

УДК 004.42; 519.85

DOI: 10.15827/0236-235X.116.176-182

Дата подачи статьи: 11.01.16

2016. Т. 29. № 4. С. 176–182

## ПОСТРОЕНИЕ АРХИТЕКТУРЫ САПР ОДНОШНЕКОВЫХ ЭКСТРУДЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Т.М. Зубкова, д.т.н., профессор, bars87@mail.ru;

Н.А. Мустюков, аспирант, 256nail@mail.ru;

М.А. Токарева, к.т.н., доцент, tokareva@mail.osu.ru

(Оренбургский государственный университет, просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Россия)

Конкуренция на рынке экструзионного оборудования заставляет его производителей ежегодно предлагать усовершенствованные и новые технологии, рассчитанные на широкий круг выпускаемой продукции. Поэтому производство должно обладать гибкостью, перенастраиваясь на различные конфигурации изделий, типы сырья и производительность в зависимости от текущих потребностей рынка. Сложность процессов, которыми характеризуется экструзия, не позволяет рассчитать их обычными методами без использования САПР. Принятие решения о выборе маршрута проектирования требует высокой профессиональной подготовки пользователя. Выходом из данной ситуации является интеллектуализация проектирования. Указанный подход позволяет осуществлять автоматизацию процедур оценки свойств проекта, планирование маршрута проектирования и диалог с пользователем САПР. В силу данных причин все большее развитие получают интеллектуальные САПР с перестраиваемой архитектурой. Таким образом, снижение трудоемкости процесса проектирования шнековых экструдеров на основе создания перестраиваемой архитектуры САПР является актуальной проблемой.

Авторами данной статьи разработана методика построения интеллектуальной САПР шнековых экструдеров, основанная на интеграции и конфигурировании его подсистем. Создана программная система, которая является ядром САПР и включает в себя БЗ, БД, набор программных компонентов, интеграцию компонентов (сторонние CAD/CAE-системы, математические модели проектируемых процессов, компоненты пользовательского интерфейса, инструментальные средства разработки), управление данными и оптимизацию технологических и геометрических параметров шнековых экструдеров.

Описано построение архитектуры САПР на основе теории искусственного интеллекта, которое заключается в выборе набора компонентов для решения проектных задач таким образом, чтобы обеспечить необходимые свойства в системе при минимизации времени проектирования.

Разработанная интегрированная среда САПР шнековых экструдеров позволяет создавать конструкции экструдеров, автоматизировать корректировку геометрических параметров и подготовку данных для проведения анализа конструкции, моделировать процесс экструдирования, оптимизировать конструкции и технологические режимы. Предложенная методика конфигурирования САПР на основе методов искусственного интеллекта позволяет снизить трудоемкость проектирования шнековых экструдеров.

**Ключевые слова:** экструзионный процесс, математическое моделирование, интегрированная среда САПР, CAD/CAE-системы, шнек, матрица, векторная оптимизация, программная система, вычислительный эксперимент.

Широкое использование экструдеров в различных областях производства объясняется стабильностью их работы, обеспечением высокого качества продукции, совмещением нескольких технологических операций, возможностью компоновки в поточные линии с высокой степенью автоматизации.

Сложность процессов, которыми характеризуется экструзия, не позволяет рассчитать их обычными методами без использования САПР, поэтому задача разработки алгоритмов построения и реконфигурирования архитектуры комплексной САПР шнековых экструдеров является актуальной. Необходимость формирования перестраиваемых архитектур САПР объясняется ростом элементной базы, специализацией программных средств проектирования экструдеров, быстрой сменой технологических и конструктивных требований к проектируемым объектам, внедрением CALS-технологий и сложностью создания прикладного ПО.

Построением САПР, математическим моделированием, разработкой ПО занимались многие исследователи [1–9]. На основе их трудов делается

вывод о существовании нескольких направлений построения САПР с перестраиваемой архитектурой. Среди них выделена априорная адаптация архитектуры САПР к особенностям объекта проектирования (рис. 1).

