Шабанов В.А.
Shabanov V.A.

кандидат технических наук,
доцент, заведующий
кафедрой «Электротехника
и электрооборудование
предприятий»
ФГОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация

Пашкин В.В.
Pashkin V.V.

инженер-энергетик
I категории
ООО «Газпром
добыча Ямбург»,
Газпромышленное
управление,
г. Новый Уренгой,
Российская Федерация

Ивашкин О.Н.
Ivashkin O.N.

электромонтёр по ремонту
и обслуживанию
электрооборудования
V разряда, ООО «Газпром
добыча Ямбург»,
Газпромышленное
управление,
г. Новый Уренгой,
Российская Федерация

УДК 621.31

DOI:

СПОСОБ ПОДХВАТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ И НАСОСНЫХ УСТАНОВОК ПРИ ОБРАТНОМ ВРАЩЕНИИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

Электроприводы вентиляционных и насосных установок занимают основную долю в парке производственных электроприводных механизмов нефтегазопромышленных объектов. При эксплуатации вентиляторных и насосных установок в случае отключения электродвигателя от электрической сети нередко встречается вращение рабочего колеса вентилятора или насоса в направлении, обратном направлению вращения в рабочем режиме. Данное явление возникает при наличии противодействия в сети (в трубопроводе, вентиляционном канале, теплообменном оборудовании и т.п.), под действием которого через отключенный и находящийся в технологическом резерве вентилятор или насос происходит движение потока рабочей среды в направлении, противоположном направлению потока в рабочем режиме. Возникающий при этом вращающий момент потока рабочей среды приводит рабочее колесо во вращение в противоположном направлении. В теории гидравлических машин такое обратное вращение вала называется «турбинным вращением» («backspin» – англ.), в аэродинамике вентиляции данный режим принято называть авторотацией. Примером турбинного вращения может служить вращение рабочего колеса погружного электроцентробежного насоса, отключенного от электрической сети, под действием обратного потока скважинной жидкости при неисправности или несрабатывании обратного клапана. Другим примером авторотации является вращение рабочего колеса, находящегося в технологическом резерве вентилятора аппарата воздушного охлаждения (АВО) газа, под действием рециркулирующих потоков воздуха от работающих вентиляторов.

В статье рассматриваются способы подхвата электроприводов вентиляционных и насосных установок при обратном вращении рабочего колеса. Показано, что существующие методы определения начальной скорости и подхвата ротора ориентированы на самозапуск электродвигателя при потере питания, при котором ротор вращается в штатном направлении.

Предложен и исследован на имитационной модели способ подхвата преобразователя частоты, позволяющий определить частоту и направление вращения ротора, и тем самым обеспечить подхват и успешный пуск электродвигателя при обратном направлении вращения.

Ключевые слова: частотное регулирование, электропривод, преобразователь частоты, подхват, электродвигатель, авторотация, турбинное вращение, вентилятор, насос, энергосбережение, ресурс.

METHOD OF PICK UP OF ELECTRIC DRIVES FANS AND PUMPS UNITS WITH BACKSPIN IMPELLER

Electric drives fans and pumps units occupy the main share in the fleet of industrial electric drive mechanisms of oil and gas facilities. During operation of fan and pump installations, there is often a specific problem of rotation of the impeller, disconnected from the electrical network of the fan or pump, in the direction opposite to the direction of rotation in the operating mode. This phenomenon occurs when the back pressure in the network (in the pipeline, ventilation duct, heat exchange equipment, etc.), under the action of which the flow of working medium flows through a fan or pump in the technological reserve in the direction opposite to the direction of flow in operating mode. The resulting torque causes the impeller to rotate in the opposite direction of the operating mode. In the theory of hydraulic machines, the reverse rotation of the shaft is called backspin, in aerodynamics of ventilation this mode is called autorotation.

An example of a turbine rotation is the rotation of the impeller of an electric submersible pump that is disconnected from the electrical network in the event of a power outage under the action of the reverse flow of the well fluid in the event of a malfunction or failure of the check valve. An another example of autorotation is the rotation of the high inertial impeller of the gas in the process reserve of the fan of the air-cooled of gas, under the effect of air flow recirculating from operating fans.

