

17. Dzhannunts G.A., Romm Ya.E. Var'iruemoie kusochno-interpolyatsionnoie reshenie zadachi Koshi dlya obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy s iteratsionnym utochneniem [The varying piecewise interpolation solution of the Cauchy problem for ordinary differential equations with iterative refinement], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal], 2017, Vol. 57, No. 10, pp. 1616-1634.
18. Cesari L. Asimptoticheskoe povedenie i ustoychivost' resheniy obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy [Asymptotic Behavior and Stability Problems in Ordinary Differential Equations]. Moscow: Mir, 1964, 478 p.
19. Kamke E. Spravochnik po obyknovennym differentsial'nym uravneniyam [Handbook of Exact Solutions for Ordinary Differential Equations]. Moscow: Science, 1971, 576 p.
20. Doban A., Lazar M. Computation of Lyapunov functions for nonlinear differential equations via a Yoshizawa-type construction, *10th IFAC Symp. on Nonlinear Control Systems NOLCOS: IFAC-PapersOnLine*, 2016, pp. 29-34.
21. Xiao-Lin L., Yao-Lin J. Numerical algorithm for constructing Lyapunov functions of polynomial differential systems, *J. Appl. Math. Comput.*, 2009, Vol. 29, No. 1-2, pp. 247-262.
22. Zhaolu T., Chuanqing G. A numerical algorithm for Lyapunov equations, *J. Appl. Math. Comput.*, 2008, Vol. 202, No. 1, pp. 44-53.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Буланов Сергей Георгиевич – Ростовский государственный экономический университет; e-mail: bulanovtgp@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89281250973; доцент.

Bulanov Sergei Georgievich – Rostov State University of Economics; e-mail: bulanovtgp@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281250973; associate professor.

УДК 621.9

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-137-151

Е.В. Федорина, И.Ф. Дьяков, О.Г. Крупенников

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО РАСКРОЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
РЕСУРС-СТОИМОСТНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ**

Применяемые программы и САПР по раскрою различных материалов эффективны в условиях единичного и многономенклатурного мелкосерийного производства с применением группового метода раскроя на заготовки произвольной геометрической формы. При раскрое листового и рулонного металлопроката в условиях крупносерийного и массового производства, характеризующегося индивидуальным раскромом на одноименные заготовки, созданные программы имеют ограниченное применение. Для автоматизированного раскроя в условиях такого производства необходима адаптация применяемых или создание новых систем и программ с применением современных подходов и новой схемы проектирования раскроя на основе использования нового показателя эффективности раскроя с минимизацией себестоимости выпускаемой продукции, ведения расчета для деталей одной группы (по марке и толщине), что позволит рационально подбирать отходы на другие детали данной группы. Для решения поставленной задачи предложена и рассмотрена в статье новая модель оптимизации гильотинного раскроя с минимизацией затрат на металл и снижением себестоимости раскройных изделий. Для реализации автоматизированного проектирования раскроя в зависимости от нового ресурс-стоимостного показателя (РСП) и управления информацией о подетальном раскроме металла в ходе проведенных авторами исследований разработана база данных «Кластер деталей «ПРОМ-2013»» и программа «ПРОМ-2013», позволяющая произвести оценку эффективности раскроя по РСП и выбрать оптимальный вариант. На примере детали «Панель боковины» показаны эффективность разработанного алгоритма и этапы автоматизированного проектирования оптимального раскроя на основе показателя РСП с формированием выходных документов «карт раскроя материалов».

Оптимальный раскрой; ресурс-стоимостной показатель; база данных; программа оптимизации раскроя.

E.V. Fedorina, I.F. Dyakov, O.G. Krupennikov

AUTOMATED DESIGN OF RESOURCE-SAVING CUTTING USING RESOURCE-SAVING COEFFICIENT

The applied programs and cad for cutting various materials are effective in conditions of single and multi-item small-scale production using the group method of cutting into blanks of arbitrary geometric shape. When cutting sheet and rolled metal products in large-scale and mass production, characterized by individual cutting into blanks of the same name, the created programs have limited use. For automated cutting in such production conditions, it is necessary to adapt existing systems and programs or create new ones using modern approaches and a new cutting design scheme based on the use of a new cutting efficiency indicator with minimizing the cost of manufactured products, conducting calculations for parts of the same group (by brand and thickness), which will allow rational selection of waste for other parts of this group. To solve the problem, a new model for optimizing guillotine cutting with minimizing metal costs and reducing the cost of cutting products is proposed and discussed in the article. To implement automated cutting design depending on the new resource-saving coefficient (RSC) and manage information about detailed cutting of metal in the course of the research conducted by the authors, the database «Cluster of parts «PROM-2013»» and the program «PROM-2013» were developed, allowing assessing the efficiency of cutting according to RSC and choosing the best option. Using the example of the «side panel» part, the effectiveness of the developed algorithm and the stages of automated design of optimal cutting based on the RSC indicator with the formation of output documents «material cutting cards» are shown.

Optimal cutting, resource-cost indicator, database, cutting optimization program.

Состояние вопроса. В современных конкурентных условиях производства проблема снижения металлоемкости и экономного потребления металла не только не потеряла своей актуальности, но и ускорились темпы решения этой задачи. Важнейшим резервом экономии металла является оптимизация раскроя металлопроката с альтернативным выбором оптимальных типоразмеров проката от разных производителей-поставщиков.

Существующие методы и алгоритмы оптимального раскроя [1–7], опубликованные в различных изданиях, легли в основу многих программных разработок, широко применяемых на промышленных предприятиях [8]. В качестве основного критерия экономичного и эффективного раскроя выбирается наиболее плотное размещение (максимальное количество) заготовок на материале заданного сортамента. Кроме того, при расчете раскроя исходных материалов согласно традиционной схемы проектирования технологических процессов резки металлопроката определяется наиболее рациональное использование металла, соответствующее максимальному коэффициенту использования материала ($K_{и}$) и минимальному потреблению материала [9, 10] по каждой детали в отдельности, и невозможно осуществить выбор оптимального раскроя всей номенклатуры деталей.

Экономические факторы все сильнее оказывают влияние на подход к решению проблемы экономии материала. И использование только традиционных показателей (коэффициента раскроя и коэффициента использования материала) для оценки эффективности раскроя уже недостаточно. Необходимо также учитывать экономические аспекты, что позволит существенно увеличить экономию металло-ресурсов и связанных с ними затрат, и тем самым снизить себестоимость раскройной продукции.

