

Г.В. КУЛИНЧЕНКО, к.т.н., доцент, СумГУ, Сумы
П.В. ЛЕОНТЬЕВ, аспирант, СумГУ, Сумы
А.Г. КОРОБОВ, студент, СумГУ, Сумы
Д.С. СВИНАРЕНКО, студент, СумГУ, Сумы

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДРОССЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Производится оценка характеристик модуля, обеспечивающего управление режимами дросселирования природного газа. На математической модели модуля управления дроссельной заслонкой на базе асинхронного двигателя проанализированы переходные процессы перемещения дросселирующей заслонки, что позволяет сформулировать требования к параметрам системы электропривода с учетом эксплуатационных характеристик исследуемого объекта.

Ключевые слова: запорная арматура, асинхронный двигатель, крутящий момент, точность позиционирования.

Введение. Дросселирование природного газа, используемое в установках подготовки газа (УППГ) к его транспортированию, определяет условия сепарации тяжелых углеводородов, воды и других примесей. Управление процессами ППГ в большинстве случаев осуществляется отдельными контурами регулирования, при этом "человеческий фактор" существенно ограничивает увеличение эффективности управления. Поэтому повышение эффективности функционирования УППГ, базирующееся на оптимизации параметров используемого электрооборудования и средств управления этим оборудованием, является актуальной задачей.

Решение задач управления процессом сепарации природного газа [1] в дистанционном и автоматическом режимах при непрерывном характере процесса осложняется воздействием многофакторных возмущений. Специфика объекта УППГ предполагает использование средств противоаварийной защиты технологического оборудования (электроприводных клапанов и задвижек), которое классифицируется как запорно-регулирующая арматура (ЗРА), а также специальных мер по обеспечению необходимых параметров надежности.

Поскольку положение дросселирующей заслонки определяет основные параметры процесса сепарации природного газа, то эффективность управления этим процессом будет зависеть от качества управления электроприводом регулируемого дросселирующего устройства (ДУ).

Среди основных параметров, характеризующих электропривод ЗРА, выделяют крутящий момент и рабочее время хода. Надежность регулируемого дросселя оценивается числом рабочих циклов с номинальным крутящим моментом [2]. Развитие микропроцессорных средств и силовой электроники позволяет расширить число критериев оценки эффективности электропривода ЗРА и учитывать степень адаптации устройства к обслуживаемому процессу.

В связи с особенностями протекания процессов сепарации природного газа [3], реализация алгоритмов регулирования параметрами этих процессов усложняется, соответственно повышаются требования к ДУ, регулирующему давление в газовой магистрали. Система управления ДУ должна обеспечивать формирование задания на скорость и момент в зависимости от внешних сигналов и условий, электромеханическое преобразование энергии в двигателе с максимальной степенью эффективности, формирование защит двигателя, преобразователя и механизма. При этом помимо снижения инерционности регулятора требуется обеспечить необходимую точность позиционирования задвижки ДУ.

Выполнение этих требований становится возможным при использовании адаптационных алгоритмов, а также регуляторов с нечеткой логикой. Выбор направления для решения задач синтеза регулятора зависит от результатов оценки динамических и конструктивных параметров исследуемого объекта.

Постановка задачи исследований. При решении задачи управления процессами в УППГ основным вопросом остается оценка параметров контура регулирования давления газа в магистрали, которое определяется положением дроссельной задвижки. Точность позиционирования при максимальном быстродействии управления газовым дросселем определяет результат регулирования в условиях изменяющихся флуктуаций давления газа, поступающего со скважины.

Учет характера протекания газа через дроссельное устройство показывает, что в различных положениях распределение потока над диском задвижки и под ним неодинаково. Из-за неравномерного распределения скоростей по сечению потока, зависимость крутящего момента от угла поворота заслонки имеет нелинейный характер [4]. В случае недостаточной мощности электропривода при достижении определенного перепада давления вращающий момент задвижки может оказаться больше, чем момент, создаваемый приводом. В этом случае задвижка становится неуправляемой, ее "заклинивает", и

осуществление процесса регулирования невозможно. В таких случаях приходится искусственным путем снижать давление до задвижки, чтобы обеспечить возврат к нормальной работе. Вследствие различия моментов, действующих на задвижку при разных углах поворота, допустимый перепад Δp различен для разных углов поворота φ .