The article discusses ways of picking up electric drives of ventilation and pumping installations during reverse rotation of the impeller. It is shown that the existing methods for determining the initial speed and the pickup of the rotor are focused on the self-starting of the electric motor when power is lost, at which the rotor rotates in the normal direction. A method of picking up a frequency converter was proposed and investigated on a simulation model, which allows determining the frequency and direction of rotation of the rotor, thereby ensuring that the electric motor is picked up and successfully started in the opposite direction of rotation.

Key words: frequency regulation, electric drive, frequency converter, rotor pickup, electric motor, autorotation, backspin, fan, pump, energy saving, resource.

При отключении электродвигателя вентиляторной или насосной установки возможно вращение ротора электродвигателя и рабочего колеса приводимого им механизма в направлении, обратном направлению вращения в рабочем режиме. Происходит это под действием вращающего момента, создаваемого обратным потоком рабочей среды. Момент, создаваемый обратным потоком жидкости насоса или рециркулирующим потоком воздуха вентилятора, определяется только энергией потока рабочей среды. Частота вращения рабочего колеса в обратном направлении достигает установившегося значения, при котором момент сопротивле-

ния механизма уравнивает создаваемый обратный вращающий момент. Режим обратного режима может быть длительным и существует, пока присутствует обратный поток рабочей среды [1].

При пуске механизма, вращающегося в обратном направлении, происходит сначала торможение рабочего колеса и затем его последующий разгон до номинальной частоты вращения. В процессе торможения и разгона обратный поток рабочей среды вытесняется возрастающим потоком рабочей среды. В рабочем режиме через механизм весь поток рабочей среды проходит в направлении, соответствующем рабочему режиму,

и нагрузка на валу электродвигателя создаётся только моментом сопротивления механизма [2-4].

Существенное количество электроприводов, находящихся на данный момент в эксплуатации, является нерегулируемыми. Для них возможен только прямой пуск. Прямой пуск электродвигателя, рабочее колесо которого имеет обратное вращение, приводит к тому, что электродвигатель оказывается в режиме торможения противовключением, что сопровождается рядом негативных последствий [4, 5]: увеличением пускового тока, увеличением времени протекания пускового тока, увеличением потерь электроэнергии за время пуска и, как следствие, более интенсивным нагревом, возникновением динамических ударов в механической системе. Момент, развиваемый электродвигателем в режиме противовключения, может оказаться недостаточным для преодоления тормозного момента, и пуск может оказаться неуспешным.

Решить проблему вращения рабочего колеса в режиме авторотации можно установкой дополнительных противореверсных устройств. Но установка дополнительных устройств приводит к снижению надёжности механизма, требует дополнительного обслуживания, а в случае погружного электроцентробежного насоса технически сложна из-за ограниченного диаметра обсадной колонны скважины. Поэтому желательно применять такие решения, которые не снижают надёжность механизма и не приводят к усложнению обслуживания и эксплуатации механизма. Таким решением может быть использование электрического способа торможения, с оптимизацией по критерию минимальных потерь мощности в процессе торможения. В [6] исследовано изменение величины тока электродвигателя и времени торможения в процессе пуска электропривода вентилятора АВО газа в режиме авторотации. В результате моделирования показано, что применение частотного останова позволяет осуществлять торможение с минимальным временем и минимальными потерями мощности.

В целях определения начальной частоты питаемого напряжения при подхвате рабо-

чего колеса необходимо измерение начальной скорости вращения. В технических устройствах [7-9] для измерения скорости вращения устанавливаются дополнительные устройства: тахогенераторы, магниты с радиально намагниченными разнополярными зонами. Установка дополнительных устройств для измерения скорости вращения снижает надёжность АВО газа и не нашла применение на практике. Для определения скорости вращения электродвигателя в [10] предложено прикладывать к статору высокочастотное напряжение, под действием которого по обмоткам статора протекает высокочастотный ток, величина которого пропорциональна частоте вращения ротора. Наиболее интересным является определение частоты вращения ротора путём подачи постоянного тока в две или три фазы обмотки статора, которое реализуется способом подхвата преобразователя частоты [11]. Частота наводимой электродвижущей силы (ЭДС) в обмотке статора электродвигателя при этом равна частоте вращения ротора электродвигателя. Однако при таком способе не определяется направление вращения ротора и не возможно выявить режим авторотации. Для выявления режима авторотации в [12-14] предложено дополнительно к определению наводимой в обмотке статора ЭДС определять последовательность чередования фаз наведенной ЭДС. На рисунке 1 приведена схема устройства, позволяющая определять и частоту, и направление вращения. Если при потере питания направление вращения ротора электродвигателя совпадает с направлением вращения в рабочем режиме, то есть механизм находится в режиме выбега, то происходит подхват и частотный пуск не из состояния покоя, а с той частоты вращения, с которой вращается ротор. При обратном направлении вращения рабочего колеса, т.е. когда механизм вращается в режиме авторотации, происходит подхват и частотное торможение и остановка механизма, после которого производится частотный пуск.

