

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Кузбасский научный центр Сибирского отделения
Академии инженерных наук имени А.М. Прохорова
Кемеровское региональное отделение САН ВШ
АО «Евраз - Объединённый Западно-Сибирский
металлургический комбинат»

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, НАУКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ

AS' 2017

**ТРУДЫ XI ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ**

(с международным участием)

Новокузнецк
2017

С 409 Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : Труды XI Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под общ. редакцией С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. - Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. - 475 с., ил.

ISBN 978-5-7806-0502-7

Труды конференции посвящены научным и практическим вопросам автоматизации управления технологическими процессами и предприятиями, социально-экономическими системами, образованием и исследованиями. Представлены результаты исследования, разработки и внедрения методического, математического, программного, технического и организационного обеспечения систем автоматизации и информационно-управляющих систем в различных сферах деятельности.

Сборник трудов ориентирован на широкий круг исследователей, научных работников, инженерно-технический персонал предприятий и научно-исследовательских лабораторий, преподавателей вузов, аспирантов и студентов.

Организации, поддержавшие конференцию:

ОК «Сибшахтострой» (г. Новокузнецк),

ЗАО «Стройсервис» (г. Кемерово),

ООО «Центр сварки и контроля» (г. Кемерово),

ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» (г. Новокузнецк),

ООО «Синерго СОФТ СИСТЕМС» (г. Новокузнецк).

Конференция проведена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-07-20581.

ISBN 978-5-7806-0502-7

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2017

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ НАСОСА ОТ КАВИТАЦИИ НА ОСНОВЕ СИГНАТУРНОГО АНАЛИЗА ТОКА СТАТОРА ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Герасимук А.В., Кипервассер М.В., Симаков В.П.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк*

Одними из наиболее часто используемых на предприятиях различной технологической направленности являются центробежные насосные установки [1]. Такие насосные установки широко используются в различных отраслях промышленности и жизнеобеспечения: в системах водоотведения шахт, рудников, карьеров, в городских насосных станциях (горячее и холодное водоснабжение, канализация), на ТЭЦ, ГРЭС, АЭС (циркуляционные, питательные, конденсатные и др. насосы), на заводах нефтехимической, металлургической, пищевой промышленности для перекачки различных жидкостей.

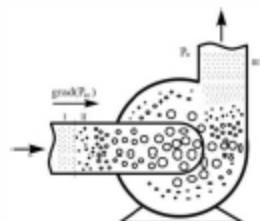
В ряде случаев центробежные насосы являются особо ответственными агрегатами. К таким относятся насосы систем водоснабжения городов, циркуляционные насосы контуров АЭС, водоотлив горнодобывающих предприятий, насосы систем охлаждения доменных печей. Высокие требования к надёжности и бесперебойности работы обуславливают необходимость разработки и конструирования систем защиты насосных установок от ненормальных и аварийных режимов работы.

Целесообразно, что бы система защиты имела в своём составе минимальное количество элементов, в особенности - датчиков. В существующих схемах контроля и защиты датчики являются наиболее уязвимыми элементами системы с точки зрения выхода из строя.

Требованию минимизации количества элементов может отвечать система, созданная на базе метода косвенной диагностики работы оборудования – контроля тока статора приводного двигателя. Такая система в своём составе будет иметь только само устройство защиты (на базе микропроцессорного терминала или какого-либо другого электронного устройства) и измерительный преобразователь.

Одним из наиболее опасных для центробежных насосных агрегатов является режим кавитации. Кавитация – это нарушение сплошности жидкости, происходящее на участках потока, где давление, понижаясь, достигает некоторого критического значения [2]. При засасывании насосом жидкости из резервуара давление во всасывающем трубопроводе $P_{вс}$ падает ниже атмосферного [3].

На рисунке 1 показано возникновение кавитации в насосе. В трубопроводе имеет место градиент давления. В начале трубопровода давление близко к атмосферному, а чем ближе к насосу – тем больше разрежение. По мере продвижения жидкости в насос её давление может стать меньше давления насыщенных паров жидкости при данных условиях.