Таким образом, при решении задачи управления газовым дросселем целесообразно использовать адаптирующиеся алгоритмы регулирования по внутреннему (φ) и внешнему (Δp) контурам на базе мощного редукторного электропривода.

Для выполнения сформулированной задачи необходимы научно-исследовательские работы, обеспечивающие получение экспериментальных данных, которые позволят сформулировать требования к параметрам аппаратно-программного блока электропривода процесса очистки природного газа.

Предметом исследования является оценка характеристик исполнительного механизма системы управления процессом низкотемпературной сепарации, в состав которого входит микропроцессорный модуль электропривода и управляемая задвижка.

Актуальность исследований заключается в представлении исследуемого объекта мехатронным модулем [5], что позволяет учесть влияние нелинейного характера механической нагрузки на электрические параметры и режимы проектируемого электропривода.

Цель работы. Целью данной работы является разработка математической модели ДУ, отражающей взаимосвязь с нелинейными параметрами механической нагрузки для исследования его динамики и оценки влияния различных параметров на динамические характеристики ДУ УППГ. При этом главным вопросом исследований является выяснение степени влияния нагрузки параметры электропривода.

Для достижения поставленной цели проводится анализ функционирования электропривода устройства в составе мехатронного модуля. Полное математическое описание должно учитывать нелинейный характер действующих сил, при этом возможные границы линеаризации можно определить в результате анализа экспериментальных данных функционирующей адекватной модели мехатронного модуля ДУ.

Разработка математической модели. Структурная схема ДУ УППГ представлена на рис. 1. Она включает блок электропривода и регулируемый газовый дроссель. В зависимости от давления, обеспечивающего требуемый режим сепарации природного газа, устанавливается соответствующее положение дроссельной задвижки, которое контролируется датчиками.

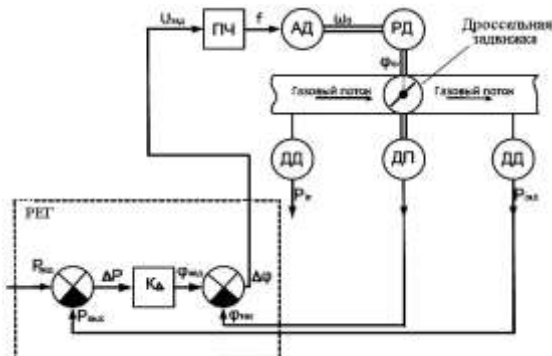


Рис. 1 – Структурная схема ДУ УППГ

Уровень сигнала $P_{зад}$, соответствующий требуемому режиму сепарации, задается оператором УППГ. В результате сравнения заданного давления с текущим определяется необходимое положение задвижки ДУ, и в качестве управляющего сигнала выдается на блок электропривода. При отклонении положения задвижки от требуемого, сигнал ошибки, поступающий на частотный преобразователь (ПЧ), через асинхронный двигатель (АД), соединенный валом через редуктор (РД) с задвижкой, корректирует ее положение.

На данном этапе не ставится задача синтеза регулятора дросселирующего устройства (РЕГ), поэтому исследование характеристик модели проводится подачей управляющих сигналов $U_{зад}$, которые соответствуют требуемым углам поворота задвижки ДУ.

Для построения математической модели (ММ) мехатронного модуля рассмотрим основные соотношения, описывающие взаимосвязь элементов модуля.

Газовый дроссель. В общем случае при турбулентном течении газа соотношение между расходом газа Q и перепадом давления ΔP представляется в виде [6]:

$$Q = \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

где ε – коэффициент расхода; ρ – плотность жидкости; A – площадь сечения отверстия дросселя.

Соответственно, выходной параметр ΔP дросселя через управляющий параметр A представляется:

$$\Delta P = \frac{k_d}{A^2} \cdot Q^2$$

где $k_d = \frac{\rho}{2\varepsilon^2}$ – константа дросселя.

Динамические параметры дроссельной задвижки можно описать операторной передаточной функцией аperiodического звена [7]:

$$W_d(s) = \frac{1}{T_d s + 1} \quad (2)$$

где $T_d = \frac{V}{Q}$ – постоянная времени, зависящая от объема дросселя V и расхода газа Q .

Приведенные соотношения (1), (2) дают основание представить структурную схему модели дроссельной задвижки, управляемой по параметру A – площади сечения отверстия дросселя в виде, показанном на рис. 2.

