

УДК 621.002

*А.Н. ШЕЛКОВОЙ*, д-р техн. наук,  
*Л.Б. ШРОН*, канд.техн. наук, *Г.И. ИЩЕНКО*,  
*А.Р. РУЗМЕТОВ*, *М.С. СЕМЧЕНКО*, Харьков, Украина

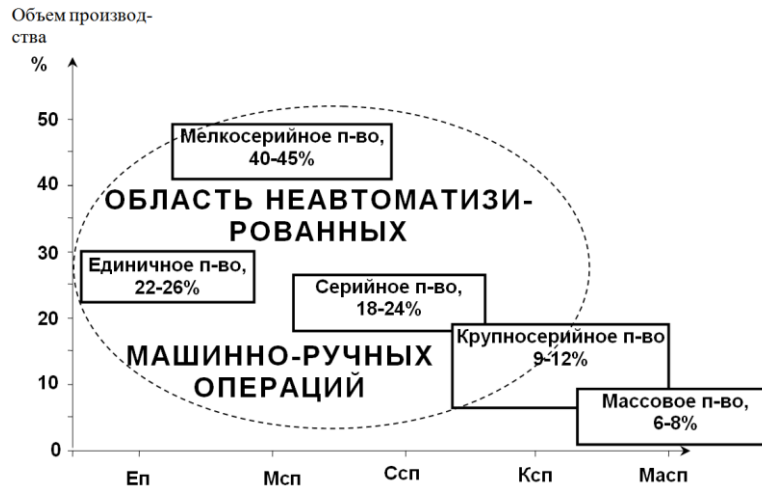
## **К ВОПРОСУ О ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МАШИННО-РУЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ**

У статті приведений опис системи проектування машинно-ручних технологічних операцій (МРТО) обробки металів різанням на основі використання методів імітаційного моделювання. Виконані: постановка завдання, його математичний опис і методика проектування, також наведені результати розрахунку параметрів МРТО для конкретного виду виробництва.

В статье приведено описание системы проектирования машинно-ручных технологических операций (МРТО) обработки металлов резанием на основе использования методов имитационного моделирования. Выполнены: постановка задачи, ее математическое описание и методика проектирования, а так же приведены результаты расчета параметров МРТО для конкретного вида производства.

Description of the system of planning of machine-hand technological operations (МНТО) of treatment of metals cutting on the basis of the use of methods of imitation design is brought in the article. Executed: raising of task, her mathematical description and design technique, and results over of calculation of parameters of МНТО are similarly brought for the concrete type of production.

**Введение.** Машинно-ручные технологические операции (МРТО) в обработке металлов резанием не ушли в небытие с приходом автоматизации во все сферы деятельности машиностроительного производства, а, по-прежнему, составляют существенную долю производственного процесса (рис. 1), [1].



Виды производственных процессов

Рисунок 1 – Соотношение объемов производства для разных видов серійности:  
 Еп - единичное, Мсп - мелкосерийное, Ссп - среднесерийное,  
 Ксп - крупносерийное, Масп - массовое

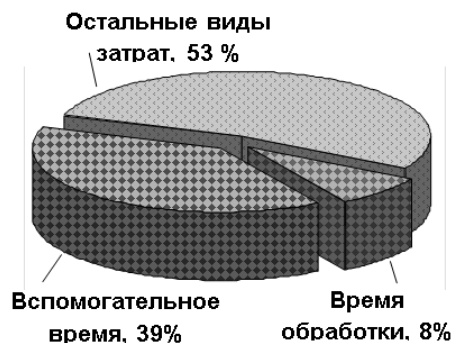
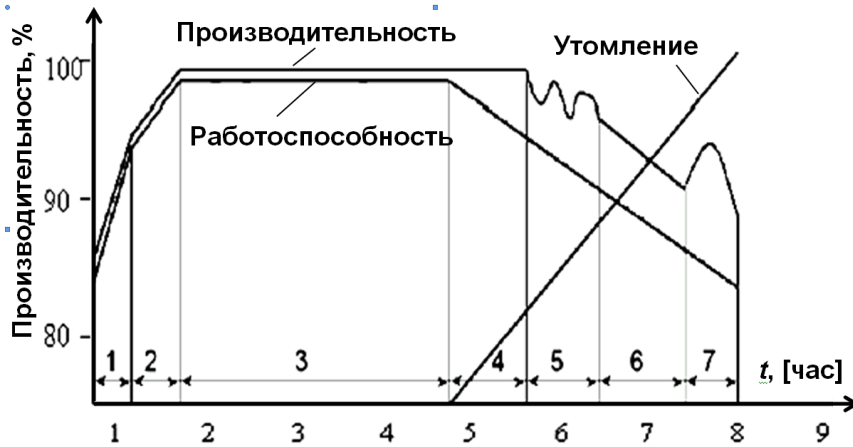