Согласно данной концепции, адаптация заключается в использовании наиболее подходящего программного компонента САПР, при котором обеспечивается оптимальное проектирование объекта с учетом изначально неизвестных и меняющихся условий работы. Комбинирование и отбор проектирующих модулей осуществляются с помо-

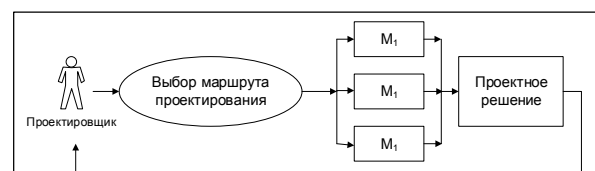


Рис. 1. Априорная адаптация к особенностям объекта проектирования

Fig. 1. The priori adaptation to design object characteristics

шью выявления общих свойств объекта проектирования, разделения компонентов на отдельные классы, варьирования критериев оценки качества проекта. Указанные действия реализуются отдельным программным модулем – модулем управления (принятия решения).

**Математическое описание построения САПР**

Задача построения архитектуры САПР на основе теории искусственного интеллекта заключается в выборе набора компонентов  $R$  для решения проектных задач  $Z$  таким образом, чтобы обеспечить необходимые свойства  $F$  в системе  $S$  при минимизации времени проектирования  $t$ .

Целевая функция конфигурирования системы [10] в случае применения аддитивного критерия примет вид:

$$\sum_{j=1}^J \left( c_j \frac{Q_j(F_j)}{Q_j^0} - v_j \frac{t_j(F_j)}{t_j^0} \right) \rightarrow \max, \text{ где}$$

$F_j$  – свойство альтернативной подсистемы для решения  $j$ -й задачи проектирования (управляемый параметр), при этом  $F_j \in \bigcup_{p=1}^{P_{A_j}} \{F_{jp}\}$ ;  $Q_j$  – функция

оценки качества системных свойств для  $j$ -й задачи проектирования;  $t_j$  – функция оценки времени выполнения проектной задачи;  $P_{A_j}$  – набор альтернативных компонентов для решения  $j$ -й задачи;  $Q_j^0, t_j^0$  –  $j$ -й нормирующий делитель для качественных и временных характеристик соответственно;  $J$  – количество проектных задач;  $c_j, v_j$  – весовые коэффициенты  $j$ -го частного критерия, причем  $\frac{c_j}{v_j} \rightarrow \infty$ .

При этом управляемыми параметрами являются свойства системы ( $F$ ) и совокупность компонентов ( $R$ ), обеспечивающих данные свойства:

$$U = \begin{cases} F, \\ R. \end{cases} \quad (1)$$

В качестве ограничений выступают следующие:

- проектная задача: синтез ( $Z_S$ ), анализ ( $Z_A$ ), оценка ( $Z_E$ ), конвертирование ( $Z_C$ ), визуализация ( $Z_V$ ), принятие проектных решений ( $Z_D$ );
- конструктивные особенности изделия: количество секций ( $K_I$ ), наличие компрессионных затворов ( $K_Z$ ), количество шнеков ( $K_S$ ), форма фильер матрицы ( $K_F$ ), количество фильер ( $K_{FI}$ ), наличие оттока жидкой фазы ( $K_O$ ), наличие пристенного слоя ( $K_P$ ), форма канала шнека ( $K_{FS}$ );
- технологические требования производства: свойства обрабатываемого материала (коэффициент консистенции в винтовом канале шнека ( $T_\mu$ ), индекс течения прессуемого материала ( $T_n$ )), напряженное состояние в различных участках экструдера ( $T_\sigma$ ), температура обработки ( $T_t$ );

- набор начальных данных (возможность применения компонента): конструктивные ( $U_K$ ), геометрические ( $U_G$ ), кинематические ( $U_P$ ) и реологические ( $U_R$ ) параметры.

Система ограничений примет вид:

$$C = \begin{cases} Z, \text{ где } Z \in \{Z_S, Z_A, Z_E, Z_C, Z_V, Z_D\}, \\ K, \text{ где } K \subseteq \{K_I, K_Z, K_S, K_F, K_{FI}\}, \\ K_O, K_P, K_{FS}, \\ T, \text{ где } T \subseteq \{T_n, T_\mu, T_\sigma, T_t\}, \\ U, \text{ где } U \subseteq \{U_K, U_G, U_P, U_R\}. \end{cases} \quad (2)$$

Решить представленную оптимизационную задачу с помощью теории графов невозможно, поскольку нет полной информации о связях между компонентами по воздействию, по управлению, по информации, по размещению.

Принятие решения в большинстве случаев заключается в генерации возможных альтернативных решений, их оценке и выборе лучшего варианта. При выборе варианта приходится учитывать большое число неопределенных и противоречивых факторов. Неопределенность – неотъемлемая часть процессов принятия решений.

