

В.В. Емец,  
А.И. Гладырь, канд. техн. наук,  
А.П. Черный, д-р техн. наук,  
А.Ю. Даценко

Украина  
Кременчуг

Кременчугский государственный политехнический университет  
**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ  
РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ  
ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

*Розглянуто розробку об'єктно-орієнтованого підходу до побудови математичних моделей неньютонівських рідин і розрахунку їх реологічних характеристик для подальшої програмної реалізації. Показані основні моделі властивостей реологій рідин, що транспортуються, їх класифікація і основні рівняння. Запропоновано схему взаємозв'язків модулів програмної реалізації.*

*Рассмотрена разработка объектно-ориентированного подхода к построению математических моделей неньютоновских жидкостей и расчета их реологических характеристик для последующей программной реализации. Показаны основные модели реологических свойств транспортируемых жидкостей, их классификация и основные уравнения. Предложена схема взаимосвязей модулей программной реализации.*

*The object-oriented approach is considered to the construction of mathematical models of non-newtonian liquids and calculation of their rheological descriptions for subsequent programmatic realization. The basic models of rheological properties of the transported liquids, their classification and basic equalizations, are shown. The chart of intercommunications of the programmatic implementation modules is offered.*

Анализ причин аварийности электроприводов технологических механизмов со сложными условиями запуска показывает целесообразность разработки методов предстартовой подготовки электроприводов учитывающих реологические свойства транспортируемых жидкостей. Для выбора оптимальных параметров технологического процесса пуска таких механизмов является метод непосредственного использования реологических кривых течения транспортируемых жидкостей.

Физически обоснованное математическое описание реологических кривых позволяет по наименьшему числу физико-механических характеристик жидкости построить реологическую кривую для заданного материала, что освобождает от проведения трудоемких экспериментов. Альтернативой таких экспериментов может быть компьютерное имитационное моделирование с использованием объектно-ориентированного подхода к построению математических моделей реологических жидкостей. Это позволит разрабатывать и использовать компьютерные программы, которые позволяют с достаточной точностью описывать деформационное поведение неньютоновских жидкостей в процессе пуска технологического оборудования, а следовательно, разрабатывать и исследовать методы предстартовой подготовки электроприводов.

Целью работы является разработка объектно-ориентированного подхода к построению математических моделей неньютоновских жидкостей

реологических характеристик для последующей программной реализации.

Результаты исследований. Моменты сопротивления, приложенные к механической части электропривода, являются, во-первых, результатом механических потерь, а во-вторых – в результате действия полезных нагрузок на исполнительный механизм:

$$M_c = M_{м.п.} + M_{пол} \quad (1)$$

Величина момента сопротивления, возникающего в результате действия полезных технологических нагрузок при транспортировке неньютоновских (структурированных) жидкостей в значительной степени зависит от реологических свойств этих жидкостей, в особенности, в период пуска и разгона, до перехода механизма к установившемуся движению. Основные физико-механические параметры неньютоновских жидкостей – вязкость, упругость, пластичность зависят от приложенного к жидкости напряжения и деформации. Таким образом, для построения оптимального закона управления электроприводом необходимо знать зависимость «напряжение-скорость деформации» для заданной технологической среды. В связи с тем, что к неньютоновским относится достаточно широкий класс жидкостей, описываемых различными реологическими моделями, является актуальным вопрос о расчете построении реологических кривых с помощью адекватных компьютерных моделей, исследование которых удобно проводить с использованием объектно-ориентированного подхода.

Фундаментальным понятием в объектно-ориентированном моделировании являются класс – абстрактное описание или представление свойств множества объектов (экземпляров класса), которым

соответствуют атрибуты и методы. Атрибут – это значение, которое характеризует объект в классе, а метод – реализация функции объекта данного класса. Важной особенностью классов является возможность их организации в виде иерархической структуры. Все вышеизложенное может быть применено к исследованию неньютоновских жидкостей.