Основная часть. Расширение списка альтернативных поставщиков металлопроката дает возможность увеличить перечень сортамента металла (включая стоимостные характеристики), подлежащего раскрою. Однако, при выборе выгодного раскроя может сложиться такая ситуация, когда будет отдано предпочтение варианту не с минимальной нормой расхода или с минимальной ценой стали, а с минимальными затратами на металл. Для оценки эффективности раскроя металло-

проката на плоские прямоугольные заготовки в условиях массового и крупносерийного производства предлагается использовать сочетание нескольких показателей с определением комплексного показателя затрат (ресурс-стоимостного показателя (РСП)) и выбором максимально выгодного варианта раскроя с точки зрения его минимального значения.

В связи с этим разработана новая схема для проектирования раскроя, основанная на использовании предложенного ресурс-стоимостного показателя. В схему с введена обратная связь с процессом заказа металла и сортаментом, выпускаемым металлургическими комбинатами (с ценой). Оптимизационный расчет повторяется по циклу до достижения наилучшего (наименьшего) результата РСП. На основании новой схемы расчет оптимизированного раскроя выполняется по усовершенствованному обобщенному алгоритму раскроя металлопроката (рис. 1), предусматривающему три существенных отличия: 1) использование сортамента металлургических заводов (с ценой); 2) выполнение раскроя металла для группы деталей одной марки и толщины; 3) определение критерия оптимизации РСП с выбором наилучшего варианта раскроя по его минимальному значению, при котором заданное количество заготовок будет изготовлено с наименьшей потребностью металла при минимальных затратах [11, 12]. Элементы, выделенные серым цветом на рис. 1, являются авторскими разработками.

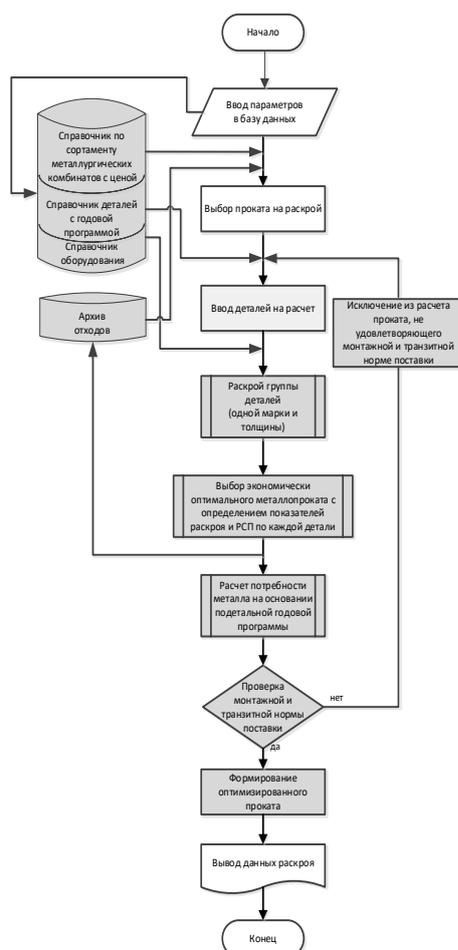


Рис. 1. Обобщенный алгоритм раскроя металлопроката для группы деталей

На основе схемы для проектирования ресурсосберегающего раскроя и усовершенствованного алгоритма разработана новая модель гильотинного раскроя с минимизацией затрат на металл в зависимости от нового ресурс-стоимостного показателя. Задача оптимального раскроя решается в три этапа. На первом этапе среди возможных вариантов укладки заготовки на листе выбирается наилучший вариант раскроя с наибольшим количеством заготовок [13]. На втором этапе при расчете раскроя для деталей одной группы определяется оптимальный вариант с наименьшим расходом металла для изготовления заданного числа заготовок согласно производственному плану.

На данном этапе оптимизация раскроя реализуется решением системы линейных уравнений и задачи одномерного раскроя, представленной математической моделью [13]

$$\sum_{j=1}^w L_j \sum_{k=1}^{g_j} x_{jk} \rightarrow \min,$$

при условиях

$$\sum_{j=1}^w \sum_{k=1}^{g_j} y_{ijk} x_{jk} \geq p_i, \quad i = 1, \dots, v, \quad j = 1, \dots, w,$$

$$\sum_{i=1}^v l_i y_{ijk} \leq L_j, \quad i = 1, \dots, v, \quad j = 1, \dots, w,$$

$$x_{jk} \geq 0 \text{ и целые; } y_{ijk} \geq 0 \text{ и целые,}$$

где x_{jk} – число рулонов j -го типа длиной L_j в k -варианте раскроя; y_{ijk} – число заготовок i -типа в k -варианте раскроя j -типа рулона длиной L_j ; j – индекс типа рулонного материала определенных размеров (по ширине и длине) и одной группы (по толщине и марке стали) ($j=1, \dots, w$); i – индекс наименования заготовок одной группы (по толщине и марке стали) ($i=1, \dots, v$); k – индекс варианта раскроя j -типа материала для заготовок одной группы ($k=1, \dots, g$); z – индекс поставщика проката (листа/ рулона) определенных размеров определенной группы (по толщине и марке стали) ($z=1, \dots, r$).

При продольном раскрое необходимо раскроить рулонный прокат шириной $B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_w$ и длиной $L_1, L_2, \dots, L_j, \dots, L_w$, на полосы заданной ширины $b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_v$ ($b_1 > b_2, \dots, \geq b_v$) и в заданном количестве полос p_i ($i=1, 2, \dots, v$). Далее полосы режутся на заготовки шириной b_i и длиной l_i . Количество допустимых вариантов раскроя рулона на полосы зависит от ширины рулона B и количества различных полос v шириной b_1, b_2, \dots, b_v . Соблюдая заданную комплектность, составляются планы раскроя, обеспечивающие минимальное количество разрезаемых рулонов. План раскроя рулона шириной B по возможным вариантам представляется в виде:

$$B_1 = a_{11}b_1 + a_{21}b_2 + \dots + a_{i1}b_i + \dots + a_{v1}b_v + \delta_1;$$

$$B_2 = a_{12}b_1 + a_{22}b_2 + \dots + a_{i2}b_i + \dots + a_{v2}b_v + \delta_2;$$

$$\dots \dots \dots;$$

$$B_k = a_{1k}b_1 + a_{2k}b_2 + \dots + a_{ik}b_i + \dots + a_{vk}b_v + \delta_k;$$

$$\dots \dots \dots;$$

$$B_g = a_{1g}b_1 + a_{2g}b_2 + \dots + a_{ig}b_i + \dots + a_{vg}b_v + \delta_g,$$

где a_{ik} – число полос i -типа в k -варианте раскроя; δ_k – отходы, получаемые в k -варианте раскроя.