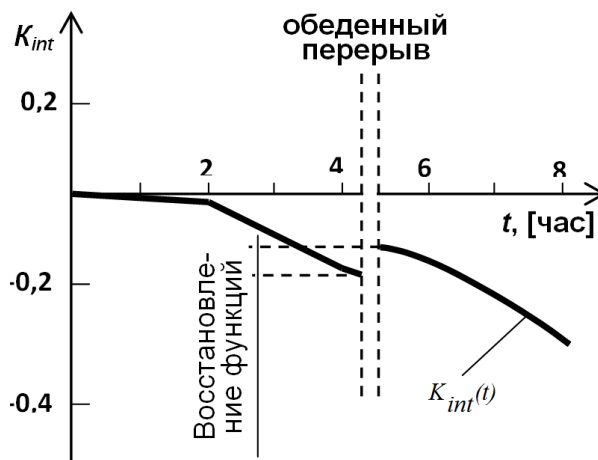
Рисунок 2 – Структура штучного времени для цехов с универсальным металлорежущим оборудованием

При этом в МРТО доля вспомогательного времени может в несколько раз превышать долю основного времени (времени обработки, рис. 2).

Стохастическое изменение работоспособности рабочего с тенденцией к ухудшению его производительности (рис. 3, а), невозможность его функционального восстановления в перерывы (рис. 3, б) являются теми преградами, который мешают точно рассчитать технологические параметры МРТО по аналогии с тем, как это делается для робототехнических комплексов и ГПС.



- А) Типичная кривая работоспособности основного рабочего в течение смены (крупносерийное производство): 1 – экстремное вработывание; 2 – тонкое вработывание; 3 – устойчивая работоспособность; 4 – полная компенсация утомления; 5 – неустойчивая компенсация утомления; 6 – падение продуктивности; 7 – “конечный порыв”



- Б) Кривая работоспособности рабочего на протяжении смены в условиях мелкосерийного производства:

$K_{int}(t)$  – интегральный показатель работоспособности рабочего на непрерывном отрезке времени (гностические функции, мышечная выносливость, двигательная реакция, сила мышц кисти руки)

Рисунок 3 – Человеческие факторы внутренней неопределенности машинно-ручной технологической операции

Поэтому создание системы проектирования МРТО на основе интеграции методов технологического и организационного проектирования сегодня по-прежнему является актуальной задачей.

**Постановка задачи.** Для понимания механизма взаимодействия человека с элементами системы обработки приведем обобщенную схему (рис. 4). Центральное место в ней занимают технологические и вспомогательные переходы, выполняемые в автоматическом и ручном режимах.