В качестве родительского класса (или суперкласса) принята неньютоновская жидкость, основными свойствами которой являются вязкость, упругость и пластичность, которые в реологии принято описывать моделями Ньютона, Гука и Сен-Веннана, соответственно. Другими свойствами неньютоновских жидкостей являются тиксотропность, реопектичность, дилатансия и псевдопластичность. Таким образом, все вышеперечисленные свойства являются свойствами суперкласса, которые в большей или меньшей степени наследуются дочерними классами. Методами суперкласса являются уравнения динамики течения жидкости, а также термодинамическое и реологическое уравнения [2]:

– уравнение сохранения импульса:

$$\sum_{k=1}^3 \frac{\partial p_{ik}}{\partial x_k} + f_i \rho = \rho \frac{d^2 u_i}{dt^2}; \quad (2)$$

$$p_{ik} = p_{ki}; (i, k = 1, 2, 3),$$

где  $\rho$  – плотность элемента объема,  $p_{ik}$  – напряжения,  $f_i$  – плотность массовой силы;  $u_i$  – перемещение элемента объема;

– уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial (\rho v_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (3)$$

$$v_i = \frac{du_i}{dt}; (i = 1, 2, 3),$$

– термодинамическое уравнение

$$\rho \frac{dU}{dt} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial j_i}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 \left( v_i \sum_{k=1}^3 \frac{\partial p_{ik}}{\partial x_k} \right), \quad (4)$$

где  $U$  – удельная внутренняя энергия,  $j$  – плотность потока тепла

– реологическое уравнение




$$f(p, \dot{p}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, t, T, U) = 0, \quad (5)$$

где  $\varepsilon \varepsilon$ ,  $p$  – соответствующие тензоры деформации и напряжения.

Уравнения (1), (2) и (3) являются общими методами для всех дочерних классов, а реологическое уравнение (4) – зависит от наследуемых свойств и является индивидуальным для каждого дочернего класса.

В качестве исходной, для построения диаграммы классов, используем классификацию неньютоновских жидкостей, предложенную М.Рейнером [3], считая родительским классом (суперклассом) неньютоновскую жидкость, а дочерними классами (подклассами) являются модели, образованные комбинацией тривиальных моделей Ньютона, Гука и Сен-Веннана (табл. 1).

### 1. Классификация моделей неньютоновских жидкостей.

Кол. эле-ментов	Суперкласс – Неньютоновские (структурированные) жидкости		
	Жидкости	Малопрочные и твердообразные тела	
	Вязкое течение или ползучесть	Пластическое течение	Упругая деформация
1	N- тело Ньютона 	StV – тело Сен-Веннана (сухое трение) 	H – тело Гука 
2	M=N-H- тело Максвелла (упруговязкость)	P=StV-H – тело Прандтля	K=N N – тело Кельвина-Фойгта
3	L=N-K- тело Лесерсича J=N M- тело Джеффриса (релаксирующий гель)	B=(N StV)-H – тело Бингама (вязкопластичность)	RTh= H M – тело Пойнтинга-Томпсона
4	Bu=M-K- тело Бюргера Tr=N-RTh- тело Трутона-Ревкина (вязкоупругость)	Schw=(M StV)-H – тело Шведова (пластическое тело)	K M
6		SchSchb==(M StV)-K – тело Шоффилда – Скотт-Блера	

Для описания методов классов используем таблицу реологических уравнений [3], приведенную ниже.

Добавим к приведенным выше уравнениям модель Оствальда [4], которая описывает течение дилатантных и псевдопластических жидкостей и имеет следующее реологическое уравнение:

$$p = k \cdot \dot{\varepsilon} \cdot |\dot{\varepsilon}|^n, \quad (6)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент совместности,  $n$  – показатель степени ( $n > 1$  – для дилатантных,  $n < 1$  – для псевдопластических жидкостей соответственно).

Методами суперкласса «Неньютоновские жидкости» являются:

1. Функция установки параметров расчета

(начальных справочных значений):

$\eta_0, \eta_m$  - наибольшая (шведовская) и наименьшая (бингамовская) вязкости;  $G_0, G_m$  - соответствующие им модули упругости и граничные напряжения  $p_k$  - предел текучести,  $p_r$  - условная граница практически не разрушенной структуры,  $p_{il}$  - условный статический предел прочности,  $p_m$  - равновесный предел прочности жидкости.

