

*Г.В. КУЛИНЧЕНКО*, канд. техн. наук, доц., СумГУ, Сумы

*В.А. БАГУТА*, аспирант, СумГУ, Сумы

*А.Г. КОРОБОВ*, студент, СумГУ, Сумы

## **ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ НА БАЗЕ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Изложен подход к построению системы, обеспечивающей дозирование полимерной композиции при отливе полимерной пленки на подложку. Математическая модель канала дозирования на базе шагового двигателя представляется мехатронным модулем, что позволяет сформулировать требования к регулятору системы электропривода с учетом механических характеристик объекта управления.

**Ключевые слова:** мехатронный модуль, шаговый двигатель, управление электроприводом, полимерная пленка.

**Введение.** Успешность реализации заданных параметров системы управления электроприводом процесса отлива полимерных пленок [1] зависит от результатов моделирования системы дозирования полимерной композиции. Помимо решения задач разработки регулятора, обеспечивающего необходимые параметры процесса подачи полимерной композиции, при модернизации оборудования отлива полимерных пленок приходится оптимизировать конструктивно-технологические параметры этого оборудования. Подход к оптимизации параметров технологического оборудования, основанный на представлении объекта управления (ОУ) в виде мехатронного агрегата [2], позволяет сформулировать требования к параметрам электропривода дозирования на основании обобщенного критерия управления, учитывающего взаимовлияние технологических параметров, что позволяет повышать эффективность работы установки отлива пленок без усложнения системы управления электроприводом.

В процессе отлива пленок выдвигаются достаточно жесткие требования к стабильности дозирования, так как отклонения подачи композиции в фильеру приводят к нарушению физико-механических свойств полимерной пленки.

Специфичный состав полимерной композиции не позволяет в качестве аппарата привода использовать двигатель постоянного тока. Построение электропривода дозирования малых расходов нитроцеллюлозных композиций на базе асинхронного двигателя также вызыва-

ет затруднения, связанные с нестационарностью объекта и инерционными запаздываниями в нем.

Альтернативой известным аппаратам электропривода является шаговый двигатель (ШД), который в последнее время получает все большее распространение в системах управления и регулирования вследствие имеющихся возможностей реализации микропроцессорных систем управления.

Современные подходы к дозированию малых расходов предполагают отказ от пассивных методов стабилизации заданных параметров. Более перспективными представляются активные методы стабилизации, которые позволяют адаптироваться к изменяющимся параметрам процесса и получать пленки с заданными физико-механическими параметрами.

**Постановка задачи исследований.** При рассмотрении задачи автоматизации процесса непрерывного дозирования полимерной жидкости в установленном технологическим регламентом количестве, главным вопросом остается обеспечение равномерности течения композиции при заданной динамике процесса. Не менее важным параметром системы дозирования является точность регулирования, поскольку от нее зависит качество отливаемой пленки.

Объемный насос-дозатор, применяемый в рассматриваемом ОУ, работает при значительном противодействии, которое возникает при течении композиции в фильтре [3]. Помимо необходимости получения требуемого давления, которое обеспечивается вращающим моментом используемого ШД, в процессе дозирования необходимо минимизировать воздействие пульсаций шестеренного насоса-дозатора.

В настоящее время расчет и конструирование дозирующих устройств базируется, в основном, на использовании детерминированных математических моделей, в которых ОУ не рассматривается в целом как сложная физико-механическая система. Соответственно, затруднительно оценить взаимосвязь режимов работы дозирующих устройств с характеристиками потока полимерной композиции в процессе отлива пленки.

Предметом исследования является оценка характеристик ОУ, в состав которого входит ШД.

*Актуальность исследований* определяется работами, в которых ШД используется в основном как позиционирующее устройство, которое обеспечивает требуемую точность перемещений и способность поддерживать стабильный механический момент.

Для процесса отлива полимерных пленок характерно изменение режимов дозирования, связанных с параметрами перемещения подложки, на которую отливается пленка. Несмотря на утверждения, что в системах, использующих ШД, нет необходимости в применении датчиков обратной связи, в мехатронных модулях при регулировании частоты вращения ШД обратная связь позволяет исключить режимы работы с критическими моментами ШД.

**Цель работы.** Сформулировать требования к регулятору системы электропривода системы дозирования с учетом механических характеристик ОУ, который обеспечит условия равномерного истечения раствора полимера из фильеры на подложку.