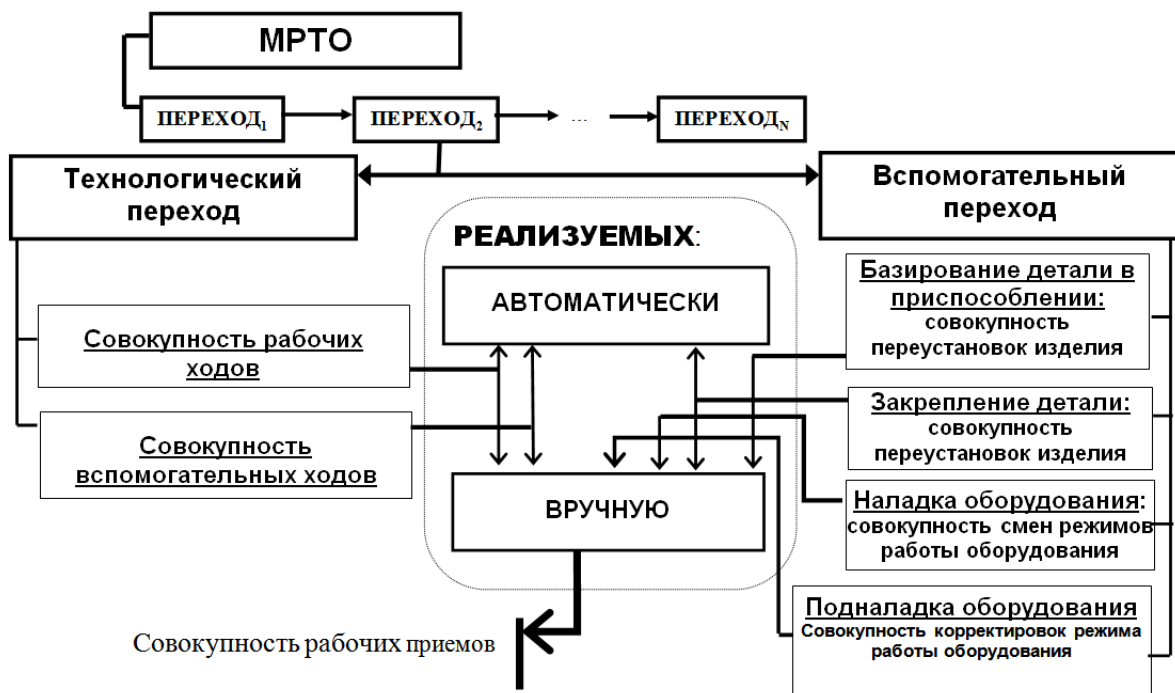


Рисунок 4 – Обобщенная схема внутренней структуры МРТО обработки металлов резанием (по ГОСТ 3.1109-82)

**Математическая модель.** Представим функциональную схему рабочего места станочника (рис. 5, а) в виде граф-дерева (рис. 5, б).

Структура вспомогательных переходов формируется исходя из: структур обрабатываемых и базовых поверхностей, а так же поверхностей, по которым выполняется зажим изделия в приспособлении (рис. 6), схемы управления станком, организационной структуры рабочего места.

Тогда алгоритм последовательности выполнения МРТО можно представить в виде моделирующего алгоритма (1)

$$БЗИ_1BC_1B_1O_2B_3B_4O_5B_6u_7 \begin{matrix} 7 \\ \uparrow \\ 10 \end{matrix} И_8u_9 \begin{matrix} 10 \\ \uparrow \\ 4 \end{matrix} B_{10}O_5u_9 \begin{matrix} 10 \\ \uparrow \\ 4 \end{matrix} B_{12}B_{13}O_{14}B_{15}BC_{16}BC_{17}B_{18}u_{19} \uparrow$$

$$И_{20}B_{18}, \tag{1}$$

где Б – базирование; З – закрепление;  $O_j$  – рабочий ход, где  $j=1 \dots m$  – множество рабочих ходов;  $B_v$  – вспомогательный ход, где  $v=1 \dots b$  – множество вспомогательных ходов;  $H_u$  – наладочные действия по смене инструмента и управлению станком;  $I_i$  – измерения, где  $i=1 \dots n$  – множество исполнительных размеров;  $u_i$  – оператор выбора действия.