2. Функция расчета вспомогательного массива модуля упругости:

$$G(p) = G_m + (G_0 - G_m) \times \left[ 1 - \left[ \left( \frac{G_m}{G_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{p_m - p}{p_m - p_r} + \frac{p - p_r}{p_m - p_r} \right]^{\frac{2}{3}} \right] \times \left( \frac{G_0}{G_m} - 1 \right)^{-1} \left[ \left( \frac{G_m}{G_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{p_m - p}{p_m - p_r} + \frac{p - p_r}{p_m - p_r} \right]^{-\frac{2}{3}} \quad (7)$$

## 2. Реологические уравнения (методы классов) неньютоновских жидкостей.

Кол. элем	Суперкласс – Неньютоновские (структурированные) жидкости		
	Жидкости	Малопрочные и твердообразные тела	
	Вязкое течение или ползучесть	Пластическое течение	Упругая деформация
1	N- тело Ньютона $p = 2\eta\dot{\epsilon}$	StV – тело Сен-Веннана (сухое трение) $p - p_k = 0; 2\dot{\epsilon} = \lambda_M p$	H – тело Гука $p = 2G\epsilon$
2	M=N-H- тело Максвелла (упруговязкость) $\dot{\epsilon} = \frac{p}{2\eta} + \frac{\dot{p}}{2G_0}$	P=StV-H – тело Прандтля $p - p_k = 0; 2\dot{\epsilon} = \lambda_M p + \frac{\dot{p}}{G}$	K=H N – тело Кельвина-Фойгта (упругое последствие) $p = 2G\epsilon - 2\eta\dot{\epsilon}$
3	L=N-K- тело Лесерсича J=N M- тело Джеффриса (релаксирующий гель) $p + \dot{p}\Theta = 2\eta(\dot{\epsilon} + \ddot{\epsilon}\Theta)$ $2\dot{\epsilon} = p \frac{\eta_M + \eta_k}{\eta_M \eta_k} + \frac{G_k}{\eta_k} e^{-\frac{G_k t}{\eta_k}} \times \left( 2\epsilon + \frac{I}{\eta_k} \int p e^{\frac{G_k t}{\eta_k}} dt \right)$	B=(N StV)-H – тело Бингама (вязкопластичность) $p - p_k = 2\dot{\epsilon}\eta_0$	PTh= H M – тело Пойнтинга-Томпсона $p + \dot{p}\Theta = 2G(\dot{\epsilon} + \ddot{\epsilon}\Theta)$ $\frac{p}{2} = G_M \epsilon + e^{\frac{G_k}{\eta_k}} \times \left( \epsilon_0 + G_k \int \dot{\epsilon} e^{\frac{G_k t}{\eta_k}} dt \right)$
4	Bu=M-K- тело Бюргерса, Tr=N-PTh- тело Трутона-Ревкина (вязкоупругость) $2\dot{\epsilon} = p \frac{\eta_M + \eta_k}{\eta_M \eta_k} + \frac{\dot{p}}{G_k} - \frac{G_k}{\eta_k} e^{-\frac{G_k t}{\eta_k}} \times \left( 2\epsilon + \frac{I}{\eta_k} \int p e^{\frac{G_k t}{\eta_k}} dt \right)$	Schw=(M StV)-H – тело Шведова (пластическое тело) $\dot{\epsilon} = \frac{p - p_k}{\eta_0^*} + \frac{\dot{p}}{G}$	K M
6		SchSchb=(M StV)-K – тело Шоффилда – Скотт-Блера $2\dot{\epsilon} = (p - p_k) \frac{\eta_M + \eta_k}{\eta_M \eta_k} + \frac{\dot{p}}{G_k} - \frac{G_k}{\eta_k} e^{-\frac{G_k t}{\eta_k}} \times \left( 2\epsilon + \frac{I}{\eta_k} \int (p - p_k) e^{\frac{G_k t}{\eta_k}} dt \right)$	

Методами суперкласса «Неньютоновские жидкости» являются:

3. Функция установки параметров расчета (начальных справочных значений):

$\eta_0, \eta_m$  - наибольшая (шведовская) и наименьшая (бингамовская) вязкости;  $G_0, G_m$  - соответствующие им модули упругости и граничные напряжения  $p_k$  - предел текучести,  $p_r$  - условная граница практически не разрушенной структуры,  $p_{il}$  - условный статический предел прочности,  $p_m$  - равновесный предел прочности жидкости.