Значение угла поворота задвижки φ , которое является выходным сигналом в модуле электропривода, преобразуется во входной управляющий сигнал A в блоке преобразования модели k_A .

Таким образом, в блоке ММ дроссельной задвижки отображается процесс изменения давления в газовой магистрали $P_{\text{зад}}$ в результате управления углом поворота задвижки φ от блока электропривода.

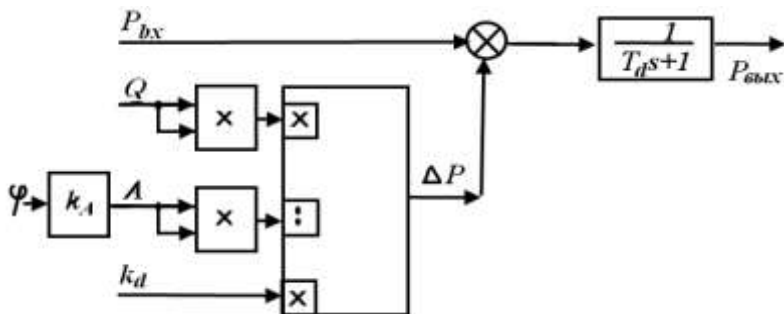


Рис. 2 – Структурная схема моделирования дросселя

Мехатронный модуль. Функционирование мехатронного модуля ДУ можно описать в результате представления этого объекта двухмассовой системой. В рассматриваемом модуле механический момент, развиваемый асинхронным двигателем, изменяется под действием нелинейной нагрузки и потерь на вязкое трение. Динамические свойства в значительной степени определяются жесткостью упругих связей обеих масс системы.

Воспользовавшись системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_a - M_{12} - M_{c1} \\ \frac{dM_r}{dt} = c_{\varphi 12} (\omega_1 - \omega_2) \\ M_v = b_{v12} (\omega_1 - \omega_2) \\ M_{12} = M_r + M_v \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_{c2} - M_Z \\ \frac{d\varphi}{dt} = k_Z * \omega_2 \end{array} \right.$$

где J_1, J_2 – моменты инерции масс модуля; ω_1, ω_2 – скорости вращения масс; M_a – электромагнитный вращающий момент АД; M_{12} – момент взаимодействия масс; M_{c1}, M_{c2} – моменты смешанного трения на валу масс; M_r – упругий момент; c_{φ} – коэффициент угловой жесткости; M_v – момент внутреннего трения; b_{12} – коэффициент внутреннего трения; M_Z – момент составляющей веса задвижки и давления газа; φ – угол поворота вала задвижки;

получим операторную схему моделирования модуля, представленную на рис. 3, где s – оператор Лапласа.

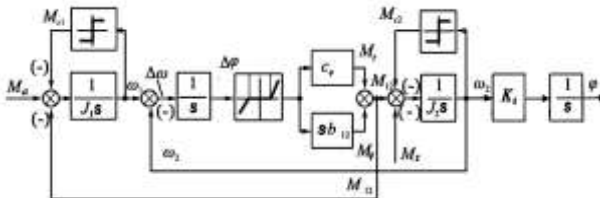


Рис. 3 – Операторная схема моделирования мехатронного модуля

Наличие зазора в передаточном механизме модуля (редукторе) представляется типовой нелинейностью – звена с зоной нечувствительности $\Delta\varphi$. Сухое трение в модели тоже описывается нелинейными моментами, не зависящими от модуля скорости вращения.

Разработанная модель мехатронного модуля ДУ (рис. 4) реализована в программной среде Matlab Simulink [8]. В свою очередь структура модели в среде программирования представляется состоящей из механического блока и блока симуляции режимов работы АД.

Блок симуляции режимов работы АД строится на основе управляемого широтно-импульсного модулятора (на схеме не показан). Это позволяет реализовать микропроцессорное программное управление режимами работы АД, что важно при работе на малых скоростях его

вращения, в режимах пусков/остановок, особенно в условиях воздействия различных возмущений процесса дросселирования.

Результаты моделирования. Для реализации имитационной модели использовались численные значения параметров устройств, входящих в ММ мехатронного модуля. Характеристики АД АИР180S4, предназначенного для вращения задвижки: мощность – 22 кВт, номинальная скорость вращения $\omega_0 = 1470$ об/мин, крутящий момент $M_a = 143$ Н·м, момент инерции $J_1 = 0,07$ Н·м², передаточное число редуктора – $i = 45$. Остальные параметры получены из паспортных данных на клиновую задвижку 30с976 нж.