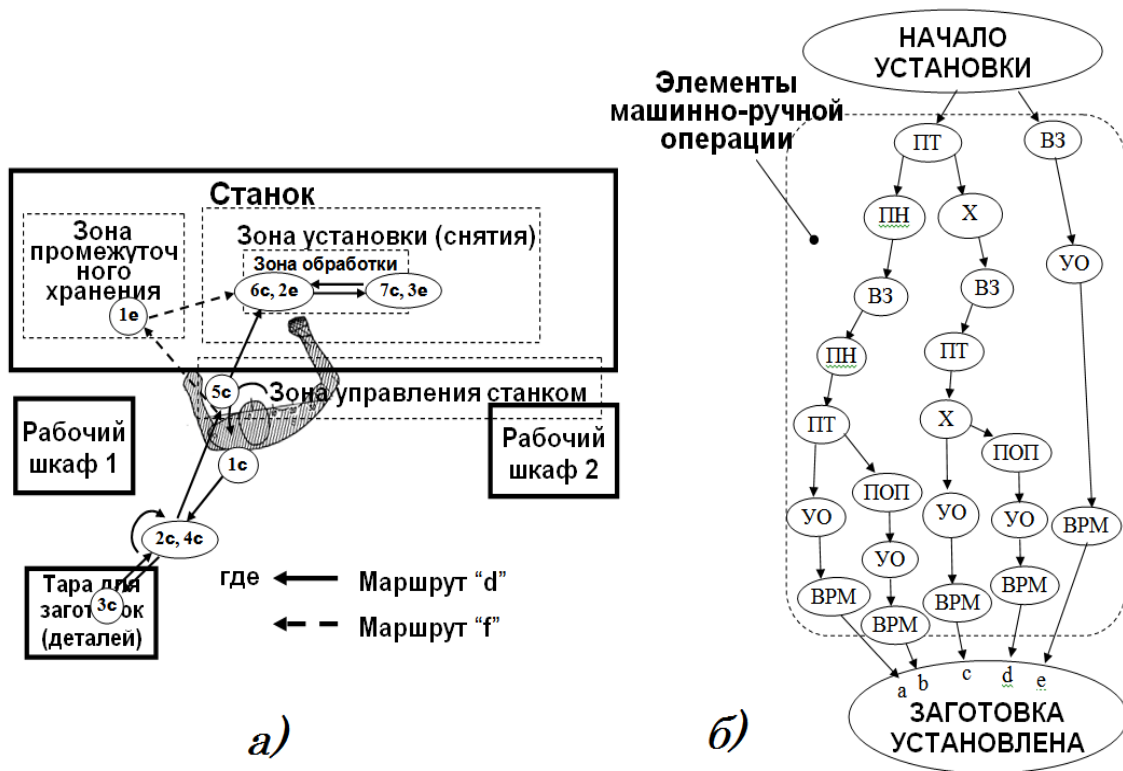


Рисунок 5 – Пример формального представления МРТО

«Установка изделия в патроне с его поджатием задним центром», выполняемой на токарном станке (а) в виде граф-дерева (б):  
 ВЗ - взяться; ВРМ – вращать маховик; ПН – переместить ногу; ПОП – повернуть в пространстве; ПТ - повернуть туловище; УО – установить на вал или в отверстие; Х - идти с предметом

Для его функционирования разработана структурная модель [3], состоящая из: модели роста физического напряжения рабочего при выполнении вспомогательных переходов; модели роста информационного напряжения рабочего при выполнении вспомогательных переходов; модели формирования стереотипов рабочих приемов в виде их структур и последовательностей; модели изменения уровня надежности выполнения МРТО; модели выбора траекторий движения человека в процессе выполнения вспомогательных переходов (рис. 7).

Тогда структуру ограничений на область действия модели МРТО можно представить в виде перечня объектов, входящих в нее и описания их допустимых состояний (2)

$$X_i = \{ \langle \text{name} \rangle \Gamma, M_i^s, M_i^p, M_i^{pr}, T(R) \}, \quad (2)$$

где  $X_i$  - характеристики  $i$ -го объекта МРТО;

$\langle \text{name} \rangle$  – название объекта;

$\Gamma = L \times B \times H = (0,002-10) \times (0,002-5) \times (0,002-5)$ , м – габариты объекта;

$M_{i3}^s, i3 = \overline{1, n3}$  – множество функциональных состояний объектов технологической системы: этапы подготовки, этапы реализации, завершение;

$M_{i4}^p, i4 = \overline{1, n4}$  – множество функциональных частей объекта;

$M_{i5}^{pr}, i5 = \overline{1, n5}$  – множество контактных групп свойств поверхностей:

- по прочности: крошащаяся (0,015-0,05), кгс; хрупкая (0,05-0,5), кгс; ломкая (0,5-3), кгс; прочная  $3 \text{ min}$ , кгс;

- по трению: скользкая поверхность, нормальная поверхность;

- по состоянию поверхности: гладкая, грубая, острая;

- по температуре: нормальная (12 – 45) °С; горячая (46-55) °С; очень горячая (55-120) °С;

$T(R)$  –обозначения диапазонов значений допустимых параметров: расстояния (0-15) м, усилия (0,01 - 30) кгс.