Выходом являются системы, основанные на мягких вычислениях, которые используют вероятностные вычисления, нечеткую логику, обучение и адаптацию, оптимизацию на основе случайного поиска и эволюции (генетические вычисления).

Выделяют несколько моделей нечеткого вывода (модель Мамдани, Ларсена, Сугено и др.), которые различаются видом логических операций и используемых правил.

Метод Мамдани, использующий минимаксную композицию нечетких множеств, является наиболее распространенным способом логического вывода. Применительно к задаче реконфигурирования математической модели одношнековых экструдеров данный метод включает следующие действия.

1. Формирование базы правил следующего вида: если <условие 1> и <условие 2> ... и <условие n>, то <вывод>.

В качестве условий указывается соответствие входных параметров  $X_i (i \in [1, \dots, n])$  предъявляемым требованиям (например, количество секций больше 2).

На основе входных параметров, а также по оценочному мнению <условие k> принимает значение в интервале  $[0, \dots, 1]$ .

«Вывод» соответствует выбору использования того компонента, для которого составлено правило (например, использовать математическую модель экструдера для биополимера).

2. Фаззификация входных переменных. Этот этап часто называют приведением к нечеткости.

На вход поступают сформированная база правил и массив входных данных  $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ , где  $m$  – количество входных переменных. В этом мас-

сиве содержится информация о конструктивных особенностях экструдера и технологических требованиях производства. Целью этапа является получение значений истинности для всех подусловий из базы правил. Это происходит следующим образом: для каждого из подусловий находится значение  $b_i = \lambda_i(a_j)$ , где  $\lambda$  – функция принадлежности, которая всем значениям входных переменных ставит в соответствие конкретные значения степени истинности;  $j = 1, \dots, m$ ;  $i = 1, \dots, k$ , где  $k$  – общее число подусловий в базе правил. Таким образом, получается множество значений  $b_i$ .

3. Агрегирование подусловий – определение степени истинности условий в каждом правиле:  $c_i = \min\{b_i\}$ .

4. Активизация подзаклучений – переход от условий к подзаклучениям. Для каждого подзаклучения находится степень истинности  $d_i = c_i F_i$ , где  $i = 1, \dots, q$ ,  $q$  – общее число подзаклучений в базе правил;  $F$  – весовые коэффициенты, означающие степень уверенности в истинности получаемого подзаклучения. Затем каждому  $i$ -му подзаклучению сопоставляется множество  $D_i$  с новой функцией принадлежности. Ее значение определяется как минимум из  $d_i$  и значения функции принадлежности компонента из подзаклучения. Этот метод называется min-активизацией и формально записывается так:  $\lambda'(x) = \min\{d_i, \lambda_i(x)\}$ .

5. Аккумуляция заключений – получение нечеткого множества (или их объединения) для каждой из выходных переменных. Выполняется следующим образом:  $i$ -й выходной переменной сопоставляется объединение множеств  $E_i = \cup D_j$ , где  $j$  – номера подзаклучений, в которых участвует  $i$ -я выходная переменная ( $i = 1, \dots, s$ ). Объединением двух нечетких множеств является третье нечеткое множество со следующей функцией принадлежности:  $\lambda'(x) = \max\{\lambda_1(x), \lambda_2(x)\}$ , где  $\lambda_1(x)$ ,  $\lambda_2(x)$  – функции принадлежности объединяемых множеств.

6. Дефаззификация выходных переменных. На данном этапе определяется количественное значение (crisp value) для каждой из выходных лингвистических переменных. Рассматриваются  $i$ -я выходная переменная и относящиеся к ней множество  $E_i$  ( $i = 1, \dots, s$ ). Затем при помощи метода дефаззификации находится итоговое количественное значение выходной переменной. В данной реализации алгоритма используется метод центра тяжести, в котором значение  $i$ -й выходной переменной рассчитывается по формуле

$$y_i = \frac{\int_{\min}^{\max} x \cdot \lambda_i(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \lambda_i(x) dx}, \tag{3}$$

где  $\lambda_i(x)$  – функция принадлежности соответствующего нечеткого множества  $E_i$ ;  $\min$  и  $\max$  – границы

универсума нечетких переменных;  $y_i$  – результат дефаззификации.

Рассмотрим реализацию данного алгоритма на примере выбора математической модели процесса экструдирования согласно заданным начальным условиям. Для проведения эксперимента необходимо составить БЗ. В данном примере в качестве правил возьмем соответствие свойств обрабатываемого материала и используемых математических моделей.