В связи с незначительными потерями по длине каждой полосы, образующимися отходами можно пренебречь. Перебором комбинаций величин (a_{1k}, \dots, a_{vk}) с их значениями определяются все потенциальные планы раскроя по ширине рулона:

$$a_{1k} = 0, 1, \dots, \left[\frac{B_k}{b_1} \right];$$

$$a_{2k} = 0, 1, \dots, \left[\frac{B_k - a_{1k}b_1}{b_2} \right];$$

.....;

$$a_{vk} = \left[\frac{B_k - a_{1k}b_1 - \dots - a_{v-1,k}b_{v-1}}{b_v} \right].$$

Согласно условиям задачи, отбираются варианты с минимальными отходами. Формируется оптимальный план раскроя при условии, что x_1, x_2, \dots, x_g – количество распускаемых рулонов по определенному варианту. На начальном этапе решения задачи минимизируется суммарное количество распускаемых рулонов

$$x_1 + x_2 + \dots + x_k + \dots + x_g \rightarrow \min.$$

При этом система ограничений для продольного вида резки металла представляется в виде:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1k}x_k + \dots + a_{1g}x_g \geq [p_1];$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2k}x_k + \dots + a_{2g}x_g \geq [p_2];$$

.....;

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ik}x_k + \dots + a_{ig}x_g \geq [p_i];$$

.....;

$$a_{v1}x_1 + a_{v2}x_2 + \dots + a_{vk}x_k + \dots + a_{vg}x_g \geq [p_v].$$

Для поперечного раскроя рулона (на заготовки разной длины) по аналогии составляются планы раскроя по возможным вариантам и система ограничений, определяется минимальное суммарное количество поперечно разрезаемого проката: $x'_1 + x'_2 + \dots + x'_k + \dots + x'_g \rightarrow \min.$

Для соблюдения транзитной нормы поставки проката учитывается ограничение:

$$\sum G_j x_{jk} \geq T_w,$$

где G_j – масса рулонного проката, кг; T_w – минимальная транзитная норма, кг.

Для реализации третьего этапа оптимального раскроя по критерию оптимизации решается задача построения раскроя для деталей одной группы всех габаритов проката данной марки и толщины с учетом стоимости на разных комбинатах [14]. Расчет продолжается до полного окончания списка листов/рулонов.

Определяются оптимальные планы продольных раскроев всех типоразмеров рулонов заданной группы (по толщине и марке стали) шириной $B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_w$ с определением наилучших планов продольного раскроя и минимального количества разрезаемых рулонов (X_1, X_2, \dots, X_w) каждого типоразмера, для решения задачи поперечного раскроя – соответственно X'_1, X'_2, \dots, X'_w каждого типоразмера.

Далее с учетом стоимости $C_{1z}, \dots, C_{2z}, \dots, C_{jz}, \dots, C_{wz}$ разных габаритов рулонного проката (одной группы) $B_1, \dots, B_2, \dots, B_j, \dots, B_w$ от разных металлургических комбинатов определяется минимум затрат на металл и нахождение минимального значения ресурс-стоимостного показателя (PCП): $RSC \rightarrow \min.$ Для продольного раскроя оцениваются затраты на металл:

$$RSC_j = \begin{pmatrix} C_{11}X_1 & C_{12}X_1 & \dots & \dots & C_{1z}X_1 & \dots & \dots & C_{1r}X_1 \\ C_{21}X_2 & C_{22}X_2 & \dots & \dots & C_{2z}X_1 & \dots & \dots & C_{2r}X_2 \\ \dots & \dots \\ C_{j1}X_j & C_{j2}X_j & \dots & \dots & C_{jz}X_1 & \dots & \dots & C_{jr}X_j \\ \dots & \dots \\ C_{w1}X_w & C_{w2}X_w & \dots & \dots & C_{wz}X_1 & \dots & \dots & C_{wr}X_w \end{pmatrix}$$

Таким образом, для заданной группы рулонного проката определяется значение целевой функции, соответствующее наименьшему значению RSC_j для продольного раскроя и RSC'_j для поперечного раскроя.

Выполняя расчет по изложенному алгоритму для каждой группы рулонного металлопроката и для разных видов раскроя, устанавливается минимальная суммарная оценка всех металлоресурсов на производстве и формируется оптимизированный сортамент.

Далее правильность выбора оптимального варианта раскроя и эффективности резки проверяется определением показателей производительности (при продольной PR_j и поперечной резке PR'_j) и трудоемкости (при продольной TR_j и поперечной резке TR'_j). На данном этапе решается задача максимизации целевой функции – определение наибольшего значения производительности: $PR_j \rightarrow \max, PR'_j \rightarrow \max$. Соответственно, производительность при продольной (PR_j) и поперечной (PR'_j) резке рассчитывается:

$$PR_j = \begin{pmatrix} \frac{N_1V_{p1}}{X_1L_1} & \frac{N_1V_{p2}}{X_1L_1} & \dots & \dots & \frac{N_1V_{ps}}{X_1L_1} & \dots & \dots & \frac{N_1V_{pq}}{X_1L_1} \\ \frac{N_2V_{p1}}{X_2L_2} & \frac{N_2V_{p2}}{X_2L_2} & \dots & \dots & \frac{N_2V_{ps}}{X_2L_2} & \dots & \dots & \frac{N_2V_{pq}}{X_2L_2} \\ \dots & \dots \\ \frac{N_jV_{p1}}{X_jL_j} & \frac{N_jV_{p2}}{X_jL_j} & \dots & \dots & \frac{N_jV_{ps}}{X_jL_j} & \dots & \dots & \frac{N_jV_{pq}}{X_jL_j} \\ \dots & \dots \\ \frac{N_wV_{p1}}{X_wL_w} & \frac{N_wV_{p2}}{X_wL_w} & \dots & \dots & \frac{N_wV_{ps}}{X_wL_w} & \dots & \dots & \frac{N_wV_{pq}}{X_wL_w} \end{pmatrix},$$

$$PR'_j = \begin{pmatrix} \frac{N'_1b_iV'_{p1}}{X'_1L_1} & \frac{N'_1b_iV'_{p2}}{X'_1L_1} & \dots & \dots & \frac{N'_1b_iV'_{ps}}{X'_1L_1} & \dots & \dots & \frac{N'_1b_iV'_{pq}}{X'_1L_1} \\ \frac{N'_2b_iV'_{p1}}{X'_2L_2} & \frac{N'_2b_iV'_{p2}}{X'_2L_2} & \dots & \dots & \frac{N'_2b_iV'_{ps}}{X'_2L_2} & \dots & \dots & \frac{N'_2b_iV'_{pq}}{X'_2L_2} \\ \dots & \dots \\ \frac{N'_jb_iV'_{p1}}{X'_jL_j} & \frac{N'_jb_iV'_{p2}}{X'_jL_j} & \dots & \dots & \frac{N'_jb_iV'_{ps}}{X'_jL_j} & \dots & \dots & \frac{N'_jb_iV'_{pq}}{X'_jL_j} \\ \dots & \dots \\ \frac{N'_wb_iV'_{p1}}{X'_wL_w} & \frac{N'_wb_iV'_{p2}}{X'_wL_w} & \dots & \dots & \frac{N'_wb_iV'_{ps}}{X'_wL_w} & \dots & \dots & \frac{N'_wb_iV'_{pq}}{X'_wL_w} \end{pmatrix},$$

где N_j и N'_j – суммарное количество деталей при продольном и поперечном раскрое минимального суммарного числа рулонов X_j и X'_j соответственно; V_{ps} – максимальная скорость при продольной резке в зависимости от толщины материала м/мин; V'_{ps} – число двойных ходов ползуна/ножевой балки гильотинного оборудования при поперечной резке с учетом подачи (шага резки, равного ширине заготовки b_i при поперечном раскрое), определяемое по паспортным данным в зависимости от типа режущего оборудования и технических характеристик, дв. х./мин., $s=1, \dots, q$.

