

УДК 316.31

АНАЛИЗ ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА В РЕЖИМЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ

Шабанов В.А.

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа

Пашкин В.В.

ООО «Газпром добыча Ямбург», г. Новый Уренгой
e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается процесс пуска асинхронного двигателя вентиляторов в системе автоматического воздушного охлаждения (АВО) газа. Показано, что вследствие наличия рециркуляционных потоков воздуха двигатель перед пуском может вращаться в обратном направлении. При этом пуск двигателя происходит в режиме противовключения. Исследована зависимость времени пуска электродвигателя от скорости обратного вращения. Показано, что при включении двигателя, возможно увеличение времени пуска более чем в два раза по сравнению с пуском из состояния покоя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, режим противовключения, время пуска, вентилятор, потоки воздуха.

Газовый промысел – единый технологический комплекс, обеспечивающий процесс добычи, сбора, промысловой подготовки, компримирования и транспортировки газа от скважины до подачи в газотранспортную систему [1]. Неотъемлемой частью технологической цепи промысла является процесс охлаждения газа, который производят между ступенями сжатия газоперекачивающими агрегатами (ГПА) компрессорных цехов дожимных компрессорных станций (ДКС) и на выходе из установки комплексной подготовки газа (УКПГ). В статье рассматривается процесс пуска асинхронного двигателя вентиляторов в системе автоматического воздушного охлаждения (АВО) газа, когда вследствие наличия рециркуляционных потоков воздуха двигатель перед пуском может вращаться в обратном направлении.

Межступенчатые холодильники для охлаждения газа обеспечивают определённую температуру газа на входе в последующую ступень компримирования, массовая производительность которой будет тем выше, чем ниже температура всасываемого газа. Ступень охлаждения после последней

ступени компримирования необходима для отбора внутренней энергии газа, повышенной при адиабатном процессе повышения давления, и приведения газа к требуемой температуре для его эффективной осушки до требуемой точки росы в соответствии с ОСТ 51.40-93 на УКПГ. Круглогодичное охлаждение газа на выходе УКПГ обеспечивает ограничение глубокого оттаивания грунтов многолетней мерзлоты с потерей несущей способности грунта; предотвращение нарушения изоляции трубопровода межпромыслового коллектора в результате теплового воздействия, тем самым повышает надёжность и эффективность работы газопровода.

На рисунке 1 представлена параметрическая схема теплоэнергетических преобразований в технологической цепочке газового промысла.

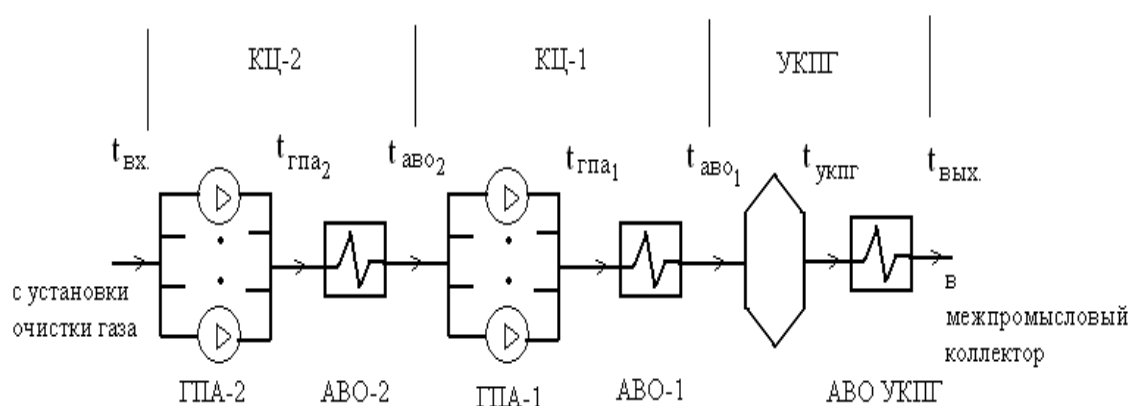


Рисунок 1. Схема теплоэнергетической системы сжатия, охлаждения и подготовки газового промысла

Технологическая схема ДКС обеспечивает компримирование газа до давления, необходимого для обеспечения технологического режима осушки. Согласно требованиям, приведённым в СТО2-2.3-377-2009, при температуре газа свыше 40°C рекомендуется применение двухступенчатого охлаждения «сырого» газа. При этом каждая из секций установки охлаждения газа (УОГ) выполняется из двух последовательно включенных АВО. Секции в свою очередь включены параллельно по отношению к входному и выходному коллекторам (рисунок 2).