Пример заполнения БЗ приведен в таблице 1. Показателями, по которым будет производиться отбор, являются температура материала ( $t$ , °C), индекс течения прессуемого материала ( $n$ ), коэффициент консистенции ( $\mu'$ ).

Таблица 1  
БЗ для выбора математической модели  
Table 1  
Knowledge base to select a mathematical model

| Условие 1 | Условие 2  | Условие 3       | Вывод  |
|-----------|------------|-----------------|--|
| $t = 40$  | $n = 0,18$ | $\mu' = 0,052$  | Используется математическая модель для биополимеров                |
| $t = 40$  | $n = 0,28$ | $\mu' = 0,0343$ | Используется математическая модель для сырья с оттоком жидкой фазы |

Начальными данными являются следующие свойства обрабатываемого материала:  $t = 40$  °C,  $n = 0,21$ ,  $\mu' = 0,049$ .

Найдем степень истинности начальных данных каждому правилу из БЗ и реализуем метод Мамдани. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2  
Результаты алгоритма  
Table 2  
The algorithm results

| Условие 1 | Условие 2 | Условие 3 | min  |
|-----------|-----------|-----------|------|
| 1         | 0,83      | 0,94      | 0,83 |
| 1         | 0,75      | 0,57      | 0,57 |
| max       |           |           | 0,83 |

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что математическая модель для биополимеров предпочтительна при проведении эксперимента в соответствии с начальными условиями. Преимуществом метода является возможность учета безграничного числа условий и составления правил различных форм. Точность результатов зависит от объема БЗ.

Таким образом, по результату этапа дефаззификации можно судить о необходимости использования определенного программного компонента из имеющихся альтернатив.

На основе описанного алгоритма разработана методика управления конфигурацией САПР (рис. 2). В результате ее реализации определяется набор интегрированных программных подсистем,