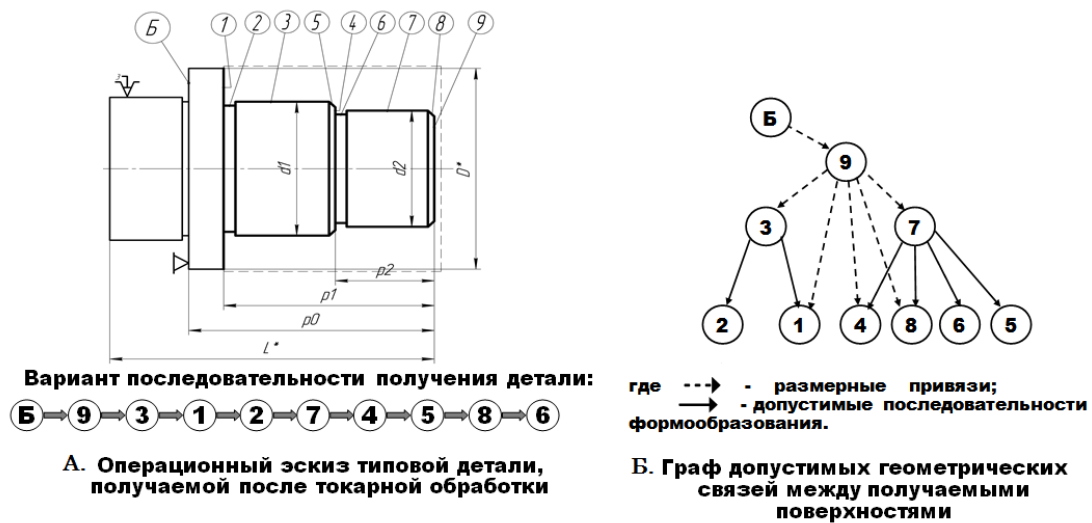


Рисунок 6 – Пример представления структуры обрабатываемых, базовых поверхностей и поверхностей зажима изделия на станке

Переход МРТО из  $i3$ -го состояния в  $i3+1$ -е состояние можно представить в виде (3)

$$m_{i3}^s \wedge \{G_1^i, G_2^i, \dots, G_{j1}^i, \dots, G_{n2}^i\} \rightarrow m_{i3+1}^s, \quad (3)$$

где  $G_1^i, G_2^i, \dots, G_{j1}^i, \dots, G_{n2}^i$  – этапы функциональной активизации объекта  $i$  при его переходе из функционального состояния  $m_{i3}^s$  в состояние  $m_{i3+1}^s$ .

Оценка варианта структуры МРТО ( $Ext_v^j$ ), задействованной для ее выполнения (рис. 5, б), выполняется с учетом ожидаемых суммарных затрат времени на выполнение рабочих приемов ( $Ext_v^j$ ), входящих в нее (4). При этом оптимальным является тот вариант ее структуры, для которой значение  $Ext_v^j$  минимально (4)

$$Ext_v^j = \sum_{v1=1}^{n1} [c_{v1}^j + Ext_{v1}^j] \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $c_{v1}^j$  - относительная составляющая суммарной оценки выполнения рабочего приема;

$Ext_{v1}^j$  - значение оценки структуры МРТО до добавления очередного приема.



Рисунок 7 – Обобщенная структурная модель МРТО [4]

Тогда моделирование процесса формирования структуры МРТО можно представить в виде схемы (рис. 8). В начальный момент времени задается последовательность приемов, которые должен выполнить рабочий при реализации МРТО в сложившихся организационно-технологических условиях на заданном технологическом оборудовании. Оценка эффективности их применения рассчитывается по (4) в соответствии с принятой структурой графа допустимых технологических приемов (например, рис. 5, б).