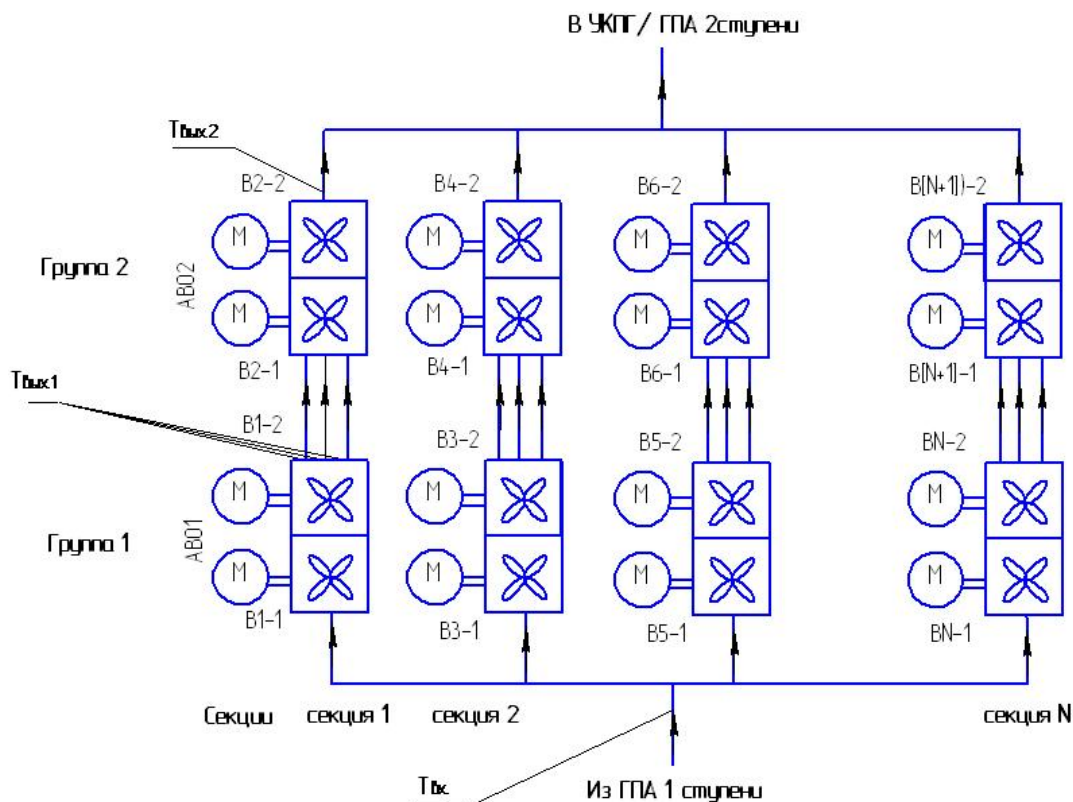


Рисунок 2. Структурная схема УОГ с двухступенчатым охлаждением

На момент ввода УОГ в эксплуатацию, вследствие простоты исполнения и отсутствия на тот момент альтернативных зарекомендовавших себя способов, наибольшее распространение получил способ оперативного регулирования температуры газа на выходе УОГ, основанный на дискретных переключениях электродвигателей. При таком способе часть вентиляторов находятся в работе, а другая часть в резерве. При пуске одного из резервных электродвигателей на лопасти вентилятора действует механические усилия от рециркуляционного потока воздуха, вызванного работой соседних вентиляторов. На рисунке 3 изображён механизм образования рециркуляционного потока. Нагнетаемый воздух на выходе вентилятора распространяется в области наименьшего давления. При этом поток частично отклоняется и попадает в полость соседнего вентилятора, что приводит к образованию усилий на лопасти и их раскручивание. В результате колесо вентилятора, электродвигатель которого отключен от сети, вращается в обратном направлении.