Рис. 2. Схема функционирования САПР

Fig. 2. CAD operation scheme

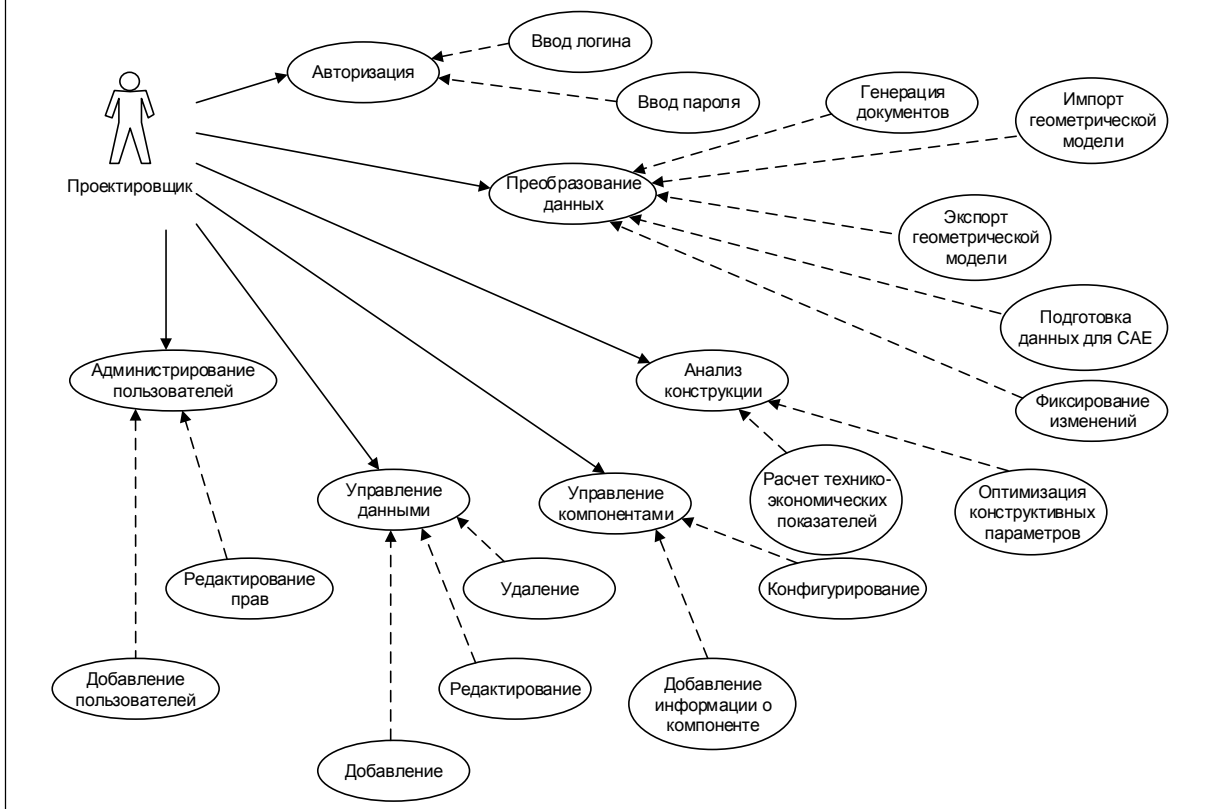


Рис. 3. Диаграмма вариантов использования

Fig. 3. A use case diagram

с помощью которых решается поставленная задача проектирования [11].

**Реализация построения САПР**

Диаграмма вариантов использования САПР показана на рисунке 3.

Работа с программной системой осуществляется следующим образом.

При добавлении новой конструкции создается ее проект.

Параметры конструкции вносятся через форму ввода либо определяются автоматически при загрузке чертежа конструкции (рис. 4).