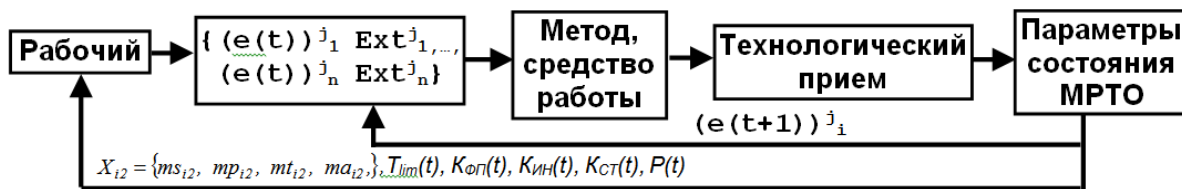


Рисунок 8 – Структурная схема оценки функциональности приемов, используемых в МРТО:  $(e(t))_i^{j_1}$  и  $(e(t+1))_i^{j_1}$  - поправочные коэффициенты оценки выполнения i-го метода работы в j-ой ситуации, в текущий и следующий моменты вспомогательной операции



Для оценки изменения длительности выполнения приемов введен коэффициент коррекции  $e(t)$ , который рассчитывается через определенные промежутки времени (5)

$$(e(t+1))_i^j = (e(t))_i^j + \Delta e_i^j, \quad (5)$$

где  $t$  – момент времени выполнения МРТО, в который производится оценка ее производительности;

$\Delta e_i^j$  – величина коррекции поправочного коэффициента:

$$\Delta e_i^j = k_i^j \cdot Ext_i^j \cdot \frac{(Pr^n)_i^j - (Pr(t))_i^j}{n_i}, \quad (6)$$

где  $(Pr^n)_i^j$  – лимит времени работы  $i$ -го комплекса микроэлементов при выполнении производственного задания в  $j$ -ой ситуации;  $(Pr(t))_i^j$  – длительность выполнения производственного задания:

$$(Pr(t))_i^j = Ke_i \times (Pr^n)_i^j, \quad (7)$$

где  $Ke_i$  – коэффициент эффективности реализации  $i$ -го комплекса микроэлементов, зависящий от запаса времени и объема выполненной работы ( $Ke_i \leq 1$ ;  $Ke_i \rightarrow 0$ ).

**Методика моделирования.** Предложенная математическая модель имитационного моделирования МРТО встроена в систему имитационного моделирования производственной системы на уровне участка (цеха). Она ориентирована на формирование структур и параметров рабочих мест.

Решения этой задачи осуществляется в три этапа (рис. 9): разработка структуры имитационной модели рабочего места; задание начальных условий его моделирования; имитационное моделирование МРТО.

Этот алгоритм реализован в виде системы имитационного моделирования «NORMA» (рис. 10). Она может встраиваться в систему имитационного моделирования производственных систем различной гибкости («GPS»), либо работать автономно.