I – зона пониженного давления без кавитации; II – зона пониженного давления с кавитацией; III – зона повышенного давления

Рисунок 1 – Процесс кавитации жидкости в насосе

В этом случае происходит холодное вскипание жидкости. Одновременно с этим происходит выделение из жидкости растворённого газа. Образуются пузырьки, заполненные насыщенным паром. Чем ниже падает давление, тем более увеличиваются в объёме пузырьки, превращаясь в большие пузыри-каверны. Далее, пузыри уносятся в зону высокого давления (давления нагнетания) P_H , начинающуюся на выходе из колеса насоса, где моментально исчезают вследствие конденсации заполняющих их паров. Таким образом, в потоке создаётся довольно чётко ограниченная кавитационная зона. Это явление характеризуется вибрациями и шумами. При сильном развитии кавитации возможен срыв потока и прекращение работы насоса [1, 2].

При схлопывании каверн, находящихся на поверхности рабочего колеса и улитки насоса, происходит силовое воздействие - гидроудар. При этом, развивается давление, величина которого имеет значения, превосходящие предел текучести материалов колеса и улитки. Длительное воздействие кавитации приводит к разрушению насоса.

Известно, что момент сопротивления на валу двигателя, который создаёт насос, можно определить по следующей формуле [2, 4]:

$$M_c = \frac{30}{\pi n} \frac{Q \rho g H}{\eta}, \quad (1)$$

где Q – подача насоса, $\text{м}^3/\text{ч}$;

ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

H – напор насоса, м;

η – К.П.Д. насоса,

n – частота вращения насоса, об/мин.

Так же, известно, что при уменьшении кавитационного запаса насоса падает его напор и уменьшается КПД, что подтверждается изломом экспериментального графика, приведённого в [1, 3] (зона II).

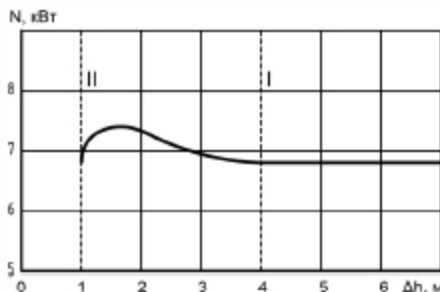


Рисунок 2 – Зависимость механической мощности потребляемой насосом, в зависимости от кавитационного запаса

Как видно из графика, по мере уменьшения кавитационного запаса, мощность, потребляемая насосом, сначала, несколько увеличивается, а затем резко падает, до значений близких к значениям сухого хода, так как при полностью разившейся кавитации происходит срыв потока и насос перестаёт перекачивать жидкость [1, 3].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что ток приводного электродвигателя насоса будет изменяться в соответствии с изменением нагрузки на его валу [5, 6].

Для подтверждения этого предположения в среде MatLAB Simulink было проведено моделирование работы насосной установки в режиме кавитации.

В качестве модели насосной установки использовался агрегат в составе насоса АД4000-95-2-С (подача $4000 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор 95 м) и синхронного явнополюсного электродвигателя СДН 2-16-59-6УЗ (1600 кВт, 1000 об/мин, 6 кВ). Модель двигателя реализована на двухфазной системе уравнений Парка - Горева [7].

$$\left\{ \begin{aligned} i_a &= i_d \cos \gamma - i_q \sin \gamma \\ i_b &= i_d \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) - i_q \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_c &= i_d \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) - i_q \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \\ U_d &= \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q + r_1 i_d \\ U_q &= \frac{d\psi_q}{dt} - \omega \psi_d + r_1 i_q \\ U_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \\ 0 &= \frac{d\psi_{yd}}{dt} + r_{yd} i_{yd} \\ 0 &= \frac{d\psi_{yq}}{dt} + r_{yq} i_{yq} \\ M &= M_c + J \frac{d\omega}{dt} \\ M &= \psi_d i_q - \psi_q i_d \\ \omega_1 - \omega &= \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где i_a, i_b, i_c – фазные токи статора, А;

U_d, U_q – напряжения на зажимах обмотки статора по продольной и поперечной осям; Ψ_d, Ψ_q, i_d, i_q – соответственно потокоцепления и токи обмоток фаз статора по продольной и поперечной осям;

r_1 – активное сопротивление обмотки фазы статора;

U_f – напряжение на зажимах обмотки возбуждения;

Ψ_f, i_f – потокоцепление и ток обмотки возбуждения;

r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения;

$\Psi_{yd}, \Psi_{yq}, i_{yd}, i_{yq}$ – соответственно потокоцепления и токи демпферных обмоток по продольной и поперечной осям соответственно;

r_{yd}, r_{yq} – активные сопротивления демпферной обмотки по продольной и поперечной осям;

M – электромагнитный момент;

M_c – момент сопротивления нагрузки;

J – момент инерции вращающихся масс;

γ – угловое положение ротора.