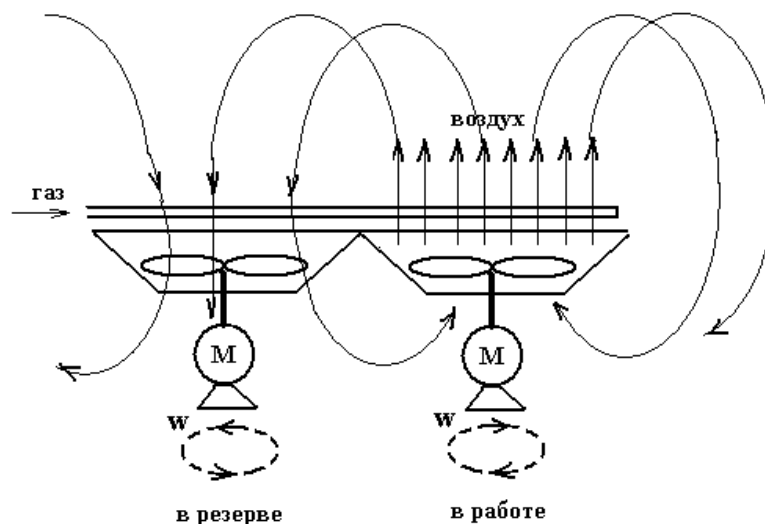


Рисунок 3. Возникновение момента рециркуляционного потока

Согласно [2]... «в целях предотвращения инерционного удара колесо вентилятора АВО в момент пуска не должно иметь вращения в обратную сторону». Однако на практике данное условие не всегда выполняется, т.к. технических средств, удерживающих колесо вентилятора, конструкцией не предусмотрено. В результате при пуске электродвигателя с вращающимся в обратную сторону ротором возникает режим противовключения.

Режим противовключения – это режим, при котором ротор двигателя вращается под действием подводимой извне энергии против направления вращения магнитного поля [3]. Это режим больших скольжений, т.к. в этом случае скольжение больше единицы [4]. В технической литературе режим противовключения рассматривается как тормозной и исследуется обычно с точки зрения эффективности торможения [5]. Рассмотрим свойства электродвигателя при пуске в режиме противовключения.

В любом режиме работы токи статора и ротора можно определить по выражению, полученному из Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя [5]:

$$I_1 = I_0 + I_2' = I_0 + \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (1)$$

где I_1 – ток фазы обмотки статора; I_0 – ток ветви намагничивания (ток холостого хода); $U_{1\phi}$ – напряжение фазы обмотки статора; I_2' – приведенный ток ротора; R_1 , X_1 – соответственно активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки статора; R_2' – приведенное активное сопротивление обмотки ротора; S – скольжение; X_2' – приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора.

В режиме противовключения $S > 1$. При этом значение R_2/S становится меньше, чем при пуске из неподвижного состояния, когда $S = 1$. В результате, как следует из (1), увеличиваются как ток ротора, так и ток статора, превышая их значения при пуске из неподвижного состояния. Таким образом, как и при торможении, режим противовключения в условиях пуска электродвигателя сопровождается повышенными значениями токов в обмотках электродвигателя. Повышенные токи приводят к ряду негативных последствий: инерционным ударам на механическую часть системы «двигатель-вентилятор»; увеличению времени пуска, повышенным потерям мощности при пуске. Все это влечёт за собой повышенный нагрев электродвигателя и продолжительное действие повышенных динамических усилий на обмотки статора и ротора. В результате повышается вероятность отказа электродвигателя, так как в большинстве случаев (83-94%) отказы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором происходят из-за повреждений изоляции статорной обмотки вследствие её перегрева [6].

