

УДК 622. 285

ГУЛЯЕВ В.Г., докт. техн. наук, профессор (ДонНТУ),  
КИТАЕВА С.А., аспирант (МакНИИ)

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СНИЖЕНИЕ ВИБРОАКТИВНОСТИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ГИДРОПРИВОДА МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ**

*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 и снижения виброактивности агрегата с прямым приводом от тихоходного электродвигателя.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Повышение эффективности и безопасности применения очистных механизированных комплексов (ОМК) является важной научно-технической и социальной проблемой угольной отрасли. Для ее решения требуется разработка новых и совершенствование существующих систем гидропривода и механизированных крепей, являющихся базой современных ОКМ.

Параметры и структура современных высоконапорных насосных агрегатов (ВНА), применяющихся в составе насосных станций для гидропривода механизированных крепей, обуславливают при работе высокие уровни вибрации и шума. Это отрицательно влияет на их надежность и ухудшает условия труда обслуживающего персонала. Так, техническими условиями на насосные станции типов СНТ и СНД установлен скорректированный уровень звукового давления 110 дБА, а согласно ГОСТ12.1.003-83 он не должен превышать 80дБА.

Превышение допустимых норм виброакустических характеристик повышает вероятность отказов в системе гидропривода и ошибок обслуживающего персонала, что является потенциальной причиной случаев травматизма. Поэтому важной научно-технической и социальной задачей является обоснование и реализация путей совершенствования динамических свойств ВНА и снижения их виброак-

тивности, с целью обеспечения при эксплуатации безопасных уровней вибрации и шума.

### **Анализ исследований и публикаций.**

Исследованиями ДонНТУ установлено, что весьма существенное влияние на динамические свойства и виброактивность ВНА оказывают их структура, параметры силового насоса и 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 может функционировать с перекладкой бокового зазора, что увеличивает общий уровень виброактивности ВНА. Рекомендации работы [2] сводятся к совершенствованию динамических свойств ВНА путем устранения из состава его привода зубчатой передачи и применения двигателя с параметрами, исключающими резонансные режимы. На новое научно-техническое решение выдан патент Украины [3].

### **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] и научно-технического решения [3].

### **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  $J_p, \text{кгм}^2$  - момент инерции ротора асинхронного двигателя(АД);

$J_{nn}(\varphi), \text{кгм}^2$ - приведенный к валу двигателя переменный момент инерции силового и подпиточного насосов;

$\varphi$ , рад – угол поворота эксцентрикового вала;

$\omega_d$  рад/с – угловая скорость приводного двигателя;

$M_d, M_c, \text{Нм}$  - 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, так как ее максимальное значение составляет около 2% от постоянной составляющей.

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

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

где  $M_\partial$  - момент асинхронного двигателя (АД), 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):

$\omega_0$  - синхронная скорость двигателя,

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

$\nu = \frac{S_k}{2M_k}$  - 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  $\xi = \frac{M_k}{M_H}$  - перегрузочная способность

АД.

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

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

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

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

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

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

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

$$\bar{\omega}_d = \omega_0(1 - v\bar{M}_c). \quad (7)$$

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

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

В уравнении (8):

$n = (2T_g)^{-1}$  - характеристика диссипативных свойств ВНА;

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

$W(t) = -J_{na}^{-1} \left[ T_g^{-1} \tilde{M}_c(t) + \frac{d\tilde{M}_c(t)}{dt} \right]$  - функция возмущения, характеризующая воздействие на привод полезных 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 в составе агрегата для на-

сосной станции типа СНД100/32, оснащенного безредукторным приводом от тихоходного АД типа ВАО280-М10.

Характеристика тихоходного АД с пятью парами полюсов ( $p = 5$ ) приведена в табл. 1.

Характеристика двигателя ВАО280-М10 [4]

Синхронная частота вращения $n_c$ , об/мин	Номинальная мощность, $P_2$ , кВт	при номинальной нагрузке			Мп/Мн	Мк/Мн	Jп/Jн	GD <sup>2</sup> Нм <sup>2</sup>
		Sн, %	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:  $\tilde{M}_{cu}(t) = A_a \sin(\omega_n t + \varphi_1)$ , где  $A_a = 285,8$  Нм – амплитуда первой гармоники с частотой  $\omega_n = \omega_\delta = 61,7 \text{ с}^{-1}$ ;  $\varphi_1 = 54^\circ 14'$  – фаза колебаний [1,2].