Система уравнений (4) достоверно описывает работу синхронного двигателя при симметричном режиме питания, применима к рассматриваемому случаю и реализована в виде стандартного блока из библиотеки Simulink/Simscape/SimPowerSystems.

Функциональная схема модели насосной установки в режиме кавитации приведена на рисунке 3.

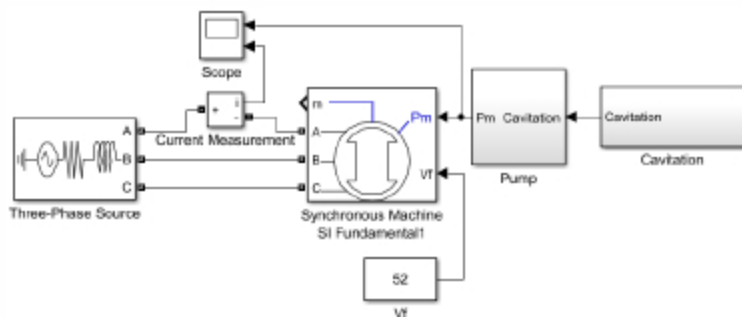


Рисунок 3 – Функциональная схема модели насосной установки в режиме кавитации

Результаты моделирования работы насосной установки при возникновении явления кавитации приведены на рисунке 4.

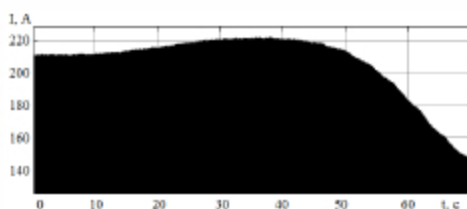


Рисунок 4 – Диаграмма тока фазы статора приводного двигателя насоса, работающего при кавитации

Диаграмма тока статора, как и ожидалось, повторяет своим видом график нагрузки на валу двигателя при кавитации.

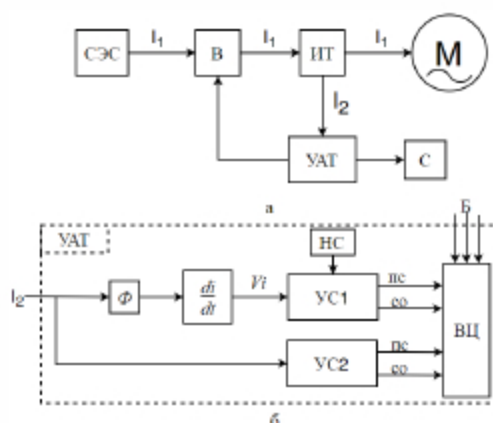
Кавитацию, которая только начала развиваться, по току статора засечь технически сложно, так как некоторое возрастание тока статора на начальном участке зоны II рисунка 3 будет практически неотличимо от возрастания тока, вызванного, увеличением момента на валу вследствие технологической перегрузки. Однако, наиболее опасную развившуюся кавитацию можно выявить этим методом. Быстро развивающаяся кавитация вызывает падение мощности нагрузки на валу двигателя, а значит - и изменение фазного тока статора. В этом случае, кавитацию можно идентифицировать по скорости изменения действующего значения тока статора. Чем быстрее развивается кавитация, тем быстрее падает ток статора. Кавитацию, которая развивается медленно, можно засечь методом сравнения тока статора в нормальном режиме работы насоса с током в режиме кавитации.

На рисунке 5 представлена предлагаемая функциональная схема системы защиты насосного оборудования от кавитации.

Принцип работы системы следующий: измеритель тока преобразует первичные величины тока статора в действующее значение и подаёт его в устройство анализа тока.