Рассмотрим пуск в режиме противовключения электродвигателя ВАСО14-16-24У1 привода АВО газа типа 2АВГ-75 со стеклопластиковым композитным рабочим колесом типа ГАЦ-50-4МЗ. Паспортные данные электродвигателя: номинальная мощность $P_{ном.} = 37$ кВт; частота вращения магнитного поля $n_0 = 250$ мин⁻¹; номинальное напряжение $U_{ном.} = 380$ В; номинальный ток $I_{ном.} = 99,5$ А; номинальное скольжение $s_{ном.} = 0,017$; коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,64$; коэффициент полезного действия КПД = 88,2%; перегрузочная способность $\lambda = M_{макс.}/M_{ном.} = 2,34$. Массивность и специфичная геометрия (отношение диаметра ротора к длине бочки 3:1) придают существенную инерционность ротору, и как следствие, создают тяжёлые условия для двигателя в режиме противовключения.

Вентилятор АВО газа относится к центробежным механизмам. Механические характеристики центробежных механизмов в относительных единицах принято представлять выражением [7]

$$M_c = M_{C0} + (M_H - M_{C0}) \cdot v^\gamma, \quad (2)$$

где M_C – момент сопротивления; M_{C0} – начальный момент сопротивления при $\omega = 0$; M_H – момент нагрузки двигателя при номинальной угловой скорости; $v = \omega/\omega_{ном}$ – относительная частота вращения насоса; ω – угловая скорость; $\omega_{ном}$ – номинальная скорость вращения двигателя; γ – показатель степени.

Значение показателя γ в выражении (2) зависит от физических процессов, приводящих к режиму противодействия. В режимах без противодействия $\gamma = 2$ [7]. В режимах с противодействием для механической характеристики центробежных механизмов нет общепринятого аналитического выражения. В [8] отмечается, что в режимах с противодействием показатель степени может принимать значения 4, 5 и более. В [9] механическая характеристика центробежного механизма в рабочем диапазоне аппроксимируется линейной

зависимостью. В [10] и [11] для центробежного насоса с последовательно установленным обратным клапаном получены выражения для γ в функции величины противодействия и подачи насоса. Однако ни одно из известных уравнений не подходит для пуска вентилятора АВО в условиях противодействия от рециркуляционных потоков воздуха. Объясняется это тем, что во всех известных уравнениях режим противодействия рассматривается при скольжениях от нуля до единицы. В то время как при пуске вентилятора АВО газа противодействие происходит при скольжениях больше единицы.

Для учета противодействия при пуске электродвигателя АВО газа от рециркуляционных потоков воздуха возможны два подхода. В первом их них по аналогии с [10, 11] можно найти выражение для показателя степени γ в функции параметров рециркуляционного потока воздуха. При втором подходе предполагается, что показатель степени γ в уравнении механической характеристики (2) не изменяется, а изменяется момент сопротивления M_{CO} . В основе второго подхода лежит предположение, что для обратного вращения вентилятора зависимость момента его сопротивления от скорости вращения можно принять квадратичной, как и для прямого вращения. Данное предположение основано на том, что момент сопротивления вентилятора и скорость его вращения связаны квадратичным законом независимо от направления вращения вентилятора, то есть независимо от того, является поток воздуха в вентиляторе тормозным или движущим

Назовем момент, созданный на валу электродвигателя рециркуляционным потоком воздуха, моментом сопротивления обратного вращения m_{OBR} . Тогда уравнения моментов при пуске вентилятора в условиях противодействия на лопасти вентилятора от рециркуляционного потока воздуха можно представить в следующем виде:

$$M_{CO} = M_{CT} + M_{OBR} \quad (3)$$

где M_{CT} – момент сопротивления, обусловленный силами трения, и равный начальному моменту сопротивления при пуске из состояния покоя.

Разгон электропривода происходит под действием динамического момента двигателя

$$M_d(\omega) = M(\omega) - M_c(\omega) \quad (4)$$

где $m(\omega)$ – момент развиваемый двигателем.

