

А.В. ГЕРАСИМУК, аспирант кафедры ЭиЭ (СибГИУ)  
г. Новокузнецк

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ ТОКА  
СТАТОРА ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НАСОСА  
ПРИ ЗАСТРЕВАНИИ В НАСОСЕ ПОСТОРОННЕГО ПРЕДМЕТА**

Насосы – это гидравлические машины, предназначенные для перемещения жидкостей под давлением. Они преобразуют механическую энергию, поступающую от приводного электродвигателя в энергию движения жидкости, поднимая её на определённую высоту или перемещая на определённое расстояние по горизонтали [1]. Одними из наиболее часто используемых являются центробежные насосные установки. Такие насосные установки нашли широкое применение в разных отраслях промышленности. Они используются в системах водоотведения шахт и рудников, в системах отопления и водоснабжения, на предприятиях нефтехимической, металлургической, пищевой промышленности, в сельском хозяйстве и строительстве [2].

В ряде случаев насосы являются особо ответственными агрегатами. К таким случаям относятся, насосы систем водоснабжения, водоотлив горнодобывающих предприятий, циркуляционные насосы тепловых станций. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость разработки и конструирования всё более совершенных систем защиты насосных установок от аварийных и ненормальных режимов работы.

В процессе эксплуатации насоса периодически встречаются ситуации, когда в силу стечения ряда обстоятельств в рабочее колесо попадает посторонний предмет. При достаточно большом размере, этот предмет может застрять в рабочем колесе насоса. Такой режим является аварийным, так как приводит к разбалансировке колеса, возникновению вибраций, что в свою очередь, ведёт к преждевременному износу подшипников, а в некоторых случаях и к выходу насоса из строя.

При работе насоса в нормальном режиме, его колесо сбалансировано. Это значит следующее: на каждый  $i$ -й элемент массы колеса, расположенный на одном радиусе, действует центробежная сила  $F_{Цi}$ , направленная из центра вращения вдоль радиуса (рисунок 1).

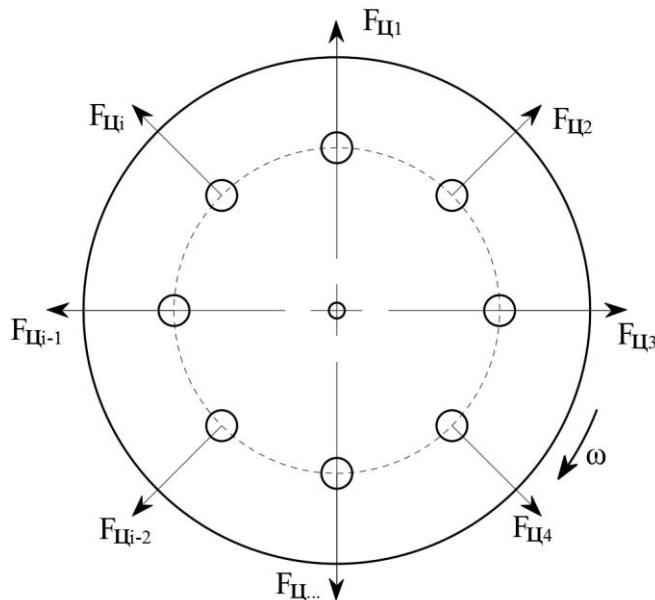


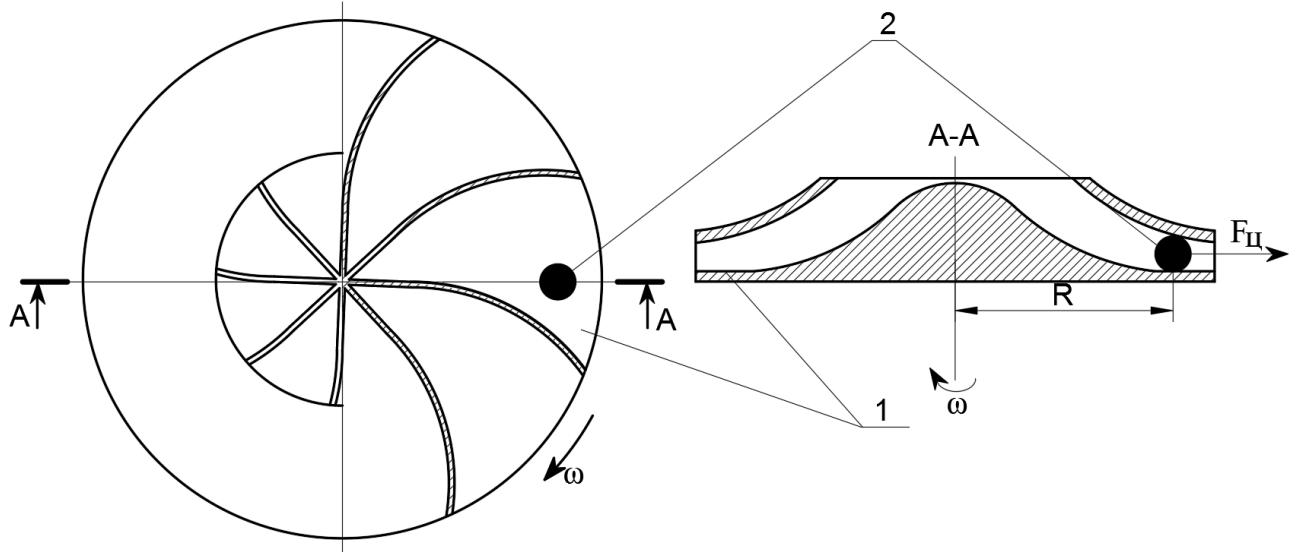
Рисунок 1 – Баланс сил, действующих на элементы колеса насоса.