Устройство анализа имеет в своём составе два канала сравнения. Один канал сравнивает текущий ток статора со значением тока в нормальном режиме (задаётся в блоке уставок при наладке оборудования). Если разница между заданным током статора и измеренным не велика, то выдаётся предупредительный сигнал дежурному персоналу о ненормальном режиме работы насосной установки. Если же разница существенна, то срабатывает вторая ступень защиты – отключение насоса, если это не запрещено технологическими блокировками. Второй канал вычисляет производную от действующего значения тока статора по времени, то есть определяет скорость изменения тока статора. Фильтр отсекает высокочастотную

часть колебаний тока, вызванных помехами, толчками тока вследствие каких-либо процессов в питающей сети или любыми другими явлениями, так как они могут вызвать ложное срабатывание защиты. Полученная скорость изменения тока сравнивается с набором заданных уставок, определяющих дальнейшую работу устройства. Если скорость изменения мала, то выдается предупредительный сигнал дежурному персоналу о ненормальном режиме работы. Если скорость изменения высокая и ток статора быстро падает, то подается сигнал на отключение насоса.



СЭС – система электроснабжения, В – выключатель, ИТ – измеритель тока, УАТ – устройство анализа тока, С – сигнализация, М – электродвигатель, Φ – фильтр, НС – набор уставок, УС1, УС2 – устройства сравнения, ВЦ – выходные цепи, I_1 – первичный ток статора, I_2 – вторичный ток статора, V_i – сигнал скорости изменения действующего значения тока, со – сигнал отключения, пс – предупредительный сигнал, Б – сигналы технологических блокировок

Рисунок 5 – Функциональная схема системы защиты насоса от кавитации по току статора (а) и устройства анализа тока (б)

Предложенная система, благодаря малому количеству структурных элементов будет превосходить другие существующие системы защиты в части надежности. Кроме того, вследствие использования в качестве контрольного параметра тока статора приводного двигателя быстрдействие также будет выше, чем у существующих систем.

Библиографический список

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. Турк В.И., Минаев А.В., Насосы и насосные станции. Учеб. Для вузов. М.: Стройиздат, 1976. – 304 с.
4. Шлипенко З.С. Насосы, компрессоры, вентиляторы. К., «Техніка», 1976, 386 с.
5. Путачёв 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
6. Путачёв 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
7. Электрические машины (специальный курс) / Г.А. Сипайлов [и др.]. – М.: Высшая школа, 1987. – С. 77–88.

ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА ПРОСТОЕВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПОТОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ.....	178
Койнов Р.С., Ляховец М.В., Добрынин А.С.	
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО КОНТАКТНОГО ГРАФИКА ВНУТРИЗАВОДСКИХ ПЕРЕВОЗОК ЛИСТОВОГО ПРОКАТА.....	185
Луговик А.И., Куделин С.П.	
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАПОЛНЕНИЯ СКЛАДА ЛИСТОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РИТМИЧНОСТИ ОТГРУЗКИ ПРОКАТА.....	187
Радченко М.О., Куделин С.П.	
К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ НЕЙРОСЕТЕВОГО НАСТРОЙЩИКА НА МНОГОЗОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПЕЧАХ.....	189
Еременко Ю.И., Глушенко А.И., Фомин А.В.	
ПРИМЕНЕНИЕ IoT-МОДУЛЕЙ И ОДНОКРИСТАЛЛЬНЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ.....	194
Андрянов О.Н., Воронцова А.Д.	
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	196
Михайлов В.Г., Киселева Т.В.	
СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОХОДОМ.....	201
Аксенов В.В., Чичерин И.В.	
РЕАКТОРЫ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ КАК ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ.....	205
Гусев С.С.	
ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ СЫРЬЕВЫМИ И ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ В АГЛОДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	209
Спирин Н.А., Гурин И.А., Лавров В.В.	
О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА.....	214
Трофимов В.Б.	
О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧЬЮ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВКИ МЕДНЫХ КАТОДОВ.....	217
Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Спирин Н.А.	
СИСТЕМА ЗАЩИТЫ НАСОСА ОТ КАВИТАЦИИ НА ОСНОВЕ СИГНАТУРНОГО АНАЛИЗА ТОКА СТАТОРА ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.....	223
Герасимук А.В., Кипервассер М.В., Симakov В.П.	
УПРАВЛЕНИЕ СТОЙКОСТЬЮ СВАРНОГО УЗЛА К ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ.....	228
Веревкин В.И., Веревкин С.В.	
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ТОРГОВЫХ КОМПЛЕКСАХ.....	232
Гиманова И.А., Дулесов А.С.	