Для определения момента, развиваемого электродвигателем, применим уточнённую формулу Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + s_k \cdot a)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2 \cdot s_k \cdot a} \quad (5)$$

где $M_{к.}$ – критический момент; $S_{к.}$ – критическое скольжение; a – отношение активных сопротивлений статора и ротора.

Для принятого двигателя: $M_{к.}=3403,16$; $s_{к.}=0,0817$; $a=1,43$.

При этом формула Клосса (5) принимает вид

$$M = \frac{76015}{\frac{0,0817}{s} + \frac{s}{0,0817} + 0,2336} \quad (6)$$

По выражениям (1) – (6) построены представленные на рисунке 4: механические характеристики двигателя (кривая $M_{дв.}$), вентилятора (кривая $M_{с.}$), и совмещённая характеристика электропривода (кривая $M_{дин.}$).

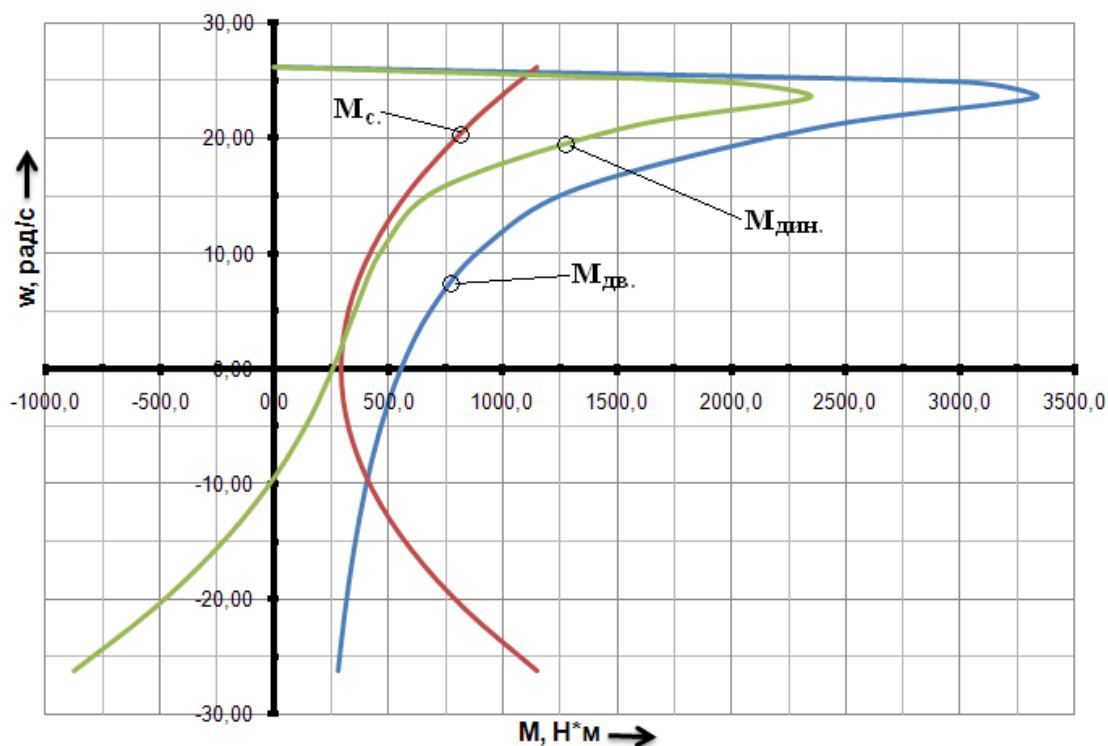


Рисунок 4. Механические характеристики

Механическая характеристика вентилятора при принятых допущениях симметрична относительно оси моментов. Как видно из рисунка 4 в области обратных скоростей вращения момент электродвигателя снижается, а момент вентилятора увеличивается. При этом динамический момент электропривода при некотором значении скорости обратного вращения становится равным нулю. Назовем это значение обратной скорости критическим. На рисунке 4 критическое значение скорости обратного вращения равно 8 рад/с. При скорости вращения ниже 8 рад/с динамический момент становится отрицательным, и пуск двигателя становится невозможным. Включение двигателя в этом случае приведет либо к отключению двигателя тепловой защитой, либо при её несрабатывании – к

выходу двигателя из строя вследствие длительного протеканию пускового тока. Отключение электродвигателя возможно не только при прямом, но и при частотном пуске электропривода АВО газа, что подтверждается результатами экспериментов, приведенных в [12].