Поставленная задача решается на основе результатов моделирования, в процессе которого ОУ представляется набором передаточных функций звеньев системы. Такой подход позволяет в процессе моделирования решать задачу параметрической оптимизации объекта и исследовать различные режимы объекта, вплоть до подбора физико-химических параметров используемой композиции.

Дополнительной целью исследований является отработка методов управления режимами ШД, что позволит сократить затраты на разработку микроконтроллерной системы управления ШД.

**Разработка математической модели.** Структурная схема модуля дозирования (МД) полимерной композиции представлена на рис. 1.

Частота управляющих импульсов  $f_{ц}$ , поступающих с микроконтроллера, задает скорость вращения  $\omega$  НШ, соответственно, давление композиции  $P$  в трубопроводе и фильере, которое определяет значение расхода композиции  $Q$  через фильеру. От этого расхода и размера щели фильеры зависит толщина отливаемой полимерной пленки.

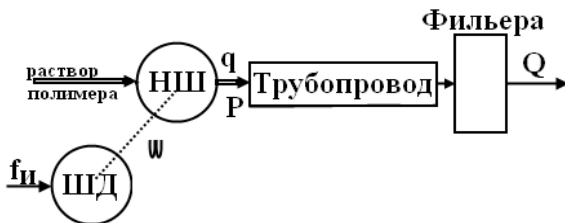


Рис.1 – Структурная схема МД.

Электромеханический модуль состоит из следующих функциональных узлов:

- приводной ШД;

- шестеренный насос (НШ);
- трубопровод;
- фильтра;

Таким образом для построения математической модели (ММ) рассматриваемого МД опишем передаточные функции узлов системы.

*Шаговый двигатель.* В общем случае функционирование ШД, представляющий собою дискретный синхронный двигатель, описывается уравнениями[4]:

$$J * \frac{d^2 \theta_p}{dt^2} + M_c = M_d ;$$

$$i_k R_k + \frac{d \psi_k}{dt} = U_k , \quad (1)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции, приведенный к валу ШД;  $M_c$  – суммарный момент нагрузки;  $M_d$  – электромагнитный вращающий момент ШД;  $\theta_p$  – угол поворота ротора;  $U_k, i_k, R_k, \psi_k$  – мгновенные значений напряжений, токов, электрического сопротивления и потокосцеплений  $k$ -го контура

Аналитически решить уравнения (1) проблематично, однако при необходимых упрощениях для конкретных конструкций ШД эти уравнения решаются численно, что и позволяет моделировать работу ШД в требуемых режимах. Учитывая периодичность изменения электромагнитного момента ШД  $M_d$  от угла поворота ротора, этот момент в результате разложения в ряд может быть представлен:

$$M_d = M_m \times \sin \gamma , \quad (2)$$

где  $M_m$  – амплитуда электрического момента, а угол  $\gamma$  определяет угловое рассогласование ротора и статора электрических радианах.

Рассматривая значения момента ШД в различных режимах его работы обычно предполагают, что время достижения токами обмоток  $i_k$  установившихся значений много меньше, чем время отработки шага, поэтому в пределах шага токи можно считать постоянными. Однако при высоких частотах коммутации токи в обмотках могут не достигать установившихся значений, вследствие чего электромагнитный момент  $M_d$  ШД уменьшается. Чтобы обеспечить работоспособность системы дозирования, выбирается ШД с моментом, превосходящим момент нагрузки  $M_c$  во всех режимах работы модуля.

Уравнения движения ротора ШД, в которые входят электромеханические параметры ШД, позволяют разработать модель[5], предназначенную для изучения и прогнозирования динамических характери-

стик разрабатываемых приводов, в то же время вопрос влияния нелинейной нагрузки на эти характеристики остается открытым.

Помимо упомянутой, известны и другие модели ШД, в частности в среде MathCad [6], MATLAB [7], которые достаточно полно отображают электромагнитные и электромеханические процессы, при обработке перемещений ротора ШД, колебания скорости при этом не рассматриваются.

Тем не менее, во многих практических случаях электромеханическая постоянная времени объекта существенно превышает электромагнитную постоянную времени ШД. Анализ движения ротора с изменяющейся нелинейной нагрузкой показывает, что уравнения электрического равновесия ШД незначительно увеличивают точность моделирования [7], зато усложняют громоздкость и сложность модели. Поэтому при моделировании работы мехатронных модулей в большинстве случаев ограничиваются исследованием электромеханической части системы.