Далее решается задача минимизации целевой функции – нахождение наименьшего значения трудоемкости: $TR_j \rightarrow \min, TR'_j \rightarrow \min$. Соответственно, трудоемкость при продольной (TR_j) и поперечной (TR'_j) резке на одноименные заготовки определяется:

$$TR_j = \begin{pmatrix} \frac{X_1 L_1}{N_1 V_{p1}} & \frac{X_1 L_1}{N_1 V_{p2}} & \dots & \frac{X_1 L_1}{N_1 V_{ps}} & \dots & \frac{X_1 L_1}{N_1 V_{pq}} \\ \frac{X_2 L_2}{N_2 V_{p1}} & \frac{X_2 L_2}{N_2 V_{p2}} & \dots & \frac{X_2 L_2}{N_2 V_{ps}} & \dots & \frac{X_2 L_2}{N_2 V_{pq}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{X_j L_j}{N_j V_{p1}} & \frac{X_j L_j}{N_j V_{p2}} & \dots & \frac{X_j L_j}{N_j V_{ps}} & \dots & \frac{X_j L_j}{N_j V_{pq}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{X_w L_w}{N_w V_{p1}} & \frac{X_w L_w}{N_w V_{p2}} & \dots & \frac{X_w L_w}{N_w V_{ps}} & \dots & \frac{X_w L_w}{N_w V_{pq}} \end{pmatrix},$$

$$TR'_j = \begin{pmatrix} \frac{X'_1 L_1}{N'_1 b_i V'_{p1}} & \frac{X'_1 L_1}{N'_1 b_i V'_{p2}} & \dots & \frac{X'_1 L_1}{N'_1 b_i V'_{ps}} & \dots & \frac{X'_1 L_1}{N'_1 b_i V'_{pq}} \\ \frac{X'_2 L_2}{N'_2 b_i V'_{p1}} & \frac{X'_2 L_2}{N'_2 b_i V'_{p2}} & \dots & \frac{X'_2 L_2}{N'_2 b_i V'_{ps}} & \dots & \frac{X'_2 L_2}{N'_2 b_i V'_{pq}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{X'_j L_j}{N'_j b_i V'_{p1}} & \frac{X'_j L_j}{N'_j b_i V'_{p2}} & \dots & \frac{X'_j L_j}{N'_j b_i V'_{ps}} & \dots & \frac{X'_j L_j}{N'_j b_i V'_{pq}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{X'_w L_w}{N'_w b_i V'_{p1}} & \frac{X'_w L_w}{N'_w b_i V'_{p2}} & \dots & \frac{X'_w L_w}{N'_w b_i V'_{ps}} & \dots & \frac{X'_w L_w}{N'_w b_i V'_{pq}} \end{pmatrix}.$$

Определение производительности и трудоемкости является, собственно, проверочным расчетом решения поставленной задачи снижения потребления и затрат на металл. Однако, решение задачи оптимального варианта раскроя с максимальной производительностью и минимальной трудоемкостью возможно, как самостоятельное, с трансформацией модели раскроя.

Результаты исследования. Для автоматизированного раскроя листового металлопроката в условиях массового и крупносерийного производства возникла задача создания новой системы классификации деталей. С этой целью проанализирована по различным классификационным признакам номенклатура листоштамповочных деталей (1900 шт.), изготавливаемых в цехах Ульяновского автомобильного завода. По результатам анализа предложен классификатор деталей [15, 16], ставший впоследствии базой для программы по оптимальному раскрою металлопроката «ПРОМ-2013».

На основе классификатора создана и официально зарегистрирована база данных «Кластер деталей ПРОМ-2013» (свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017620130) [17] с учетом требований к ним [18–20]. База данных «Кластер деталей ПРОМ-2013» реализована в рамках реляционной модели данных с помощью Microsoft Office Access, обладающей широким спектром функций: связанные запросы, связь с внешними таблицами и базами данных. Управление всеми данными в разработанной базе данных организовано в одном файле «Кластер деталей ПРОМ-2013». База данных (БД) предназначена для сбора, хранения, систематизации и предоставления оперативной информации о поддетальном раскросе металлопроката с обеспечением быстрого поиска необходимых данных по уникальному коду (пятнадцатизначному числу), соответствующему номеру детали. Вся вводимая информация сохраняется в одиннадцати таблицах. Табличные данные объединены в формах, запросах и отчетах установленными связями, позволяющими контролировать вводимые данные о раскросе, и составляют структуру базы данных (рис. 2).

Информационный фонд БД включает поддетальные технико-экономические показатели раскроя, технологию резки, сведения о раскраиваемом металле, об образующихся отходах и их использовании, деталях-донорах (предоставляющих отход) и деталях-акцепторах (потребляющих отход). В БД организован поддетальный архив карт раскроя с оптимальными результатами расчета. При изменении производственных условий и условий поставки металла из спроектированной БД можно быстро извлечь обновленную «Карту раскроя материала», создаваемую как на раскрой детали из листа/рулона, так и на раскрой остатков.