4. Функция расчета вспомогательного массива модуля упругости:

$$G(p) = G_m + (G_0 - G_m) \times \left[ 1 - \left[ \left( \frac{G_m}{G_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{p_m - p}{p_m - p_r} + \frac{p - p_r}{p_m - p_r} \right]^{\frac{2}{3}} \right] \times \left( \frac{G_0}{G_m} - 1 \right)^{-1} \left[ \left( \frac{G_m}{G_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{p_m - p}{p_m - p_r} + \frac{p - p_r}{p_m - p_r} \right]^{-\frac{2}{3}}. \quad (7)$$

Методами дочерних классов являются, во-первых, наследуемые методы суперкласса, во-вторых, функции расчета массивов вязкости  $\eta(p)$  и реологические уравнения.

Для расчета реологических параметров реализован программный комплекс в среде Visual C. Программный комплекс состоит из функциональных модулей, взаимосвязь между которыми приведена на рисунке.

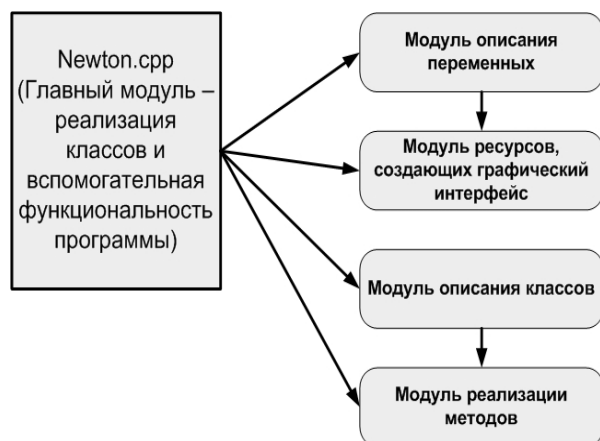


Рисунок. Схема взаимосвязей программных модулей.

В программном комплексе реализован графический пользовательский интерфейс, позволяющий произвести выбор реологической модели и ввод начальных параметров. Рассчитанные массивы выводятся в текстовый файл.

Таким образом, разработанный объектно-ориентированный подхода к моделированию неньютоновских жидкостей позволяет существенно упростить процесс проектирования систем управления электроприводами с учетом реологических характеристик транспортируемых сред, а также проводить комплексные исследования пусковых режимов электроприводов технологических механизмов со сложными условиями запуска.

#### Список использованной литературы

1. Буч Г., Рембо Дж., Джекобсон А.. UML.Руководство пользователя. - М.: Питер, 2004.– 429 с.
2. Овчинников П.Ф.. Виброреология – К.: Наук. думка, 1983. – 272 с.
3. Рейнер М. Реология – М.: Наука, 1965.– 224 с.
4. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен / Б.Гебхарт, Й.Джалурия, Р.Махаджан, Б.Саммакия. – М.: Мир, 1991. - Кн.2. – 528 с.

Получено: 07.07.06



Емец Валерий Васильевич,  
старший. Преподаватель.  
Каф. компьютерных и  
информационных систем  
КГПУ, г.Кременчуг,  
ул.Первомайская, 20,  
8-05366-3-01-45  
yelv@polytech.poltava.ua



Гладырь Андрей Иванович,  
к.т.н., доцент каф. систем  
автоматического управления и  
электропривода КГПУ,  
г.Кременчуг,  
ул.Первомайская, 20,  
8-05366-3-11-47  
saue1@polytech.poltava.ua



Черный Алексей Петрович,  
д.т.н., профессор.  
Директор ин-та электромеханики,  
энергосбережения и  
компьютерных технологий КГПУ  
г.Кременчуг,  
ул.Первомайская, 20,  
8-05366-3-11-47,  
apch@polytech.poltava.ua



Даценко Алла Юрьевна,  
студентка кафедры КИС,  
КГПУ, г.Кременчуг,  
ул.Первомайская, 20,  
8-066-238-96-01