Процесс пуска двигателя при скорости обратного вращения ниже критической протекает в два этапа. На первом этапе происходит торможение двигателя. Скорость вращения двигателя при этом снижается от начальной до нуля. На втором этапе происходит разгон двигателя. Для расчета длительности переходных процессов электропривода (торможения и пуска) используем графоаналитический метод площадей, заключающийся в графическом интегрировании уравнения движения, Кривая разгона двигателя при включении двигателя при обратной скорости вращения, равной критическому значению, представлена на рисунке 5.

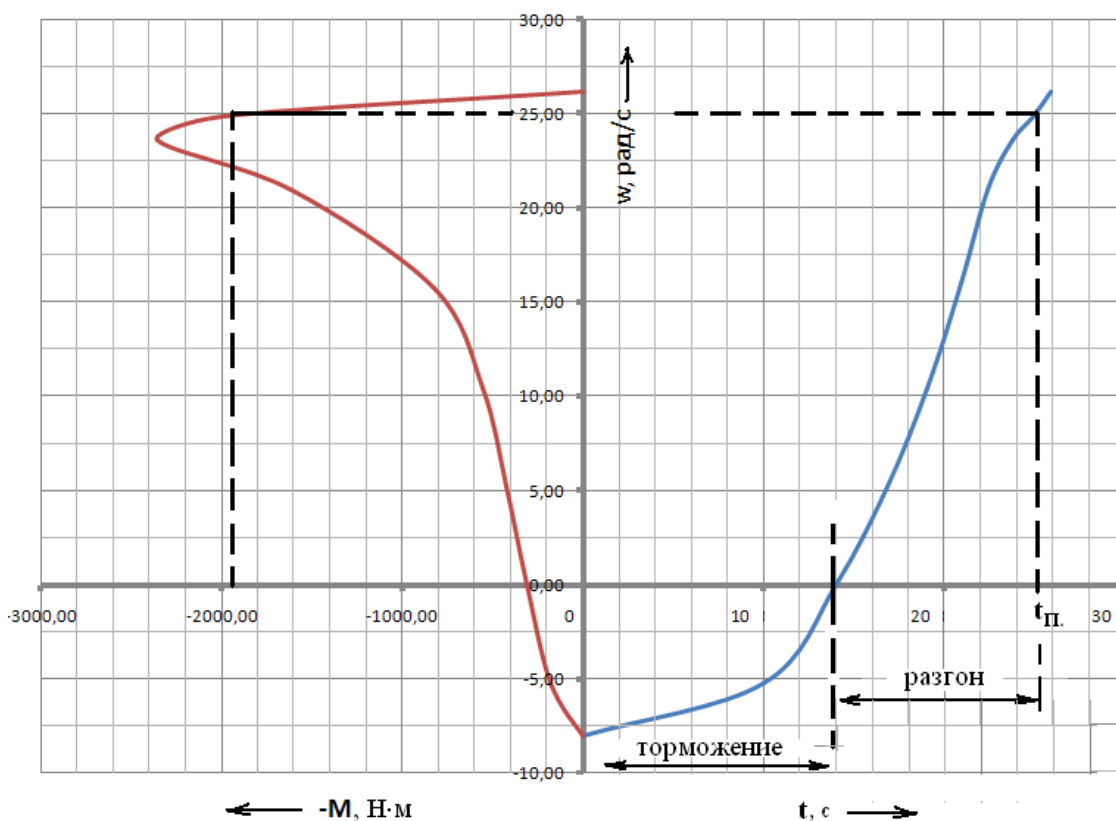


Рисунок 5. График динамического момента и кривая разгона

Как видно из рисунка 5, время торможения при включении двигателя при критическом значении обратной скорости вращения равно 14 с, время разгона от нулевой скорости до установившегося значения равно 11,5 с, а полное время пуска – 24,5 с. При этом по сравнению с пуском из состояния покоя (11,5 с.) время пуска увеличивается более чем в два раза.