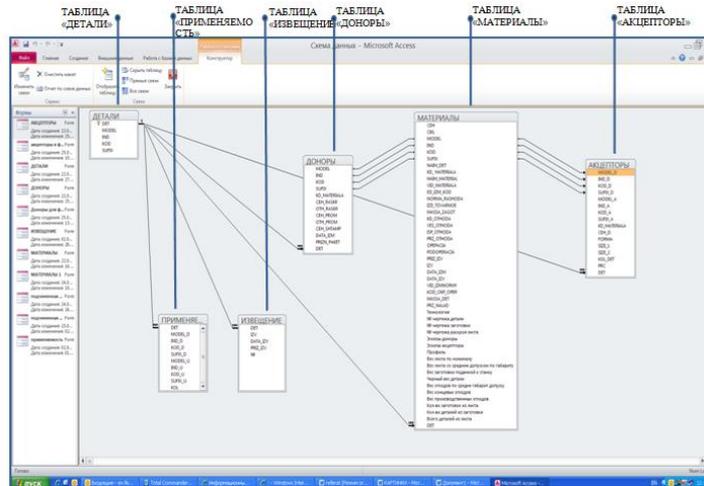


Рис. 2. Структура базы данных «Кластер деталей ПРОМ-2013»

Для решения задач оптимизации раскроя с применением автоматизированного проектирования на основе ресурс-стоимостной оценки металлоресурсов создана новая система. Разработанный программный продукт «ПРОМ-2013» [21, 22] предназначен для проектирования раскроя в условиях крупносерийного и массового производства деталей из листового/ рулонного материала на плоские прямоугольные заготовки с учетом производственных и технологических ограничений и с применением нового показателя оптимизации (РСП). Программа «ПРОМ-2013» официально зарегистрирована (свидетельство о регистрации программы №2016611103) [23] и содержит два интегрированных модуля: выполненных на базе классификаторов действующего производства справочников деталей и материалов (рис. 3), и модуля расчета оптимального раскроя металлопроката с определением нового ресурс-стоимостного показателя [24].

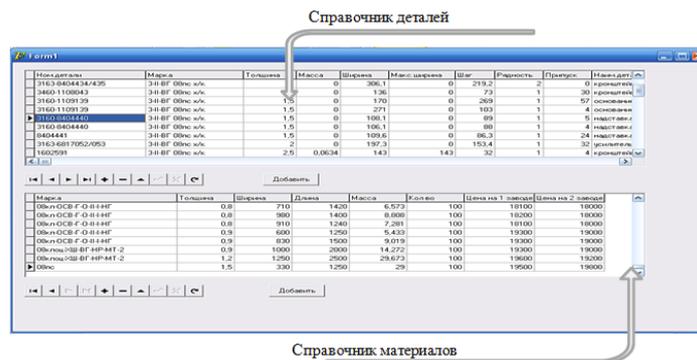


Рис. 3. Фрагмент справочников деталей и материалов

При формировании задания на раскрой по ключевым параметрам толщине и марке материала из справочника материалов выбираются листы (с ценой), и согласно производственному заданию из справочника деталей отбираются детали, изготавливаемые из заданного материала. По окончании формирования задания выполняется расчет, итоговый результат которого представлен на рис. 4.

№ п/п	Размеры	Вес листа	Кол-во дет.	Схема раскроя	Класс	Норма расхода	Затраты по цене листа 1	Затраты по цене листа 2
1	1x1000x2000	15,818	12	продольная	75.9	1,318	20,495	27,022
2	1x1250x2500	24,728	20	поперечная	80.9	1,236	24,852	25,223
3	1x1000x1700	17,518	14	поперечная	78.9	1,231	24,773	25,276
4	1x1200x2600	24,689	20	поперечная	81.0	1,234	24,960	25,430

Project1
Выгодно всего использовать выделенные листы, приобретенные на заводе 1

Рис. 4. Пример итогового результата с определением КИМ и РСР

С использованием существующего подхода к решению задачи раскроя и при расчете по действующему алгоритму технолог выбирает наилучший вариант раскроя по минимальной норме расхода и наибольшему КИМ, соответствующий варианту №4 и решение задачи раскроя на данном этапе считается завершенным. По результатам раскроя согласно усовершенствованному алгоритму в зависимости от критерия оптимизации РСР и с учетом стоимости металла с разных металлургических комбинатов «ПРОМ-2013» предлагает экономически более выгодный вариант раскроя №3 (с наименьшими затратами на одну деталь) с формированием карты раскроя. На раскройной карте (рис. 5) показаны укладка деталей в полосу, схема выполнения сквозных резов с указанием необходимых размеров, численных значений и текстовой информации по раскрою.

С помощью программы «ПРОМ-2013» в составе САПР решаются следующие задачи: экономия металла за счет применения экономико-математических методов при расчете оптимального раскроя листового и рулонного проката; определение экономически и технологически обоснованных норм расхода проката; сокращение сроков подготовки производства новых изделий и повышение производительности труда инженерно-технических работников; снижение трудоемкости нормирования технологических процессов; оперативность раскроя поступившего на замену металла и повышение коэффициента его использования при замене; повышение качества проектных работ и технической документации.

ООО "Ульяновский автомобильный завод" ИД
КАРТА РАСКРОЯ МАТЕРИАЛА
42
Исполнитель: КРОШИТЕЛИ

ЭКСП. ДЕТАЛИ

РАСКРОЙ МЕТАЛЛОПРОКАТА

РАСКРОЙ ЗАГОТОВКИ

1. Разрезать лист на карты в размер 1800x1000мм поперек
2. Разрезать карты на полосы в размер 800x1800мм по заднему углу
3. Разрезать полосы на заготовки в размер 240x800мм по заднему углу

Наименование материала, марка, ГОСТ	Профиль	Ширина листа по наружному размеру	Длина листа по наружному размеру	Норма расхода	Масса детали	Процент отходов	Вес отходов	Класс отходов	Класс отходов по назначению	Класс отходов по использованию	Значение отходов по назначению		
Лист БТ-802 А.С. ПР-О 1800x1000 ГОСТ 18004-80 3.0.БТ-802 ГОСТ 9845-80	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	1,0	17,349	17,518	1,13	1,251	1	0,204	1,319	14	1	14		

Рис. 5. Пример заполнения формы «Детали» - «Карты раскроя материала»

В состав САПР раскроя металлопроката входят программно-методические комплексы (ПМК): «ЛИСТ», «РУЛОН». ПМК «ЛИСТ» и ПМК «РУЛОН» состоят из нескольких функциональных модулей с возможностью работы с одним из мо-

дулей или в комбинации с несколькими модулями при выполнении одного задания на проектирование. На рис. 6 показана схема взаимодействия модулей в системе расчета раскроя. ПМК «ЛИСТ» и ПМК «РУЛОН» (рис. 7) предусматривают работу в режиме подготовки производства и действующего изготовления.

Для расчета планируемого расхода металла с максимальным КИМ и минимальным потреблением предусмотрено два режима на стадии подготовки производства:

- ◆ Расчет группы деталей изделия одного наименования в одном цехе.
 - ◆ Расчет группы деталей изделия одного наименования независимо от цеха.
- Система осуществляет закрепление деталей по цехам с целью оптимального использования отходов и сокращения логистических расходов.