С учетом составляющих момента нагрузки  $M_c$ , которыми являются момент сухого  $M_f$  и вязкого трения  $D$ , вращательное движение ротора двигателя по переменной угла поворота  $\Theta_p$  описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка вида [8]:

$$J * \frac{d^2 \theta_p}{dt^2} + D * d\theta_p / dt + M_f = M_d - M_C . \quad (3)$$

Учитывая, что угол поворота ШД  $\Theta_p$  – интеграл от скорости вращения  $\omega$ , уравнение (3) в операторной форме записи представляется:

$$J * s * \omega + D * \omega + M_f = M_d - M_C . \quad (4)$$

где  $s$  – оператор Лапласа.

Тогда на основании уравнений (2), (4) схему моделирования ШД можно представить структурной схемой, приведенной на рис. 2. Эта схема представляется состоящей из двух блоков

– блока формирования крутящего момента (БФМ) и блока формирования угла (БФУ) поворота ротора (скорости вращения).

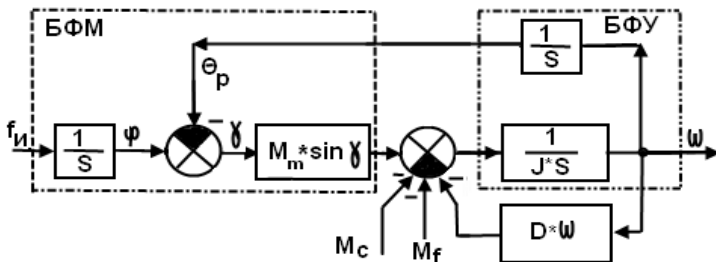


Рис.2 – Структурная схема моделирования ШД.

Результирующий момент, который вращает нагрузку с моментом инерции  $J$ , учитывает воздействие момента нагрузки  $M_c$  и момента сухого трения  $M_f$ , который оценивается через коэффициент трения. Величина вязкого трения пропорционально коэффициенту  $D$  зависит от скорости вращения  $\omega$ , которая рассчитывается в БФУ.

Особенностью реализации модели ШД в среде Matlab Simulink является построение схемы управления частотой коммутации  $f_{и}$ , которая обеспечивает моделирование разных режимов функционирования, соответственно оценить адекватность модели. Практическая реализация таких схем [9] на программируемых микроконтроллерах особых затруднений не вызывает.

*Шестеренный насос.* Передаточную функцию (рис.3) НШ определим, воспользовавшись классическим уравнением подачи (расхода  $Q_n$ ) [10], в предположении, что объемные потери насоса незначительны, в сравнении с подачей насоса

$$\omega(s) \rightarrow \left[ \frac{V_n}{2\pi} \right] Q_n(s)$$

Рис.3 – Передаточная функция НШ.

$$Q_n = V_n * \omega, \quad (5)$$

где  $V_n$  – рабочий объем насоса, определяемый его паспортными характеристиками и зависящий от геометрических размеров НШ и числа зубцов его шестерен.

Соответственно момент сопротивления, создаваемый НШ, как нагрузка для ШД, зависит от  $V_n$  и давления  $P$  в трубопроводе:

$$M_c = \frac{V_n * P}{2\pi}. \quad (6)$$

*Трубопровод.* Характер течения полимерной композиции, которая является вязкой неньютоновской жидкостью, в трубопроводе, соединяющем НШ с фильерой, может быть представлен законом Гагена-Пуазейля. Изменение расхода жидкости зависит от реологических характеристик жидкости и гидравлических параметров трубопровода:

$$dQ = \frac{\pi r^4}{8\mu} * \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} * dx, \quad (7)$$

где  $r$  – радиус трубопровода;  $p$  – давление;  $\mu$  – вязкость жидкости;  $x$  – элемент длины  $L$  трубопровода

Учитывая, что давление  $p$  вследствие течения композиции в трубопроводе изменяется и во времени согласно уравнению,

$$dQ = \pi r^2 * \frac{\partial p}{\partial t} * dx$$

получаем уравнение длинной линии в частных производных, которое после использования преобразования Лапласа представляется соотношением:

$$\frac{d^2 P(s)}{dx^2} - \frac{s}{c} * P(s) = 0, \quad (8)$$

где константа  $c$

$$c = \frac{r^2}{8\mu}$$

Решение уравнения (8) позволяет получить передаточную функцию трубопровода, которая при незначительных гидравлических потерях имеет вид [11]:

$$W(s) = \exp(-\tau * s), \quad (9)$$

в котором  $\tau$  – постоянная времени транспортного запаздывания зависит от длины трубопровода  $L$  и перепада давления  $\Delta p$  на его концах:

$$\tau = \frac{1}{c} * \frac{L^2}{\Delta P} = \frac{8\mu}{r^2} * \frac{L^2}{\Delta P}, \quad (10)$$

Откуда видно, что транспортное запаздывание в трубопроводе в значительной мере определяется вязкостью полимерной композиции  $\mu$ .