Поскольку в условиях нежесткой шахтной сети характеристики приводного двигателя и динамические свойства ВНА изменяются, их определение выполнено для условий:  $U_\phi = U_n$ ;  $U_\phi = 0,9U_n$  и  $U_\phi = 0,85U_n$ .

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

Параметры, размерность	Формулы для расчета	Значения параметров при		
		$U_\phi = U_n$	$U_\phi = 0,9U_n$	$U_\phi = 0,85U_n$
Номинальная угловая скорость ротора (частота возмущения) $\text{с}^{-1}$	$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_c (1 - S_n)}{30}$	61,7	61,7	61,7
Номинальный вращающий момент, Нм	$M_n = 9550 \frac{P_{2n}}{n_c (1 - S_n)}$	890	720	641
Максимальный (фактический) момент, Нм	$M_{кф} = \xi \cdot M_n \left( \frac{U_\phi}{U_n} \right)^2$	1958	1586	1410
Коэффициент жесткости упругой связи АД, Н·м/рад	$C_\delta = 2pM_{кф}$	19580	15860	14100
Массовый момент инерции привода ВНА, кгм <sup>2</sup>	$J_{на} = J_p + \bar{J}_{нн}$	7,65	7,65	7,65
Критическое скольжение $S_{к,о.е}$	$S_k = S_n \left( \xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right)$	0,07	0,082	0,109

Электромагнитная постоянная времени АД, с	$T_{\vartheta} = \frac{1}{\omega_c S_K}$	0,045	0,039	0,032
Крутизна статической характеристики АД (Нм) <sup>-1</sup>	$\nu = \frac{S_K}{2 M_{кф}}$	17,8·10 <sup>-6</sup>	25,8·10 <sup>-6</sup>	35,4·10 <sup>-6</sup>
Собственная частота АД, с <sup>-1</sup>	$K_{од} = \sqrt{\frac{C_{\partial\phi}}{J_p}}$	65,2	58,7	54,8
Собственная частота привода ВНА, с <sup>-1</sup>	$K_{он} = \sqrt{\frac{C_{\partial\phi}}{J_{на}}}$	50,1	45,5	42,5
Коэффициент вязкости демпфирующих сил, с <sup>-1</sup>	$n = \frac{1}{2 T_{\vartheta}}$	11,1	12,8	15,6
Относительный коэффициент демпфирования, о.е.	$\delta = \frac{n}{K_{он}}$	0,19	0,28	0,37
Собственная частота привода ВНА с учетом демпфирования, с <sup>-1</sup>	$K'_{он} = K_{он} \sqrt{1 - \delta^2}$	49,1	43,2	39,5
Коэффициент расстройки частот Z, о.е.	$Z = \omega_H / K'_{он}$	1,26	1,43	1,56
Коэффициент динамичности при силовом возбуждении, о.е.	$K_{\partial} = \left[ (1 - Z^2)^2 + 4\delta^2 Z^2 \right]^{-0.5}$	1,22	0,76	0,42
Амплитуда первой гармоники $\omega_{\partial}$ , рад/с	$\tilde{\omega}_{\partial}^{(1)} = \left( \frac{A_n}{C_{\partial\phi}} \right) K_{\partial}$	1,50	1,18	0,76
Неравномерность $\omega_{\partial}$ , %	$\frac{100 * 2 \tilde{\omega}_{\partial}^{(1)}}{\bar{\omega}_{\partial}}$	4,9	3,8	2,4

Анализ данных табл.2 показывает, что напряжение питающей сети оказывает влияние на характеристики АД и динамические свойства ВНА:

- при номинальном напряжении питания коэффициент расстройки частот  $Z=1,26$  и  $K_{\partial} = 1,22$ , что нельзя считать приемлемым; для обеспечения условий:  $Z$  больше 1,5 и  $K_{\partial}$  меньше 1 необходимо снизить  $K_{он}$ , например за счет увеличения массового момента инерции привода ВНА;
- при снижении напряжения питания в допустимых пределах, уменьшаются собственные частоты АД и ВНА, а коэффициенты расстройки частот и демпфирования повышаются, что обеспечивает значительное удаление рабочего режима от резонансного и снижение коэффициентов динамичности до значений 0.76 – 0.42.