Рис. 6. Схема взаимодействия модулей в системе расчета раскроя



Рис. 7. Подмодули программно-методического комплекса «Рулон»

На стадии изготовления определение фактического расхода проката осуществляется в двух направлениях:

- ◆ Расчет потребности материала по производственному плану (по изделию или поддетальному плану). Этот режим обеспечивает расчет необходимого количества деталей с учетом плана производства изделий, комплектности деталей на заданные изделия и наличия деталей в незавершенном производстве.
- ◆ Оперативный расчет дефицитных деталей при поступлении на раскрой проката с отклонениями от технологии.

Применение полученных результатов. Тестирование нового программного продукта «ПРОМ-2013», в котором реализованы предложенные модель и алгоритм оптимизации раскроя металлопроката проходило на базе ООО «УАЗ». Основой для

тестирования были полученные решения раскроя заготовок для номенклатуры деталей, изготавливаемых в прессовом цехе ООО «УАЗ», при наличии технологических ограничений. Для этого были отобраны заготовки-представители различных видов. Полученные результаты в ходе тестирования (техничко-экономические показатели раскроя: норма расхода, потребность в металле, коэффициент использования материала, критерий оптимизации РСП) сопоставлены с технологическими данными решения раскроя на производстве. Система также протестирована на этапе ТПП новых образцов автомобилей УАЗ-«Patriot» для прогнозирования конкурентоспособности.

Эффективность разработанного алгоритма по оптимизации раскроя с применением ПО «ПРОМ-2013» показана на примере детали «Панель боковины». Предложен экономически более выгодный вариант раскроя в зависимости от показателя РСП с заказом рулонного металлопроката на другом металлургическом комбинате и экономией 36,8 тонн и 1,64 млн. руб. Осуществлен подбор отходов для изготовления других деталей данной группы. Результатом проектирования раскроя с применением «ПРОМ-2013» является формирование карт раскроя для донора и деталей-акцепторов. Общие характеристики этапов проектирования оптимального раскроя приведены в табл. 1 с исчерпывающей информацией, касающейся расчетных и проектных процедур в рамках использования САПР.

Таблица 1

Этапы проектирования раскроя заготовок детали «Панель боковины»

Этапы работ	Эскиз	Фото																																																
<p>1</p> <p>Построение фасонной заготовки по узловым точкам, заданным в координатной форме</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Точка</th> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>1800</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>1800</td><td>1800</td></tr> <tr><td>4</td><td>1500</td><td>1800</td></tr> <tr><td>5</td><td>1500</td><td>1700</td></tr> <tr><td>6</td><td>1300</td><td>1700</td></tr> <tr><td>7</td><td>1300</td><td>1600</td></tr> <tr><td>8</td><td>1000</td><td>1600</td></tr> <tr><td>9</td><td>1000</td><td>1500</td></tr> <tr><td>10</td><td>1000</td><td>1400</td></tr> <tr><td>11</td><td>1200</td><td>1400</td></tr> <tr><td>12</td><td>1200</td><td>1500</td></tr> <tr><td>13</td><td>1300</td><td>1500</td></tr> <tr><td>14</td><td>1400</td><td>1500</td></tr> <tr><td>15</td><td>1400</td><td>1600</td></tr> </tbody> </table>	Точка	X	Y	1	0	0	2	1800	0	3	1800	1800	4	1500	1800	5	1500	1700	6	1300	1700	7	1300	1600	8	1000	1600	9	1000	1500	10	1000	1400	11	1200	1400	12	1200	1500	13	1300	1500	14	1400	1500	15	1400	1600	
Точка	X	Y																																																
1	0	0																																																
2	1800	0																																																
3	1800	1800																																																
4	1500	1800																																																
5	1500	1700																																																
6	1300	1700																																																
7	1300	1600																																																
8	1000	1600																																																
9	1000	1500																																																
10	1000	1400																																																
11	1200	1400																																																
12	1200	1500																																																
13	1300	1500																																																
14	1400	1500																																																
15	1400	1600																																																
<p>2</p> <p>Проектирование оптимальных геометрических размеров заготовки</p> <p>Формирование данных для последующего раскроя проката на заготовку</p>	<p>Данные для раскроя: тип укладки - односторонняя ширина полосы - 1800 мм переноска по шагу - 0 мм по ширине - 0 мм, по длине - 5 мм</p>																																																	
<p>3</p> <p>Составление схемы оптимального раскроя рулона</p>	<p>Концевой притык для получения последней детали - 10 мм Заготовки удаляются на переднее станилирующее устройство, Отходы удаляются в тыл и во фронт. Норма расхода L = 23,050 кг, КПМТ = 0,369.</p>																																																	
<p>4</p> <p>Подбор отходов для изготовления более мелких деталей - рациональное использование металла</p>	<p>Детальные отходы-высечки от отрезки заготовки используются на детали: «Рамка лодки наливной горловины» (масса 0,36 кг) и «Крышка лодки наливной горловины» (масса 0,206 кг), КПМТ - 0,393.</p>																																																	
<p>5</p> <p>Формирование выходного документа - карты раскроя донора</p>																																																		
<p>6</p> <p>Формирование выходных документов - карт раскроя деталей-акцепторов</p>																																																		

Заключение. Разработанные и официально зарегистрированные база данных и программа САПР «ПРОМ-2013», использующие созданные математическую модель и алгоритм, образовали автоматизированную систему проектирования раскроя открытой архитектуры, работающую в режиме технологической подготовки производства и в режиме текущего производства. Программа «ПРОМ-2013» успешно прошла промышленное опробование в ООО «УАЗ» и внедрена в производство в составе автоматизированного рабочего места технолога по раскрою и технологии резки металла с повышением коэффициента использования материала на 3,4–6,8 %, суммарной экономией металла 149 тонн и экономическим эффектом 7,35 млн. рублей, подтвержденным актами внедрения ООО «УАЗ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гимади Э.Х.* О некоторых математических моделях и методах планирования крупномасштабных проектов // Модели и методы оптимизации. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 89-115.
2. *Мухачева А.С., Валеева А.Ф., Картак В.М.* Задачи двухмерной упаковки в контейнеры: новые подходы к разработке методов локального поиска оптимума. – М.: МАИ, 2004. – 193 с.
3. *Мухачева Э.А., Верхотуров М.А., Мартынов В.В.* Модели и методы расчета раскроя-упаковки геометрических объектов. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 216 с.
4. *Липовецкий А.И.* Геометрический подход к вычислению оптимума в задаче прямоугольного раскроя // Тр. Санкт-Петербургского математического общества. – 2007. – Т. 13. – С. 121-142.
5. *Сиразетдинов Т.М.* Проектирование гильотинного раскроя листового и рулонного материала с использованием послонных алгоритмов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12. – Уфа, 2004. – 139 с.
6. *Файзрахманов Р.И.* Оптимизация процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Уфа, 2011. – 139 с.
7. *Фроловский В.Д.* Оптимальное группирование геометрических объектов при проектировании карт раскроя материалов // Программные продукты и системы. – 2000. – № 3. – С. 47-48.
8. *Федорина Е.В., Дьяков И.Ф.* Применение САПР для автоматизации проектирования раскроя // Вестник УлГТУ. – 2023. – № 1 (101). – С. 29-34.
9. *Амбос Э., Нойбауер А., Освальд Ю. и др.* Экономия сырья и материалов. – М.: Металлургия, 1989. – 255 с.
10. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
11. *Мищенко О.В., Федорина Е.В.* Разработка технологических процессов раскроя металлопроката холодноштамповочного производства с использованием прогрессивных методов математического моделирования // Известия МГТУ «МАМИ». Серия «Технология машиностроения и материалы». – 2014. – Т. 2, № 1 (19). – С. 33-35.
12. *Федорина Е.В., Дьяков И.Ф., Мищенко О.В.* Моделирование при оценке металлоемкости продукции // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 47-й научно-технической конференции. Ч. 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – С. 103-106.
13. *Бабаев Ф.В.* Оптимальный раскрой материалов с помощью ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.
14. *Филимонов В.И., Дьяков И.Ф., Мищенко О.В., Федорина Е.В.* Моделирование технологических процессов раскроя металлопроката холодноштамповочного производства // Современные технологии обработки металлов давлением: моделирование, проектирование, производство: материалы международной научно-технической конференции. – М.: Университет машиностроения, 2013. – С. 240-243.
15. *Дьяков И.Ф., Федорина Е.В., Мищенко О.В.* Классификация деталей для моделирования техпроцесса раскроя металлопроката // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 48-й научно-технической конференции. Ч. 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – С. 103-106.