В таком случае, так как колесо однородное и обладает центральной симметрией, следует, что все силы относительно центра вращения скомпенсированы, то есть их векторная сумма равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n F_{IIi} = 0 \quad (1)$$

В этом случае колесо насоса испытывает нагрузки, связанные только непосредственно с работой по перекачиванию жидкости.

Когда предмет массой  $m$  попадает в колесо насоса и застревает в нём, то в колесе появляется ещё один дополнительный элемент, вращающийся на некотором расстоянии  $R$  от центра вращения (рисунок 2).



1 – рабочее колесо насоса; 2 – посторонний предмет

Рисунок 2 – Схематичное изображения постороннего предмета в рабочем колесе насоса с указанием действующих на него сил

Это расстояние представляет собой произвольную величину и будет зависеть от геометрических параметров как самого предмета, так и геометрических параметров колеса насоса.

На предмет начинает действовать центробежная сила [3]:

$$F_{\text{Ц}} = m\omega^2 R = m\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 R = 0,0439n^2 mR, \quad (2)$$

где:  $\omega$  — частота вращения, рад/с;  $n$  — частота вращения, об/мин.

Под действием центробежной силы тело прижимается к колесу, нарушая его симметрию. Колесо компрессора начинает испытывать воздействие не скомпенсированной силы  $F_{\text{ЦГ}}$ , вектор которой вращается вместе с колесом. Это явление ещё называется «биение».

Сила  $F_{\text{ЦГ}}$  создаёт дополнительную нагрузку на опорные подшипники насоса (или на направляющие подшипники, если насос вертикального исполнения). Иными словами — возрастает сила трения в подшипниках:

$$F_{\text{TP}} = \mu_{\text{TP}} F_{\text{Ц}}, \quad (3)$$

где:  $\mu_{\text{TP}}$  — коэффициент трения скольжения подшипника. Для баббита ориентировочно равняется 0,005.

Увеличение трения в подшипниках создаёт дополнительны момент сопротивления на валу двигателя:

$$M_{\text{доп}} = \frac{1}{2} D_B F_{\text{TP}}, \quad (4)$$

где:  $D_B$  — диаметр вала насоса, м.

Исходя из вышеизложенного, наличие постороннего предмета в насосе создаёт дополнительны наброс мощности на валу двигателя, определяемый по известной формуле:

$$F_{\ddot{\text{O}}} = 0,2097 \mu_{\text{O}} mn^3 RD_{\hat{A}} .(5)$$

На рисунке 3а приведены графики зависимости наброса мощности на валу двигателя от расстояния от предмета до центра вращения при попадании в насос предмета массой от 0,5 до 3 кг. В качестве насоса рассматривается АД-4000-95-2-С (двигатель СДН 2-16-59-6У3, 1600кВт), с номинальной частотой вращения 1000об/мин, диаметром вала 20см, примерным диаметром рабочего колеса 1,2м. Потребляемая механическая мощность составляет около 900кВт при номинальной подаче, согласно заводским рабочим характеристикам.

Для получения сведений о поведении электрических параметров приводного электродвигателя насоса в условиях попадания в насос постороннего предмета проводились исследования математической модели. В качестве модели насосной установки использовался агрегат в составе насоса АД4000-95-2-С (подача 4000м<sup>3</sup>/ч, напор 95м) и синхронного явнополюсного электродвигателя СДН 2-16-59-6У3 (1600 кВт, 1000 об/мин, 6кВ). Модель двигателя реализована на известной системе уравнений Парка-Горева [4]. При моделировании принималось, что в насос на четвёртой секунде попадает тело массой 3кг и застревает на расстоянии

$R=0,5\text{м}$ . Частота вращения 1000 об/мин. Дополнительно проведено моделирование для частоты вращения 3000 об/мин.

На рисунках 3 и 4 приведены диаграммы тока фазы статора приводного двигателя насоса при 1000 об/мин и 3000 об/мин соответственно при попадании инородного тела в насос.