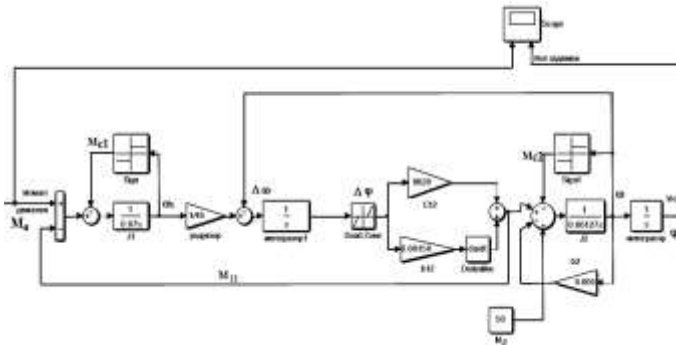


Рис. 4 – Схема модели мехатронного модуля в среде Matlab Simulink

Динамические характеристики мехатронного модуля можно проанализировать по осциллограммам процесса управления углом поворота вала задвижки, полученных при различных управляющих воздействиях на вращающий момент АД.

На рис. 5 отражено изменение угла поворота задвижки при управляющем воздействии, которое имитирует управление при широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На рис. 6 показано характер изменения угла поворота при плавном торможении АД. На рис. 7 иллюстрируются изменения угла поворота при случайных изменениях управляющего сигнала, что соответствует режиму регулирования положения задвижки в условиях действия возмущений и помех процесса дросселирования.

В результате обработки полученных данных получены постоянные времени процессов регулирования мехатронного модуля, что позволяет оценить степень влияния постоянной времени газового дросселя ДУ. Поскольку постоянные времени мехатронного модуля на порядок превышают постоянную времени газового дросселя, то этой постоянной при синтезе регулятора ДУ можно пренебречь.

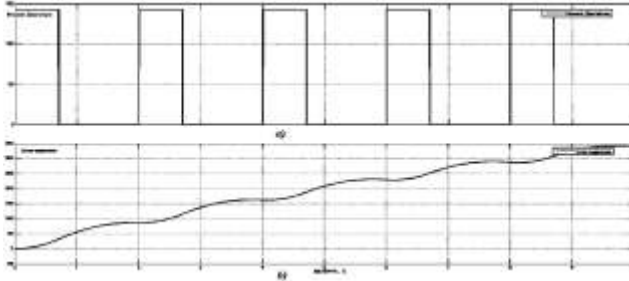


Рис. 5 – Осциллограмма изменения угла поворота задвижки: a – изменение управляющего момента АД; b – изменение угла поворота.

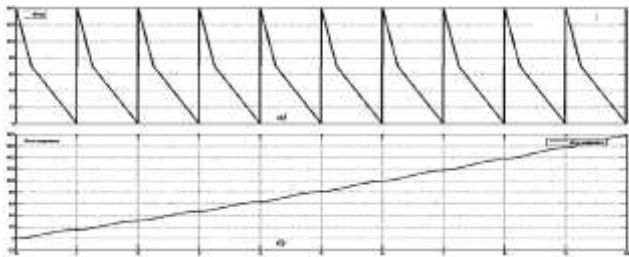


Рис. 6 – Осциллограмма изменения угла поворота задвижки: a – изменение управляющего момента АД; b – изменение угла поворота

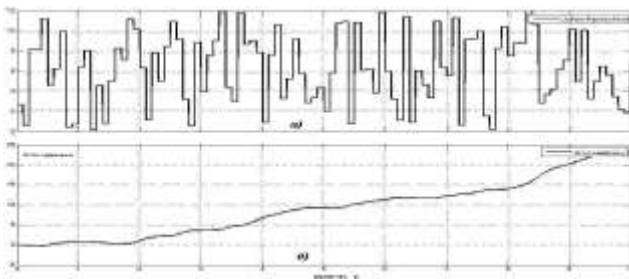


Рис. 7 – Осциллограмма изменения угла поворота задвижки: a – изменение управляющего момента АД; b – изменение угла поворота

Вывод. На основе математического описания процесса дросселирования природного газа получена модель мехатронного модуля, проведена оценка адекватности этой модели. Полученные результаты позволяют сформировать технические требования к параметрам регулятора электропривода системы, обеспечивающей технические требования режимов дросселирования в условиях действия различных возмущений.