При снижении скорости обратного вращения в момент включения электродвигателя время пуска снижается (рисунок 6).

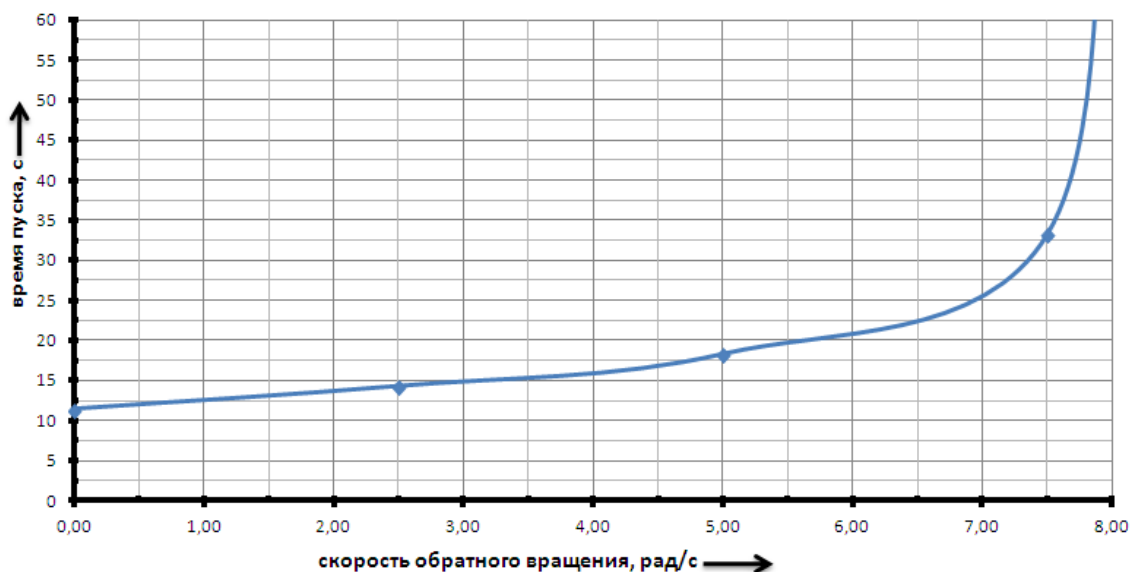


Рисунок 6. Зависимость времени пуска от скорости обратного вращения в момент подачи напряжения

График на рисунке 6 и методику проведенного анализа удобно использовать для оценки успешности пуска электродвигателя АВО газа и определения времени его разгона в зависимости от частоты обратного вращения.

Выводы

1. Наличие обратного вращения вентилятора АВО газа при пуске электродвигателя приводит к переходу двигателя в режим противовключения, существенно увеличивает время разгона, ускоряет тепловой износ и снижает ресурс электродвигателя.

2. При скоростях обратного вращения больше критического значения момент развиваемый электродвигателем недостаточен для преодоления момента сопротивления, что приводит к длительному протеканию пускового тока по обмоткам статора и ротора и отключению двигателя тепловыми защитами, либо к выходу из строя.

3. Для повышения энергетической эффективности и сохранения ресурса электродвигателя актуальной является разработка эффективных способов пуска вентиляторов АВО газа с использованием современных преобразовательных устройств.