Кроме вязкости на динамику процесса дозирования, величину расхода в трубопроводе объемом  $V_{тр}$  оказывают упругие свойства композиции, которые оцениваются модулем объемной упругости  $E_n$ , который показывает, как изменяется объем жидкости при воздействии давления:

$$Q_n - Q_\phi = \frac{V_{\text{тр}}}{E_\Pi} * \frac{dP}{dt}, \quad (11)$$

где  $Q_\phi$  – величина расхода композиции в фильере.

Таким образом передаточная функция трубопровода – входной параметр расход НШ  $Q_n$ , выходной – давление  $P$  на входе в фильеру, имеет вид, приведенный на рис. 4.

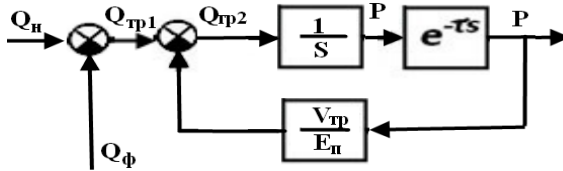


Рис.4 – Передаточная функция трубопровода.

Давление жидкости на выходе трубопровода представляется интегралом от изменения расхода, с запаздыванием на величину транспортной задержки.

*Фильера.* При истечении жидкости через щель фильеры, представляющей собой гидравлическое сопротивление, расход можно определить по соотношению [12]:

$$Q_\phi = \varepsilon * A * \sqrt{\frac{2P}{\rho}}, \quad (12)$$

где  $A$  – эффективная площадь щели;  $P$  – давление на входе в фильеру;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\varepsilon$  – коэффициент расхода, характеризующий процесс течения жидкости по каналу фильеры.

Характеристика течения определяется числом Рейнольдса, которое в свою очередь, также зависит от давления в канале фильеры. В исследуемом диапазоне давлений композиции в фильере коэффициент расхода изменяется в пределах 0,6...0,7.

**Результаты моделирования.** В соответствии со структурной схемой МД полимерной композиции на базе описанных уравнений разработана операторная схема моделирования, представленная на рис. 5.



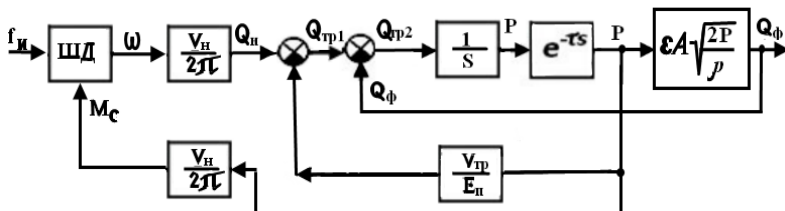


Рис.5 – Схема модели мехатронного модуля дозирования.

Эта схема реализована в среде Matlab Simulink, фрагмент реализации модели, изображенный на рис. 6, позволяет эмулировать различные режимы дозирования при изменении видов сигналов генератора.

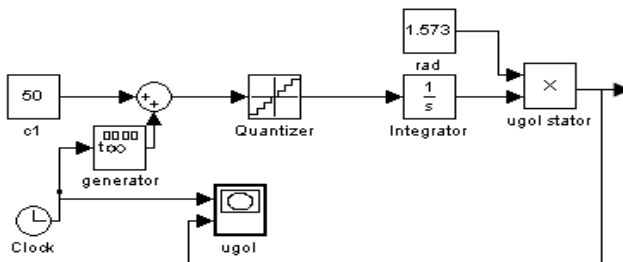


Рис.6 – Схема эмулятора мехатронного модуля дозирования.