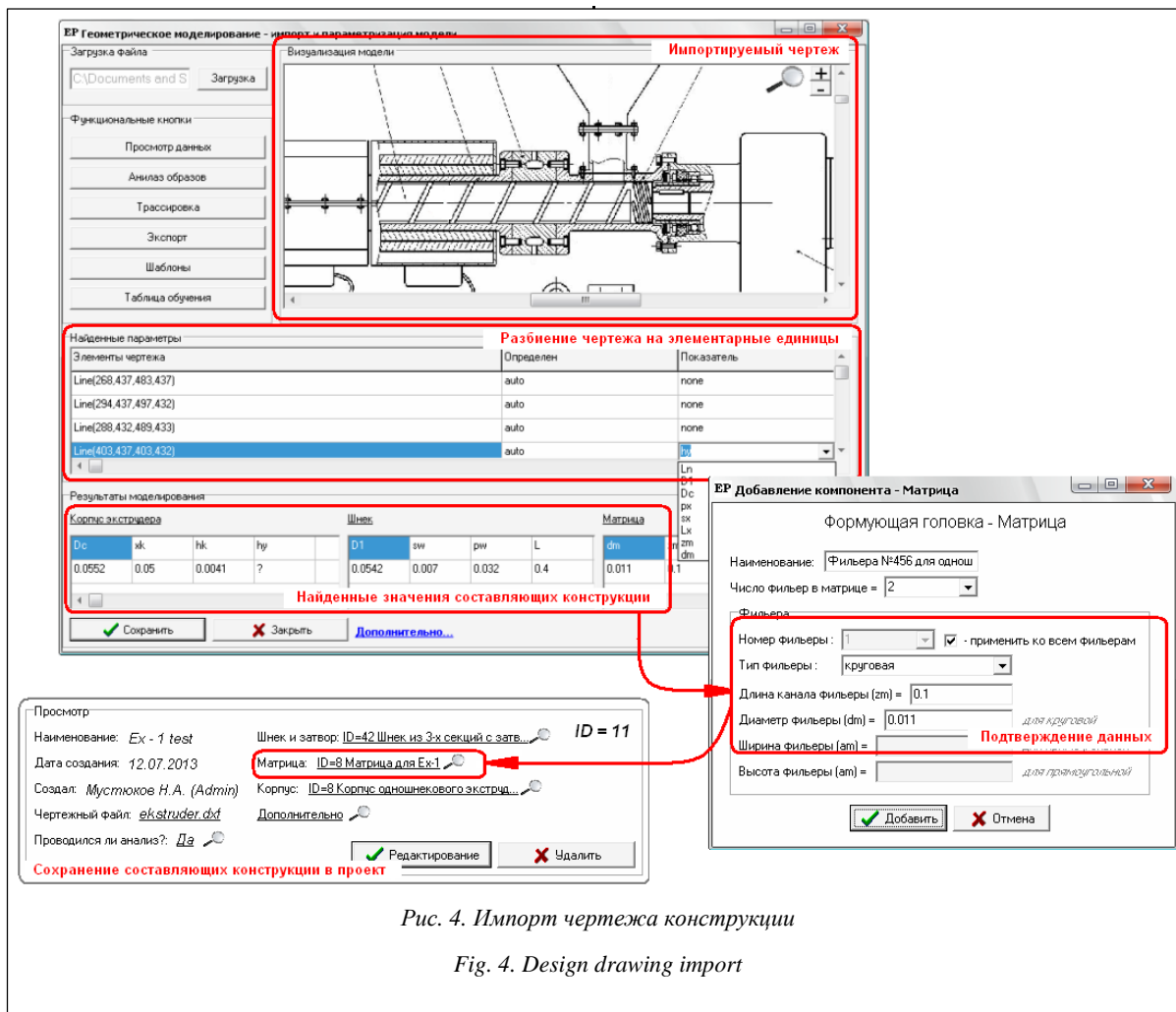


Рис. 4. Импорт чертежа конструкции

Fig. 4. Design drawing import

После создания проекта конструкции в программной системе доступны следующие функции: редактирование конструкции, анализ конструкции с помощью математической модели расчета технико-экономических показателей процесса (производительности, мощности сил полезного сопротивления, времени процесса, эффективности процесса), оптимизация конструкции, подготовка данных для применения их во внешних системах.

Анализ процесса экструдирования реализован в три этапа: выбор конструкции, задание параметров процесса экструдирования, моделирование (см. рис. 5). Пользователю предоставляется возможность выбора одного или нескольких вычисляемых параметров, при этом подключение и использование математических моделей осуществляются автоматически на основе БЗ и описанного алгоритма конфигурирования.

В приведенном примере требуется определить ряд технико-экономических показателей. По результатам конфигурирования для расчетов был выбран модуль «Модель расчета технико-экономических показателей экструдера для биополимеров». Отследить этапы расчета возможно в блоке «Трассировка и детализация».

Для оптимизации выбранной конструкции необходимо указать условия оптимизации (целевой параметр, ограничения), корректируемые характеристики и критерий остановки алгоритма. Результатом расчета являются значения параметров оптимизации и технико-экономические характеристики полученной конструкции. На рисунке 6 представлена оптимизация параметров шнека конструкции при условии максимизации коэффициента полезного действия.

В заключение отметим достоинства предлагаемой методики, основанной на конфигурировании интеллектуальной САПР шнековых экструдеров.

Благодаря увеличению числа просматриваемых вариантов и детальности проработки каждого из них повышается качество проектируемых объектов. За счет более широкого использования средств имитационного моделирования и численных методов уменьшается время проектирования. Повышается эффективность инженерного анализа. Благодаря планированию вычислений и контролю результатов ускоряются проектные расчеты.

Кроме того, снижается трудоемкость процесса проектирования шнековых экструдеров в среднем на 24 % и уменьшается срок внедрения САПР.



Самарского гос. технич. ун-та. Сер.: Технич. науки. 2010. № 2. С. 128–134.

5. Барабанов В.В. Роль интегрированных информационных систем управления производством в решении проблемы повышения качества и конкурентоспособности продукции промышленных предприятий // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2000. № 4. С. 3–8.

6. Волкова Г.Д. Концептуальное моделирование при создании систем автоматизации проектирования // Техника машиностроения. 2000. № 2. С. 92–102.

7. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер, 2001. 384 с.

8. Кравченко Ю.А. Перспективы развития гибридных ин-

теллектуальных систем // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. 2002. № 3. С. 34–38.

9. Курейчик В.В. Перспективные архитектуры генетического поиска // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. 2000. № 1. С. 58–60.

10. Зубкова Т.М., Мустюков Н.А., Колобов А.Н. Реконфигурирование САПР для проектирования одношнековых экструдеров на основе модели нечеткого вывода Мамдани // Вестн. ОГУ. 2013. № 1. С. 176–181.

11. Мустюков Н.А., Зубкова Т.М. Применение генетического алгоритма для проведения параметрического синтеза конструкции экструдера // Науч.-технич. вестн. ИТМО. 2013. № 4. С. 114–118.