Рисунок 1. Структурная схема частотного пуска с определением направления вращения ротора:

ПЧ – преобразователь частоты, ЭД – электродвигатель, ТТ – трансформатор тока, БУИ – блок управления инвертором, ФКИ – формирователь коротких импульсов, ДН – датчик напряжения, БОЧ – блок определения частоты, БОПЧФ – блок определения последовательности чередования фаз

Перед пуском электродвигателя блок управления инвертором (БУИ) подает сигналы на два транзистора в разных группах (эмиттерная и коллекторная) инвертора и подает в обмотку статора однофазный ток. В двух фазах обмотки статора двигателя нарастает ток, и при превышении током уставки ключи закрываются. При этом в обмотке статора кратковременно протекает однополярный ток – импульс тока. Величина уставки выбирается на уровне, при котором обеспечивается достаточное намагничивание двигателя, чтобы с учётом чувствительности блока определения частоты (БОЧ) и блока определения последовательности чередования фаз (БОПЧФ) обеспечить заданную точность измерения при минимально заданной частоте вращения. Под действием импульса тока статора в роторе двигателя также создается импульс тока. Этот ток в свою очередь создаёт магнитное поле, которое наводит в обмотках статора ЭДС, частота которой равна частоте вращения ротора (умноженной на число пар полюсов), а последовательность чередования фаз определяет направление вращения ротора. Определенное таким образом направление вращения и значение

частоты вращения передается в блок управления инвертором (БУИ). Инвертору задаётся это начальное значение частоты и направление вращения. С этой частоты начинается частотный разгон электродвигателя, если ротор электродвигателя вращается в режиме выбега, или частотное торможение (частотный останов), если ротор вращается обратном направлении [15].

В результате виртуального эксперимента, проведённого на имитационной модели частотно-регулируемого электропривода вентилятора АВО газа, приведённой в [16], получены графики зависимости скорости вращения и фазного напряжения статора от времени при частотном торможении, останове и частотном разгоне.

Как видно из графиков, изображённых на рисунке 2, при «подхвате» ротора при скольжении электродвигателя $S=2$ (отрицательной скорости вращения, равной по модулю синхронной частоте), при выбранной интенсивности снижения/повышения частоты частотное торможение происходит за $t_{\text{чт}}=10$ с, дальнейший частотный разгон $t_{\text{чп}}=12$ с, при этом кратность действующего тока статора

Рисунок 2. Графики зависимости действующего фазного напряжения статора скорости вращения от времени при частотном торможении и частотном разгоне

не превышает значения 1,7 на всём временном диапазоне торможения и разгона.

Выводы

1. В настоящее время при вращении электропривода в обратном направлении подхват и частотный пуск происходит в режиме противовключения с той частоты вращения, с которой вращается ротор. В статье предложен и исследован способ определения скорости и направления вращения рабочего колеса перед пуском АВО газа. При использовании предложенного способа сначала происходит частотный останов электродвигателя путём снижения частоты до нуля и затем частотный пуск с нулевой частоты вращения электродвигателя.

2. Вследствие расширения функциональных возможностей преобразователя частоты дополнением функции определения частоты и направления вращения ротора, перед пуском повышается надёжность электропривода за счет исключения пуска электродвигателя в режиме противовключения, при обрат-

ном вращении рабочего колеса вентиляционного или насосного механизма.

3. В результате имитационного моделирования частотно-регулируемого электропривода вентилятора АВО газа получено, что при предложенном способе подхвата преобразователя частоты успешный пуск осуществляется при любых скоростях обратного вращения ротора, при этом пусковой ток не превышает кратности 1,7.

Список литературы

1. Шабанов В.А., Пашкин В.В. Оценка увеличения времени пуска электроприводов вентиляционных механизмов в режиме противовключения // Электропривод, электро-технологии электрооборудование предприятий : Сборник научных трудов III Всероссийской научно-технической конференции (с международным участием) / редкол.: В.А. Шабанов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. – С. 83-88.