16. Федорина Е.В., Федорина Е.В., Дьяков И.Ф. Кластер номенклатуры листоштамповочных деталей при проектировании раскроя металлопроката // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 203-219.
17. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017620130 Российская Федерация. Кластер деталей «ПРОМ-2013» / Дьяков И.Ф., Федорина Е.В. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет». – № 2016621352; дата поступления 11.10.2016; дата государственной регистрации в Реестре баз данных 1.02.2017. – 81 с.
18. Райан Д. Инженерная графика в САПР. – М.: Мир, 1989. – 391 с.
19. Системы управления базами данных и знаний. – М.: Финансы и статистика, 1991. – 352 с.
20. Хорафас Д., Легг С. Конструкторские базы данных. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
21. Кокорин В.Н., Федорина Е.В., Шакирзянов Р.Ф. Применение программы «ПРОМ-2013» для оценки раскроя металла // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 48-й научно-технической конференции. Ч. 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – С. 74-78.
22. Федорина Е.В., Дьяков И.Ф., Мищенко О.В., Кокорин В.Н. ПРОМ-2013 – Ресурсно-стоимостная оценка эффективности раскроя металлопроката для холодноштамповочного производства // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: Матер. международной научно-технической конференции. – СПб.: БГТУ, 2014. – С. 307-310.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016611103 Российской Федерации. Программа раскроя металлопроката «ПРОМ-2013» / Дьяков И.Ф., Федорина Е.В., Креценова К.А. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет». – №2015661985; дата поступления 8.12.2015; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26.01.2016. – 19 с.
24. Федорина Е.В., Дьяков И.Ф. Автоматизированное проектирование ресурсосберегающих технологий раскроя металлопроката в условиях холодноштамповочного производства металлопроката // Автоматизация и современные технологии. – 2018. – № 7 (72). – С. 307-313.

REFERENCES

1. Gimadi E.Kh. O nekotorykh matematicheskikh modelyakh i metodakh planirovaniya krupnomasshtabnykh proektov [On some mathematical models and methods for planning large-scale projects], Modeli i metody optimizatsii [Models and methods of optimization]. Novosibirsk: Nauka, 1988, pp. 89-115.
2. Mukhacheva A.S., Valeeva A.F., Kartak V.M. Zadachi dvukhmernoy upakovki v konteynery: novye podkhody k razrabotke metodov lokal'nogo poiska optimum [Problems of two-dimensional packaging in containers: new approaches to the development of methods for local search for the optimum]. Moscow: MAI, 2004, 193 p.
3. Mukhacheva E.A., Verkhoturov M.A., Martynov V.V. Modeli i metody rascheta raskroya-upakovki geometricheskikh ob"ektov [Models and methods for calculating cutting and packing of geometric objects]. Ufa: UGATU, 1998, 216 p.
4. Lipovetskiy A.I. Geometricheskii podkhod k vychisleniyu optimuma v zadache pryamougol'nogo raskroya [Geometric approach to calculating the optimum in the problem of rectangular cutting], Tr. Sankt-Peterburgskogo matematicheskogo obshchestva [Proceedings of the St. Petersburg Mathematical Society], 2007, Vol. 13, pp. 121-142.
5. Sirazetdinov T.M. Proektirovanie gil'otinnogo raskroya listovogo i rulonnogo materiala s ispol'zovaniem posloynnykh algoritmov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Design of guillotine cutting of sheet and roll material using layer-by-layer algorithms: cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.12. Ufa, 2004, 139 p.
6. Fayzrakhmanov R.I. Optimizatsiya protsessa raskroya promyshlennykh materialov po kriteriyu minimuma material'nykh poter' pri nalichii tekhnologicheskikh ogranicheniy: dis. ... kand. tekhn. nauk [Optimization of the process of cutting industrial materials according to the criterion of minimum material losses in the presence of technological limitations: cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.01. Ufa, 2011, 139 p.
7. Frolovskiy V.D. Optimal'noe gruppирование geometricheskikh ob"ektov pri proektirovanii kart raskroya materialov [Optimal grouping of geometric objects when designing cutting charts for materials], Programmye produkty i sistemy [Software products and systems], 2000, No. 3, pp. 47-48.