Переходные характеристики, полученные при моделировании, сравнивались с осциллограммами разгонных характеристик, полученными на установке дозирования экспериментально (рис. 7). Результаты эксперимента подтверждают адекватность полученной модели МД

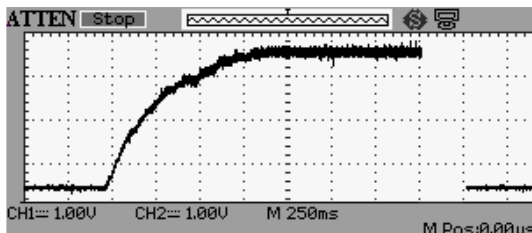


Рис.7 – Осциллограмма переходного процесса модуля дозирования.

**Вывод.** На основе математического описания процесса дозирования полимерных композиций получена модель мехатронного модуля,

проведена оцінка адекватності цієї моделі. Отримані результати дозволяють сформувати технічні вимоги до параметрам регулятора електропривода системи дозування, забезпечуючої рівномірність подачі полімера із фільтри на підложку в умовах дійства різних впливів.

**Список літератури.** 1. Багута В.А., Кулинченко Г.В. Задачі управління в процесі отлива плінок. ІХ Всеукраїнська науково-технічна конференція "Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів". – Кременчук. – 2010. – С. 9-10. 2. Лур'є З.Я., Братута Е.Г., Федоренко І.М. Синтез мехатронного гідроагрегата, підв'язаного до змінної навантаження//Всхідно-європейський журнал передових технологій. Прикладна механіка. – 2010. – № 1/6 (43). – С.23-26. 3. Багута В.А., Кулинченко Г.В. Математичне моделювання течія полімера в каналі фільтри з урахування його пристенного ковзання // "Радіоелектронні і комп'ютерні системи". – 2012. – № 4(56). – С. 140-144. 4. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовський В.В. Управління електроприводами. – Л.: "Енергоіздат" Ленінградське отд.-ние., 1982. – 392 с. 5. Morar A. Stepper Motor Model for Dynamic Simulation // IEEE Transc. Automatic Control. – 2003. – Vol. 44. № 2. – PP. 117-122. 6. Кухарчук В.В., Усов В.В. Математичні моделі крокового двигуна як об'єкта контролю // Вісник КДПУ. – 2006. – Вип. 3(39) част. 1. – С.106-109. 7. Денисов В.А., Жуков А.В. Математичне моделювання роботи шагового двигача в складі мехатронного модуля компенсації зносу режущого інструмента // Известия Самарського наукового центру Російської академії наук. – 2012. – Т. 14. – № 6. – С. 54-58. 8. Івоботенко Б.А. і др. Дискретний електропривід з шаговими двигачами. Під ред. Чиликіна М.Г. – М.: "Енергія". – 1971. – 624 с. 9. Чиа-Вэй Шэу. Управління швидкістю шагових двигачів // Компоненти і технології. – 2004. – № 9. – С. 136-139. 10. Юдин Е.М. Шестеренні насоси. – М.: "Машинобудування". – 1964. – 232 с. 11. Попов Е.П. Теорія лінійних систем автоматичного регулювання і управління. – М.: Наука. Гл. ред. фіз-мат. лит. 1989. – 304 с. 12. Винников В.А., Каркашадзе Г.Г. Гідромеханіка. – М.: Видавництво МГУ. – 2003. – 302 с.

*Поступила в редакцію 08.10.2013*

#### **УДК 621.255.2001.24**

**Оцінка характеристик мехатронного модуля на базі шагового двигача / Кулинченко Г.В., Багута В.А., Коробов А.Г. // Вісник НТУ "ХП". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХП", 2013. – № 51 (1024). – С. 43-53. Бібліогр.: 12 назв.**

Викладено підхід до побудови системи, що забезпечує дозування полімерної композиції під час відливу полімерної плівки на підкладку. Математична модель каналу дозування на базі крокового двигуна представлена мехат-

ронним модулем, що дозволяє сформулювати вимоги до регулятора системи електроприводу з урахуванням механічних характеристик об'єкта керування.

**Ключові слова:** мехатронний модуль, кроковий двигун, керування електроприводом, полімерна плівка.

An approach to building a system that provides dosing polymer composition at low tide polymer film on the substrate. Mathematical model of the dosing channel based on the stepper motor is a mechatronic module that allows us to formulate requirements for regulators to electric drive system with the mechanical characteristics of the control object.

**Keywords:** mechatronic module, stepper motor, drive control, the polymer film.