2. Кабаргина О.В., Шабанов В.А., Юсупов Р.З. Выбег насосных агрегатов при наличии противодействия // Электротехнологии, элект-

тропривод и электрооборудование предприятий: Сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции / редкол.: В.А. Шабанов и др. – Уфа, 2009. – С. 10-18.

3. Пашкин В.В. Проблемы пуска электроприводов аппаратов воздушного охлаждения газа // Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств : Сборник научных трудов. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2010. – С. 246-250.

4. Шабанов В.А., Пашкин В.В. Анализ пуска электроприводов автоматического охлаждения газа в режиме противовключения // Нефтегазовое дело. – 2013. - № 1. – С. 27-36.

5. Шабанов В.А., Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Экспериментальное исследование влияния рециркулирующих потоков воздуха на пусковой ток и время пуска осевого вентилятора // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов : III-й Межвузовский сборник научных трудов, посвященный юбилею кафедры. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. – С. 44-45.

6. Шабанов В.А., Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Анализ потерь электроэнергии в электроприводе аппарата воздушного охлаждения газа // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. - № 1. – Т. 10. – С. 18-24.

7. Многодвигательный частотно-регулируемый электропривод: пат. 2326488 РФ / Сидоров П.Г., Александров Е.В., Лагун В.В., заявл. 24.10.06, опубл. 10.06.08, Бюл. № 16.

8. Способ определения скорости вращения погружных асинхронных электродвигателей: пат. 2463612 РФ / Ковалев А.Ю., Ковалева Н.А., Кузнецов Е.М., заявл. 10.02.11, опубл. 10.10.12, Бюл. № 28.

9. Бесконтактный датчик скорости вращения и положения ротора: пат. 2488122 РФ / Загрянный Э.А., Фоменко А.Н., Гаврилов Ю.А., Иваник В.В., Губарь Н.С., заявл. 13.02.12, опубл. 20.07.13, Бюл. № 20.

10. Устройство управления и способ управления электрической вращающейся машиной: пат. 2481694 РФ: / Ито Масато, Кимпара Йосихито, Танимото Масанори, заявл. 25.03.09, опубл. 10.05. 13, Бюл. № 13.

11. Способ подхвата преобразователя частоты: пат. № 2462808 РФ / Кузькин В.И.,

Мелешкин В.Н., Московец В.Н., Мясичев С.В., заявл. 15.06.11, опубл. 27.09.12. Бюл. № 27.

12. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. Определение скорости вращения асинхронного электродвигателя, вращающегося под действием рециркулирующего потока воздуха // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов : II Межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). – Уфа, 2016.

13. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Способ пуска частотно-регулируемого электропривода вентиляторных установок в режиме авторотации // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий : Сборник научных трудов III Международной (VI Всероссийской) научно-технической конференции / редкол.: В.А. Шабанов и др. – Уфа, 2017.

14. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. Применение функции «подхвата» преобразователя частоты для пуска электроприводов вентиляторных установок в режиме авторотации // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов : V Межвузовский сборник научных трудов. – Уфа, 2018.

15. Пашкин В. В. Способ подхвата преобразователя частоты / В.В. Пашкин [и др.]: Пат. РФ № 2 656 846 С1, Заявлено 10.04.2017. Опубл. 07.06.2018. Бюл. № 16.

16. Ивашкин О.Н., Пашкин В.В., Шабанов В.А. Моделирование процесса пуска электропривода АВО газа в режиме противовключения // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий : Сборник научных трудов I Международной (IV Всероссийской) НТК // Нефтегазовое дело. – 2013. – С. 127-133.

References

1. Shabanov V.A., Pashkin V.V. Ocenka uvelichenija vremeni puska elektroprivodov ventiljacionnyh mehanizmov v rezhime protivovkljuchenija // Elektroprivod, elektrotehnologii elektrooborudovanije predpriyatij : Sbornik nauchnyh trudov III Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem) / redkol.:

- V.A. Shabanov i dr. – Ufa: Izd-vo UGNTU, 2011. – P. 83-88.
2. Kabargina O.V., Shabanov V.A., Jusupov R.Z. Vybeg nasosnyh agregatov pri nalichii protivodavlenija // Elektrotehnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatij : Sbornik nauchnyh trudov II Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii / redkol.: V.A. Shabanov i dr. – Ufa, 2009. – P. 10-18.
3. Pashkin V.V. Problemy puska elektroprivodov apparatov vozdushnogo ohlazhdenija gaza // Problemy upravlenija i avtomatizacii tehnologicheskikh processov i proizvodstv : Sbornik nauchnyh trudov. – Ufa: Izdatel'stvo UGNTU, 2010. – P. 246-250.
4. Shabanov V.A., Pashkin V.V. Analiz puska elektroprivodov avtomaticheskogo ohlazhdenija gaza v rezhime protivovkljuchenija // Neftegazovoe delo. – 2013. - № 1. – P. 27-36.
5. Shabanov V.A., Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Eksperimental'noe issledovanie vlijanija recirkulirujushhih potokov vozduha na puskovoj tok i vremja puska oseвого ventiljatora // Povyshenije nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotehnicheskikh sistem i kompleksov : III Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov, posvjashhennyj jubileju kafedry. – Ufa: Izd-vo UGNTU, 2014. – P. 44-45.
6. Shabanov V.A., Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Analiz poter' elektroenergii v elektroprivode apparata vozdushnogo ohlazhdenija gaza // Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekxy i sistemy. – 2014. - № 1. – vol. 10. – P. 18-24.
7. Mnogodvigatel'nyj chastotno-reguliruemyj elektroprivod: pat. 2326488 RF / Sidorov P.G., Aleksandrov E.V., Lagun V.V., zajavl. 24.10.06, opubl. 10.06.08. Bjul. № 16.
8. Sposob opredelenija skorosti vrashhenija pogruzhnyh asinhronnyh elektrodvigatelej: pat. 2463612 RF / Kovalev A. Ju., Kovaleva N. A., Kuznecov E., M., zajavl. 10.02.11, opubl. 10.10.12, Bjul. № 28.
9. Beskontaktnyj datchik skorosti vrashhenija i polozhenija rotora: pat. 2488122 RF / Zagrivnyj Je.A., Fomenko A.N., Gavrilov Ju.A., Ivanik V.V., Gubar' N.S., zajavl. 13.02.12, opubl. 20.07.13, Bjul. № 20.
10. Ustrojstvo upravlenija i sposob upravlenija elektricheskoy vrashhajushhejsja mashinoy: pat. 2481694 RF: / Ito Masato, Kimpara Josihito, Tanimoto Masanori, zajavl. 25.03.09, opubl. 10.05. 13, Bjul. № 13.
11. Sposob podhvata preobrazovatelja chastoty: pat. № 2462808 RF / Kuz'kin V.I., Meleshkin V.N., Moskovec V.N., Mjasishhev S.V., zajavl. 15.06.11, opubl. 27.09.12, Bjul. № 27.
12. Pashkin V.V., Ivashkin O.N., Shabanov V.A. Opredelenie skorosti vrashhenija asinhronnogo elektrodvigatelja, vrashhajushhegosja pod dejstviem recirkulirujushhego potoka vozduha // Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotehnicheskikh sistem i kompleksov : II Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov (s mezhdunarodnym uchastiem). – Ufa, 2016.
13. Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Sposob puska chastotno-reguliruemogo elektroprivoda ventiljatornyh ustanovok v rezhime avtorotacii // Elektroprivod, elektrotehnologii i elektrooborudovanie predpriyatij : Sbornik nauchnyh trudov III Mezhdunarodnoj (VI Vserossijskoj) nauchno-tehnicheskoy konferencii / redkol.: V.A. Shabanov i dr. – Ufa, 2017.
14. Pashkin V.V., Ivashkin O.N., Shabanov V.A. Primenenie funkcii «podhvata» preobrazovatelja chastoty dlja puska elektroprivodov ventiljatornyh ustanovok v rezhime avtorotacii // Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotehnicheskikh sistem i kompleksov : V Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. – Ufa, 2018.
15. Pashkin V.V. Sposob podhvata preobrazovatelja chastoty / V.V. Pashkin [i dr.]: Pat. RF № 2 656 846 S1, Zajavleno 10.04.2017 Opubl. 07.06.2018. Bjul. № 16.
16. Ivashkin O.N., Pashkin V.V., Shabanov V.A. Modelirovanie processa puska elektroprivoda AVO gaza v rezhime protivovkljuchenija // Elektroprivod, elektrotehnologii i elektrooborudovanie predpriyatij : Sbornik nauchnyh trudov I mezhdunarodnoj (IV Vserossijskoj) NTK // Neftegazovoje delo. – 2013. – P. 127-133.