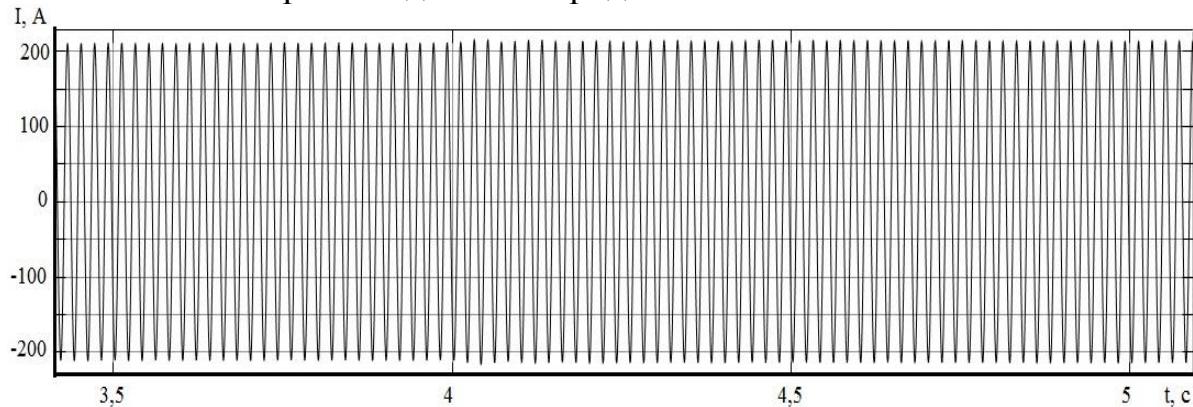


Рисунок 3 — Диаграмма тока фазы статора приводного электродвигателя насоса при попадании инородного тела при частоте вращения 1000 об/мин

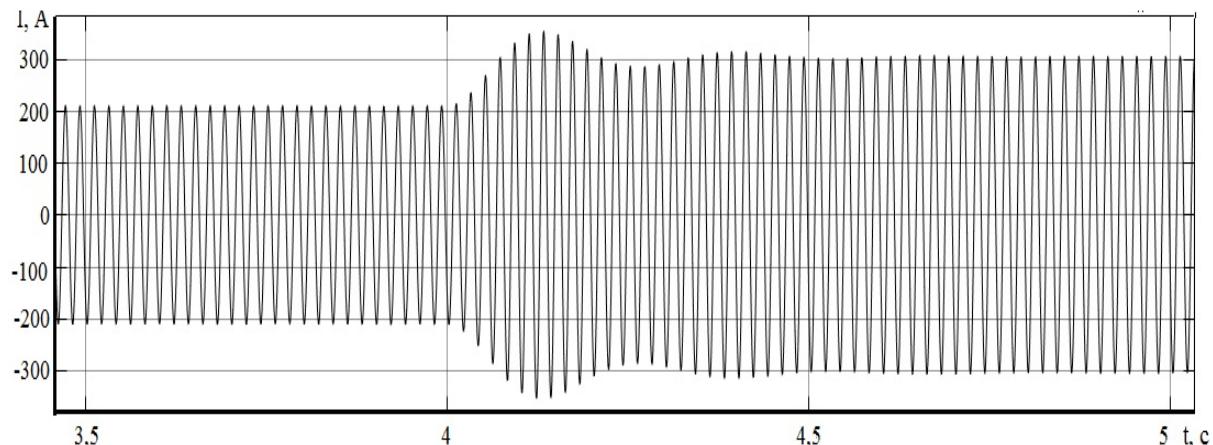


Рисунок 4 — Диаграмма тока фазы статора приводного электродвигателя насоса при попадании инородного тела при частоте вращения 3000 об/мин

Согласно диаграммам тока следует, что при невысоких частотах вращения бросок тока в фазе статора обладает незначительной, практически неразличимой амплитудой. Получение броска тока, достаточного для его фиксации в данном случае возможно только при попадании в насос тяжелых предметов, массой более 3 кг.

При высоких частотах вращения бросок тока может достигать 1,5 крат номинального тока, так как мощность нагрузки зависит от третьей степени частоты вращения. Величина тока достаточна, что бы её можно было зафиксировать стандартными методами измерения. Из этого следует что для быстроходных насосов возможно применять косвенный метод распознания аварийных ситуаций [5] и создать систему защиты насоса от попадания посторонних тел на основе анализа колебаний тока.

## Список литературы

1. Карелин В.Я., Минаев А.В. Насосы и насосные станции: Учеб. Для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.: ил.
2. Абдурашитов С.А., А.А. Тупиченков. Насосы и компрессоры. М., «Недра», 1974. 296 с.
3. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Часть 1 / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: Высшая школа, 1966. – 429 с.
4. Пугачёв Е.В. Кипервассер М.В. Герасимук А.В. Исследование воздействия помпажа турбокомпрессора на энергетические характеристики приводного двигателя. Вестник КузГТУ: научно-технический журнал / Куз. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2016
5. Пугачёв Е.В. Кипервассер М.В. Инжелевская О.В. Методика автоматического распознавания аварийных ситуаций оборудования компрессорных станций. Вестник КузГТУ: научно-технический журнал / Куз. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2011 – С. 51-55