8. *Fedorina E.V., D'yakov I.F.* Primenenie SAPR dlya avtomatizatsii proektirovaniya raskroya [Application of CAD for automation of cutting design], *Vestnik UIGTU* [Bulletin of UISTU], 2023, No. 1 (101), pp. 29-34.
9. *Ambos E., Noybauer A., Osval'd Yu. i dr.* *Ekonomiya syr'ya i materialov* [Saving raw materials and materials]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 255 p.
10. *Romanovskiy V.P.* Spravochnik po kholodnoy shtampovke [Handbook of Cold Forming]. 6th ed. Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1979, 520 p.
11. *Mishchenko O.V., Fedorina E.V.* Razrabotka tekhnologicheskikh protsessov raskroya metalloprokata kholodnoshtampovochnogo proizvodstva s ispol'zovaniem progressivnykh metodov matematicheskogo modelirovaniya [Development of technological processes for cutting cold-forming metal products using advanced methods of mathematical modeling], *Izvestiya MGTU «MAMI». Seriya «Tekhnologiya mashinostroeniya i materialy»* [Proceedings of MSTU "MAMI". Series "Mechanical Engineering Technology and Materials"], 2014, Vol. 2, No. 1 (19), pp. 33-35.
12. *Fedorina E.V., D'yakov I.F., Mishchenko O.V.* Modelirovanie pri otsenke metalloemkosti produktsii [Modeling in assessing the metal consumption of products], *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh: sbornik materialov 47-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [University science in modern conditions: collection of materials of the 47th scientific and technical conference]. Part 1. Ul'yanovsk: UIGTU, 2014, pp. 103-106.
13. *Babaev F.V.* Optimal'nyy raskroy materialov s pomoshch'yu EVM [Optimal cutting of materials using a computer]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 168 p.
14. *Filimonov V.I., D'yakov I.F., Mishchenko O.V., Fedorina E.V.* Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov raskroya metalloprokata kholodnoshtampovochnogo proizvodstva [Modeling of technological processes for cutting cold-forming metal products], *Sovremennye tekhnologii obrabotki metallov davleniem: modelirovanie, proektirovanie, proizvodstvo: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern technologies for metal forming: modeling, design, production: materials of the international scientific and technical conference]. Moscow: Universitet mashinostroeniya, 2013, pp. 240-243.
15. *D'yakov I.F., Fedorina E.V., Mishchenko O.V.* Klassifikatsiya detaley dlya modelirovaniya tekhnoprotsessa raskroya metalloprokata [Classification of parts for modeling the technological process of cutting rolled metal], *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh: sbornik materialov 48-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [University science in modern conditions: collection of materials of the 48th scientific and technical conference]. Part 1. Ul'yanovsk: UIGTU, 2014, pp. 103-106.
16. *Fedorina E.V., Fedorina E.V., D'yakov I.F.* Klaster nomenklatury listoshtampovochnykh detaley pri proektirovanii raskroya metalloprokata [Cluster of nomenclature of sheet metal stamping parts when designing cutting of rolled metal], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society], 2018, No. 1 (25), pp. 203-219.
17. *D'yakov I.F., Fedorina E.V.* Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh №2017620130 Rossiyskaya Federatsiya. Klaster detaley «PROM-2013» [Certificate of state registration of the database No. 2017620130 Russian Federation. Cluster of parts "PROM-2013"]. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ul'yanovsk State Technical University". No. 2016621352; date of admission 10/11/2016; date of state registration in the Database Register 02/1/2017, 81 p.
18. *Rayan D.* *Inzhenernaya grafika v SAPR* [Engineering graphics in CAD]. Moscow: Mir, 1989, 391 p.
19. *Sistemy upravleniya bazami dannykh i znaniy* [Database and knowledge management systems]. Moscow: Finansy i statistika, 1991, pp. 352.
20. *Khorafas D., Legg S.* *Konstruktorskie bazy dannykh* [Design databases]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 224 p.
21. *Kokorin V.N., Fedorina E.V., Shakirzyanov R.F.* Primenenie programmy «PROM-2013» dlya otsenki raskroya metalla [Application of the PROM-2013 program for assessing metal cutting], *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh: sbornik materialov 48-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [University science in modern conditions: collection of materials of the 48th scientific and technical conference]. Part 1. Ul'yanovsk: UIGTU, 2014, pp. 74-78.

22. Fedorina E.V., D'yakov I.F., Mishchenko O.V., Kokorin V.N. PROM-2013 – Resursno-stoimostnaya otsenka effektivnosti raskroya metalloprokata dlya kholodnoshtampovochnogo proizvodstva [PROM-2013 – Resource-cost assessment of the efficiency of cutting rolled metal for cold forming production], *Progressivnye metody i tekhnologicheskoe osnashchenie protsessov obrabotki metallov davleniem: Mater. mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Progressive methods and technological equipment of metal forming processes: Mater. international scientific and technical conference]. Saint Petersburg: BGTU, 2014, pp. 307-310.
23. D'yakov I.F., Fedorina E.V., Kreshchenova K.A. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2016611103 Rossiyskaya Federatsiya. Programma raskroya metalloprokata «PROM-2013» [Certificate of state registration of a computer program No. 2016611103 Russian Federation. Metal cutting program “PROM-2013”]. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Technical University". No. 2015661985; date of admission 12/8/2015; date of state registration in the Register of Computer Programs 01/26/2016, 19 p.
24. Fedorina E.V., D'yakov I.F. Avtomatizirovannoe proektirovanie resursosberegayushchikh tekhnologiy raskroya metalloprokata v usloviyakh kholodnoshtampovochnogo proizvodstva metalloprokata [Automated design of resource-saving technologies for cutting rolled metal in conditions of cold stamping production of rolled metal], *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and modern technologies], 2018, No. 7 (72), pp. 307-313.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Федорина Елена Викторовна – Ульяновский государственный технический университет; e-mail: ev.fedorina@sollers-auto.com; г. Ульяновск, Россия; тел. +79093587646; соискатель ученой степени кандидата наук.

Дьяков Иван Федорович – e-mail: i.dyakov@ulstu.ru; д.т.н.; профессор.

Крупеников Олег Геннадьевич – e-mail: krupennikov_oleg@mail.ru; кафедра инновационных технологий в машиностроении; к.т.н.; доцент.

Fedorina Elena Viktorovna – Ulyanovsk State Technical University; e-mail: ev.fedorina@sollers-auto.com; Ulyanovsk, Russia; phone: +79093587646; applicant for the scientific degree of Candidate of Sciences.

Dyakov Ivan Fedorovich – e-mail: i.dyakov@ulstu.ru; dr. of eng. sc.; professor.

Krupennikov Oleg Gennadievich – e-mail: krupennikov_oleg@mail.ru; the department of innovative technologies in mechanical engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-151-162

В.А. Частикова, Д.А. Любич

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ПОВЕДЕНЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ НАЖАТИЯ КЛАВИШ*

На сегодняшний день причиной большого количества утечек информации является компрометация данных учетных записей. В связи с этим все более актуальной задачей становится внедрение дополнительных средств идентификации и аутентификации. В данной работе на основе методов машинного обучения предложена технология использования динамики нажатия клавиши для идентификации авторизированных пользователей. Для анализа динамики нажатия применяется аппарат глубоких нейронных сетей. В работе проанализированы такие поведенческие характеристики, как время нажатия клавиши, время между нажатиями клавиш, время между отпусканием первой клавиши и нажатием второй. В процессе исследований было предложено использовать следующие архитектуры глубоких нейронных сетей: сверточные и рекуррентные нейронные сети. Первичную обра-

* Работа выполнена в рамках гранта ИБ МТУСИ № 04/22-д.