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.116.176-182

Received 11.01.16

2016, vol. 29, no. 4, pp. 176–182

## SINGLE SCREW EXTRUDER ENGINEERING WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE ELEMENTS

*T.M. Zubkova*<sup>1</sup>, *Dr.Sc. (Engineering), Professor, bars87@mail.ru*

*N.A. Mustyukov*<sup>1</sup>, *Postgraduate Student, 256nail@mail.ru*

*M.A. Tokareva*<sup>1</sup>, *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, tokareva@mail.osu.ru*

<sup>1</sup> *Orenburg State University, Pobedy Ave. 13, Orenburg, 460018, Russian Federation*

**Abstract.** Market fierce competition makes the extrusion equipment manufacturers offer advanced and new technologies for a wide range of products every year. Therefore, production must be flexible, adjusting to different configurations of products, raw materials and types of productivity depending on current needs of the market. The complexity of the extrusion process does not allow figuring it out by conventional methods without using automation design (SAPR). The reduction of engineering process complexity of single screw extruders based on flexible SAPR organization is a current issue.

The study developed a method of building SAPR screw extruders based on the integration and configuration of its subsystems. The created software system is the SAPR core and includes the integration of the components (a third-party CAD/CAE-systems, designed processes mathematical models, user interface components, engineering tools), data management, native software modules connection, designed to analyze the process of extrusion and optimization of technological and geometrical parameters of screw extruders.

SAPR framework for screw extruders allows engineering the extruders; automating the adjustment of geometrical parameters and data preparation for analysing the structure; to carry out a simulation extrusion process; to optimize design and technological regimes; to manage extruder design data, extrusion process and simulation results. The developed software system helped to create a new press extruder and improve the homogenization of the material being processed. The constructions are protected by patents of the Russian Federation. The proposed method of geometrical parameters optimization of the extruder-based adaptive methods enhances the search for new and improvement of existing designs. The article reflects the results of the grant № 14-08-97031 performed with the financial support of the Government of the Orenburg Region and Russian Fundamental Research Fund.

**Keywords:** extrusion process, mathematical modeling, integrated environment SAPR, CAD/CAE-systems, screw, matrix, vector optimization, software system, computer experiment.

### References

1. Shevchenko M.N. SAPR Screw extruders software. *Vestn. Orenburgskogo gos. univ.* [The Herald of the Orenburg State Univ.]. 2010, no. 5 (111), pp. 145–146 (in Russ.).

2. Kuznetsov S.A. Specialized SAPR engineering is the high performance software mainstream. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern technologies]. 2011, no. 10, pp. 29–34 (in Russ.).

3. Ostrikov A.N., Abramov O.V. Extruder working body SAPR engineering. *Vestn. mashinostroeniya* [Engineering Herald]. 2009, no. 10, pp. 27–30 (in Russ.).

4. Pishchukhin A.M., Shevchenko M.N. Screw extruders system architecture design engineering. *Vestn. Samarskogo gos. tekhnich. un-ta. Ser.: Tekhnich. nauki* [The Herald Samara State Technical Univ. Series: Technical sciences]. 2010, no. 2, pp. 128–134 (in Russ.).

5. Barabanov V.V. The role of integrated information systems for production management in addressing the problem of increasing the quality and competitiveness of industrial enterprises. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information Technologies in Engineering and Manufacture]. 2000, no. 4, pp. 3–8 (in Russ.).

6. Volkova G.D. Conceptual modeling while automation systems engineering. *Tekhnika mashinostroeniya* [Mechanical Engineering]. Moscow, SPE Virazh-centre Publ., 2000, no. 2, pp. 92–102 (in Russ.).

7. Gavrilova T.A., Khoroshevsky V.F. *Bazy znany intellektualnykh sistem* [Intellectual Systems Databases]. St. Petersburg, Piter Publ., 2001, 384 p.

8. Kravchenko Yu.A. Hybrid intelligent systems development prospects. *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii i intellektualnye sistemy* [Advanced Information Technologies and Intelligent Systems]. 2002, no. 3, pp. 34–38 (in Russ.).

9. Kureychik V.V. Genetic search prospective architecture. *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii i intellektualnye sistemy* [Advanced Information Technologies and Intelligent Systems]. 2000, no. 1, pp. 58–60 (in Russ.).

10. Zubkova T.M., Mustyukov N.A., Kolobov A.N. SAPR reconfiguring for single-screw extruders engi-neering, Mamdani model-basing fuzzy inference. *Vestn. OGU* [OSU Herald]. 2013, no. 1, pp. 176–181 (in Russ.).

11. Mustyukov N.A., Zubkova T.M. Application of genetic algorithms for parametric synthesis design extruder. *Nauch.-tekhnich. vestn. ITMO* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2013, no. 4, pp. 114–118 (in Russ.).