Список литературы: 1. Кулінченко Г.В., Леонтьев П.В. Завдання оптимального керування установкою комплексної переробки природного газу. XII Міжнародна науково-технічна конференція "Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів". – Кременчук. – 2013. – С. 23-24. 2. Гуревич Д.Ф., Заринский О.Н., Косых С.И. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением. Л.: "Машиностроение", Ленингр. отд-ние, 1982. – 320 с. 3. Кулінченко Г.В., Леонтьев П.В., Ляпощенко О.О. Ідентифікація моделі процесу низькотемпературної сепарації природного газу // "Комп'ютерно інтегровані технології: освіта, наука, виробництво". Луцьк. – 2014. – Випуск 14. – С. 143-154. 4. Зайцев Л.Л. Регулирование режимов работы магистральных нефтепроводов // М.: "Недра", 1982. – 240 с. 5. Лурье З.Я., Братута Э.Г., Федоренко И.М. Синтез мехатронного гидроагрегата, подверженного переменной нагрузке // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Прикладная механика. – 2010. – № 1/6 (43). – С.23-26. 6. Баумта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с. 7. Тараненко Б.Ф. Автоматическое управление газопромисловыми объектами // Недра. – 1976. – 217 с. 8. Герман-Галкин. С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век. – 2008. – 368 с.

Bibliografy (transliterated): 1. Kulinchenko G.V., Leont'ev P.V. "Zavdannja optimal'nogo keruvannja ustanovkoju kompleksnoї pererobki prirodnogo gazu". XII Mizhnarodna naukovotekhnichna konferentsiya "Fizychni protsesy ta polya tekhnichnykh i biolohichnykh obyektiv". Kremenchug. 2013. 23-24. Print. 2. Gurevich D.F., Zarinjskij O.N., Kosyh S.I. *Truboprovodnaja armatura s avtomaticheskim upravleniem*. Leningrad.: Mashinostroenie. 1982. Print. 3. Kulinchenko H.V., Leont'yev P.V., Lyaposhchenko O.O. "Identyfikatsiya modeli protsesu nyz'kotemperaturnoyi separatsiyi pryrodnogo hazu". *Komp'yuterno intehrovani tekhnolohiyi: osvita, nauka, vyrobnystvo*. Vol. 14. Lutsk. 2014. 143-154. Print. 4. Zajcev L.L. *Regulirovaniye rezhimov raboty magistr'al'nykh nefteprovodov*. Moscow: Nedra. 1982. Print. 5. Lu'e Z.Ja., Bratuta Je.G., Fedorenko I.M. "Sintez mehatronnogo gidroagregata, podverzhennogo peremennoj nagruzke". *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij. Prikladnaja mehanika*. 1/6 (43) (2010). 23-26. Print. 6. Bashta T.M. *Gidropryvod i gidropnevmoavtomatika*. – Moscow: Mashinostroenie. 1972. Print. 7. Taranenko B.F. *Avtomaticheskoe upravlenie gazopromyslovymi ob'ektami*. Moscow: Nedra. 1976. Print. 8. German-Galkin. S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovaniye mehatronnykh sistem na PK*. St. Petersburg: KORONA-Vek. 2008. Print.

Поступила (received) 09.10.2014



Кулінченко Георгій Васильевич, доцент, кандидат технічних наук. Захитил диплом радіоінженера по спеціальності "Радіозлектронні пристрої" в 1972 г., дисертацію кандидата технічних наук в Харківському авіаційному інституті по спеціальності "Теорія, системи і пристрої передачі інформації по каналах святи" в 1988 г. Доцент кафедри комп'ютерних наук факультета Електроніки і інформаційних технологій Сумського державного університету. Научні інтереси пов'язані з мікропроцесорними системами управління різними технологічними процесами, їх моделюванням, а також автоматизацією експериментальних досліджень. Автор багатьох наукових статей.



Леонтьев Петр Владимирович, аспірант кафедри комп'ютерних наук факультета Електроніки і інформаційних технологій Сумського державного університету. Захитил диплом магістра по спеціальності "Комп'ютеризовані системи управління і автоматика" в 2013 г. Научні інтереси пов'язані з системами управління різними технологічними процесами, їх моделюванням.