Следовательно, применение для ВНА СНД100/32 АД типа ВАО280-М10 с частотой вращения  $n_c=600$  об/мин и маховым моментом  $GD^2=180 \text{ Нм}^2$ , в условиях реальной шахтной сети, позволяет:

-развести частоту возмущений ( $\sim 62 \text{ с}^{-1}$ ) и собственную частоту колебаний привода ВНА ( $43,2\dots 39,5 \text{ с}^{-1}$ ), получить коэффициенты расстройки частот  $Z=1,43 \div 1,57$  и исключить, таким образом, возможность резонансных крутильных колебаний и интенсивных вибраций;

-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,  $P_{2н}=55$  кВт), при значительно пониженных уровнях вибрации и шума.

Основными факторами снижения виброактивности ВНА предложенной структуры являются:

- 1) устранение зубчатой передачи и генерируемых ею вибраций;
- 2) исключение резонансных крутильных колебаний и вибраций в электроприводе силового насоса;

- 3) существенное (в 6,25 раза) уменьшение центробежных сил инерции, действующих на корпус агрегата от вращающихся с частотой 600 об/мин ротора АД и муфты, при неизменных уровнях их остаточной динамической неуравновешенности [5].

Все перечисленные факторы являются постоянно действующими. Они обеспечат кардинальное снижение уровней вибрации и шума (не менее, чем на 20 дБА), стабильность виброакустических характеристик и долговечность насосного агрегата в течение нормативного срока службы насосной станции.

### **Выводы и направления дальнейших исследований.**

В работе предложен и реализован аналитический метод исследования и совершенствования динамических свойств насосных агрегатов с учетом особенностей их структуры, динамических характеристик приводных двигателей и напряжения питающей сети.

Показана возможность и целесообразность снижения виброактивности ВНА насосных станций СНД 100/32 и других типов путем совершенствования структуры и параметров их электропривода.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых насосных агрегатов с прямым приводом от тихоход-

ных асинхронных двигателей и разработке нормативов на технически достижимые уровни вибрации и шума (примерно 90 дБА).

Реализация рекомендаций позволит повысить надежность и безопасность эксплуатации насосных агрегатов и всей системы гидропривода механизированных крепей.

#### *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. Патент України на корисну модель №45449 - Насосна станція, від 10.11.2009. Бюл.№21-2009р. Автори: Гуляев В.Г., Гуляев К.В., Еренбург В.І., Китаева С.А.
4. Пархоменко А.И., Ширнин И.Г., Маслий А.К. Взрывозащищенные асинхронные электродвигатели // М.: Недра, 1992. – 192 с.
5. Высоконапорный насосный агрегат с пониженными уровнями вибрации и шума/ В.Г.Гуляев, К.В.Гуляев, С.А.Китаева, В.И.Эренбург.-// Наукові праці ДонНТУ. Вип.17(157). Серія : Гірничо-електромеханічна. Донецьк, 2009. - С. 143 – 152.

ГУЛЯЕВ В.Г., докт. техн. наук, профессор, (ДонНТУ)  
КИТАЕВА С.А., аспирант (МакНИИ)

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СНИЖЕНИЕ ВИБРОАКТИВНОСТИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ГИДРОПРИВОДА МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ**

*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 и снижения виброактивности агрегата с прямым приводом от тихоходного электродвигателя.*

Ключевые слова: насосный агрегат, структура, динамические свойства, виброактивность, снижение

V.G. GYLAEV, Doctor of Science, Profesor (DonNTU)  
S.A. KITAEVA, Post-graduate student (MakNYU)

## **IMPROVEMENT OF DYNAMIC CHARACTERISTICS AND REDUCTION OF VIBRATION AKTIVITY OF PUMP PUMPING UNITS FOR THE POWERED SUPPORT HIDRAULIC DRIVES**

*The analytical method of research of dynamic properties of pumping units with taking into account the dynamic characteristic of the driving motor is examined. The possibility of exception of resonance turning vibrations and reduction of the vibration activity of the unit with the direct drive of the slow-speed electric motor is shown on the example of the pumping unit with parameters of CHD 100/32.*

Key words: pumping unit, structure, dynamic characterics, vibration activity, reduction.