Литература

1. Опыт эксплуатации опасных производственных объектов ООО «Газпром добыча Ямбург» в условиях Крайнего Севера /Салихов З.С. и др. // Газовая пром-ть. 2010. №8. С.40-41.
2. Аппараты воздушного охлаждения природного газа типа 2АВГ-75С: инструкция по монтажу и эксплуатации 712.1 ИЭ. Екатеринбург, ОАО «УралХимМаш», 1994. С.16
3. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. 500с.
4. Костенко М.П. Электрические машины. Л.: Гос. энергоиздат, 1949. Спец. ч. С.712
5. Копылов И.П. Электрические машины: учебник. М.: изд-во «Райт», 2012. С.673.
6. Максютов С.Г. Методы и средства температурной диагностики электроприводов в нефтяной и газовой промышленности: автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.09.03. М., 2009. С.29
7. Москаленко В.В. Электрический привод. М.: изд. центр Академия, 2007. 368 с.
8. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.
9. Вайнер И.Г. Математическая модель насоса с регулируемым электроприводом // Промышленная энергетика. 2009. №5. С. 23-28.
10. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М.: Энергия, 1972. 240 с.
11. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. М.: Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
12. Арабский А.К., Талыбов Э.Г., Дяченко И.А. Система автоматического управления температурой на выходе АВО последней ступени компримирования ДКС в условиях Ямбургского НГКМ // Наука и техника в газовой промышленности. 2009. №2. С.17-23.

ANALYSIS OF GAS AIR-COOLER ELECTRIC MOTOR START-UP IN OPPOSITION MODE

V.A. Shabanov

FSBEI Ufa state petroleum technical university

V.V. Pashkin

LLC "Gazprom mining Yamburg", New Urengoy

e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru

Abstract. This article considers the start-up process of the asynchronous fan drive in the automatic system of air-cooling of gas. As there are recirculation streams of air the engine can rotate in the opposite direction before start-up. Thus the start-up of the engine occurs in a back-propel start mode. This article investigates the dependence of the electric motor start-up time on the speed of reverse rotation. It is shown that at turning the engine on, the start-up time can increase more than twice in comparison with the start-up from a standstill state.

Keywords: asynchronous engine, recirculation, start-up time, fan, air streams.

References

1. Experience in the operation of hazardous production facilities "Gazprom dobycha Yamburg" in the Far North / Salikhov Z.S. etc. // Gas industry-Th. 2010. Number 8. P.40-41.
2. Air cooling of natural gas such as 2AVG-75S: user manual for installation and operation 712.I IE. Yekaterinburg, JSC "Uralkhimmash" 1994. P.16
3. Voldek A.I. Electrical Machines. L.: Energy, 1978. S.500
4. Kostenko M.P. Electrical Machines. Special part. AL: State Energy Publishing, 1949. S.712
5. Kopylov I.P. Electrical machines: a textbook. Moscow: Publishing House of the "Wright", 2012. S.673.
6. Maksyutov S.G. Methods and tools for temperature diagnostics drives in the oil and gas industry: author. dis ... cand. tech. sci.: 05.09.03. M., 2009. C.29
7. Moskalenko V.V. Electric. M. Ed. Center Academy, 2007. 368 p.
8. Firago B.I., L.B. Pavlyachik The theory of the drive. Minsk: Tehnoperspektiva, 2007. 585 s.
9. Weiner I.G. Mathematical model of the pump with regulated electric // Industrial Energy. 2009. Number 5. Pp. 23-28.

10. Onishchenko G.B., Yunkov M.G. Electric drive of turbo-mechanisms. Moscow: Energiya, 1972. 240.

11. Handbook of automated electric / Ed. V.A. Eliseev and A.V. Shinyanskogo. Energoatomizdat, Moscow, 1983. 616.

12. Arabic A.K. Talibov E.G., Dyachenko I.A. The automatic temperature control on the output of the last stage ABO compression ABAC in Yamburg gas condensate field // Science and technology in the gas industry. 2009. Number 2. P.17-23.

Сведения об авторах

Шабанов В. А., канд. техн. наук; проф.; заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ.

V.A. Shabanov, cand. tech. sci, prof., head of "Electronics and electrical equipment companies", FSBEI USPTU

e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru

Пашкин В.В., аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ, инженер-энергетик 1 категории Газового промысла №5 филиала «Газопромысловое управление» ООО «Газпром добыча Ямбург», г. Новый Уренгой

V.V. Pashkin, graduate student, "Electronics and electrical equipment companies", FSBEI USPTU, electrical engineer Category 1 gas field № 5 branch "Gas production control" LLC "Gazprom mining Yamburg", New Urengoy

e-mail: V. Pashkin @ ygd.gazprom.ru