к параметрам силового и подпиточного насосов СНД100/32 с безредукторным приводом от АД типа ВАО280-М10. Характеристика тихоходного АД приведена в табл.1.

Характеристика двигателя ВАО280-М10 [3]

Синхронная частота вращения n_c , об/мин	Номинальная мощность, P_2 , кВт	при номинальной нагрузке			Мп/Мн	Мк/Мн	Jп/Jн	GD ² нм ²
		Sh, %	КПД, %	cosφ				
600	55	1,7	92	0,73	1,5	2,2	5	180

В режиме разгрузки силового насоса на привод ВНА действует переменная составляющая момента сил инерции кривошипно-шатунных механизмов трехплунжерного насоса [1,2]

$$\tilde{M}_{cu}(t) = A_a \sin(\omega_n t + \varphi_1),$$

где $A_a = 285$ Нм – амплитуда первой гармоники с частотой $\omega_n = \omega_\partial$; $\varphi_1 = 54^\circ 14'$ – фаза колебаний.

Необходимые для решения уравнения (8) характеристики ВНА с двигателем ВАО280-М10 приведены в табл.2.

Таблица 2. Характеристики динамических свойств ВНА с двигателем ВАО 280-М10 (значения параметров в последней колонке соответствуют работе привода агрегата в условиях «нежесткой» шахтной сети)

Параметры, размерность	Формулы для расчета	Значения параметров при	
		$U_{\phi}=U_H$	$U_{\phi}=0,85U_H$
Номинальная угловая скорость ротора (частота возмущения) c^{-1}	$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_c(1 - S_H)}{30}$	61,77	~61,7
Номинальный вращающий момент, Нм	$M_H = 9550 \frac{P_{2H}}{n_c(1 - S_H)}$	890	~810
Максимальный (фактический) момент, Нм	$M_{кф} = \xi \cdot M_H \left(\frac{U_{\phi}}{U_H} \right)^2$	1958	1410
Коэффициент жесткости упругой связи АД, Нм/рад	$C_{\partial} = 2pM_{кф}$	19580	14100
Массовый момент инерции привода ВНА, $кгм^2$	$J_{на} = J_p + \bar{J}_{nh}$	7,55	7,55
Критическое скольжение $Sk_{,o.e}$	$S_K = S_H \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right)$	0,07	~0,09
Электромагнитная постоянная времени АД, с	$T_{\partial} = \frac{1}{\omega_c S_K}$	0,045	0,035
Крутизна статической характеристики АД $(Нм)^{-1}$	$\nu = \frac{S_K}{2M_{кф}}$	$17,8 \cdot 10^{-6}$	$31,9 \cdot 10^{-6}$
Собственная частота АД, c^{-1}	$K_{од} = \sqrt{\frac{C_{\partial\phi}}{J_p}}$	58,8	55,4
Собственная частота привода ВНА, c^{-1}	$K_{он} = \sqrt{\frac{C_{\partial\phi}}{J_{на}}}$	45,4	42,8
Коэффициент вязкости демпфирующих сил, c^{-1}	$n = \frac{1}{2T_{\partial}}$	11,1	14,3

Параметры, размерность	Формулы для расчета	Значения параметров при	
		$U_{\phi}=U_H$	$U_{\phi}=0,85U_H$
Относительный коэффициент демпфирования, о.е.	$\delta = \frac{n}{K_{on}}$	0,19	0,33
Собственная частота привода ВНА с учетом демпфирования, c^{-1}	$K'_{on} = K_{on} \sqrt{1 - \delta^2}$	44,5	40,4
Коэффициент расстройки частот Z , о.е.	$Z = \omega_H / K'_{on}$	1,40	1,53
Коэффициент динамичности, при силовом возбуждении, о.е.	$K_{\partial} = \left[(1 - Z^2)^2 + 4\delta^2 Z^2 \right]^{-0.5}$	1,04	0,6
Коэффициент динамичности, при кинематическом возбуждении, о.е.	$K(Z) = \frac{Z^2}{\sqrt{(1 - Z^2)^2 + 4\delta^2 Z^2}}$	1,08	0,91
Амплитуда первой гармоники $\tilde{\omega}_{\partial}$, рад/с	$\tilde{\omega}_{\partial}^{(1)} = \left(\frac{A_n}{C_{\partial\phi}} \right) K_{\partial}$	0,14	0,18
Неравномерность ω_{∂} , %	$\frac{100\tilde{\omega}_{\partial}^{(1)}}{\bar{\omega}_{\partial}}$	0,45	0,58

Из табл.2 видно, что применение для ВНА СНД100/32 АД типа ВАО280-М10 с частотой вращения $n_c=600$ об/мин и маховым моментом $GD^2 = 180 \text{ Нм}^2$ позволяет:

-развести частоту возмущений ($61,77 \text{ с}^{-1}$) и собственную частоту колебаний привода ВНА ($44,5 \dots 40,4 \text{ с}^{-1}$), получить коэффициенты расстройки частот $Z=1,4 \div 1,53$ и исключить, таким образом, возможность резонансных крутильных колебаний;

-обеспечить высокую равномерность скорости вращения и низкие значения коэффициентов динамичности привода при работе в зарезонансной зоне;

-исключить из состава привода ВНА зубчатую передачу - активный источник вибрации и шума;

-сохранить практически неизменными конструктивные и рабочие параметры силового насоса ($Q=100$ л/мин, $P=32$ МПа, $P_{2H}=55$ кВт), при значительно пониженных уровнях вибрации и шума.

Основными факторами снижения виброактивности ВНА являются: устранение зубчатой передачи, исключение резонансных крутильных колебаний в приводе силового насоса и существенное (в 6,25 раза) уменьшение центробежных сил, действующих на корпус агрегата от вращающихся ротора АД и муфты при неизменных уровнях их остаточной динамической неуравновешенности.

Выводы и направления дальнейших исследований.

В работе рассмотрен аналитический метод исследования динамических свойств насосных агрегатов с учетом динамической характеристики приводного двигателя. Показана возможность и целесообразность улучшения динамических свойств ВНА насосной станции СНД 100/32 путем совершенствования структуры и параметров его электропривода. В дальнейшем планируются исследования влияния на динамические свойства ВНА вариации собственных частот, обусловленных переменными значениями моментов инерции силового насоса и условиями питания АД от шахтной сети.

Список источников

1. Гуляев В. Г., Гуляев К. В., Анохина С. А. Анализ кинематических и динамических свойств кривошипно-шатунного механизма в приводе насосного агрегата.// Наукові праці ДонНТУ. Випуск 13(123). Серія: "Гірничо-електромеханічна". Донецьк, 2007. – С. 44-56.
2. Гуляев В. Г., Гуляев К. В., Анохина С. А. Крутильные колебания в электромеханическом приводе насосного агрегата и некоторые способы их устранения. // Вісті Донецького гірничого інституту, №1, 2008. –С.34-43.
3. Пархоменко А.И., Ширнин И.Г., Маслий А.К. Взрывозащищенные асинхронные электродвигатели// М.: Недра, 1992. – 192 с.