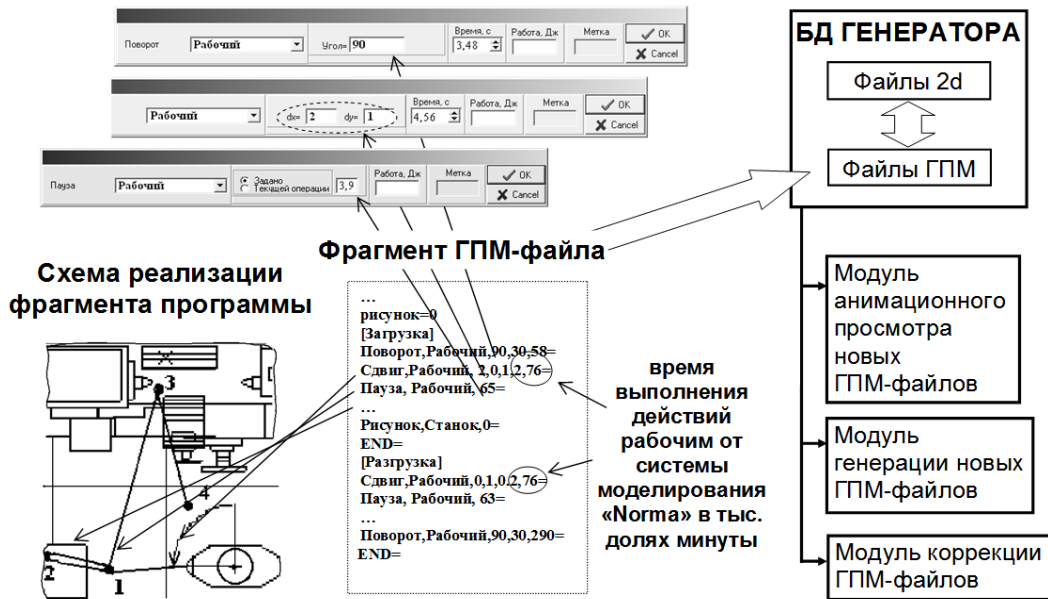


Рисунок 9 – Структура базы данных системы моделирования MPTO [2]

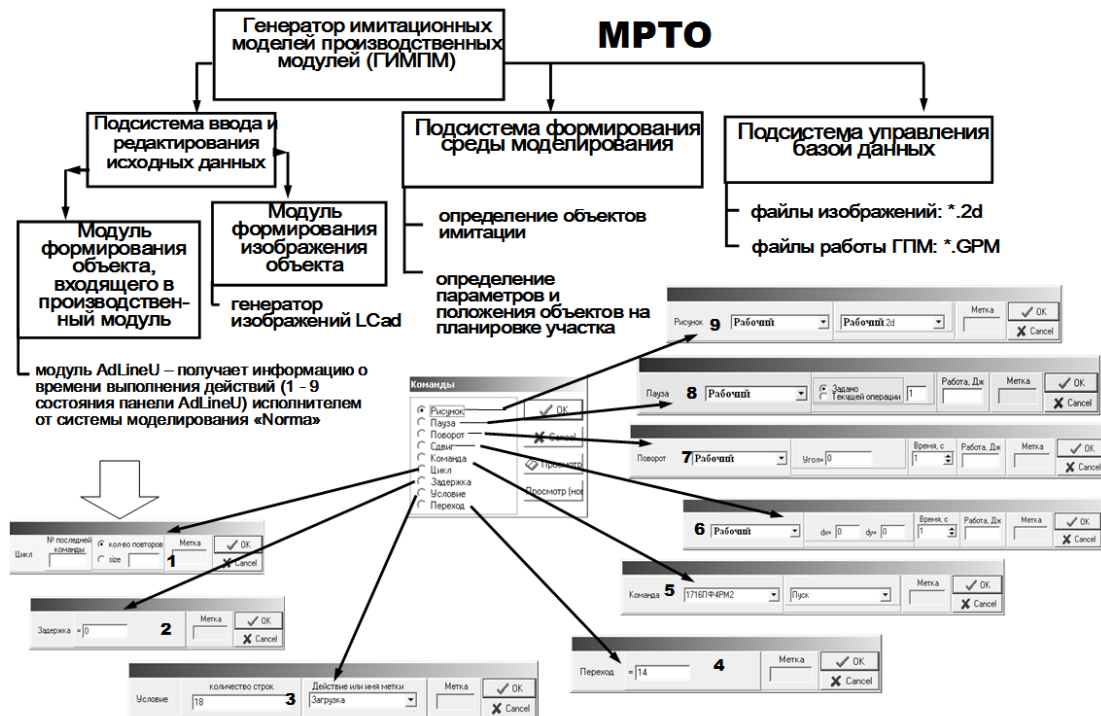


Рисунок 10 – Подсистема имитационного моделирования MPTO «NORMA»

**Результаты моделирования.** Имитационная модель была внедрена на производстве при разработке ремонтного участка цеха предприятия ОАО «Северсталь», Россия, г. Череповец. В ходе исследований было выполнено: нормирование машинно-ручных технологических операций, а также, энергетическая и информационная оценки действующего и модернизированного (рис. 13, б) вариантов технологических процессов.

Был проведен анализ организационно-технологической структуры производственного участка (рис. 11) и рабочих мест станочников (пример на рис. 12).

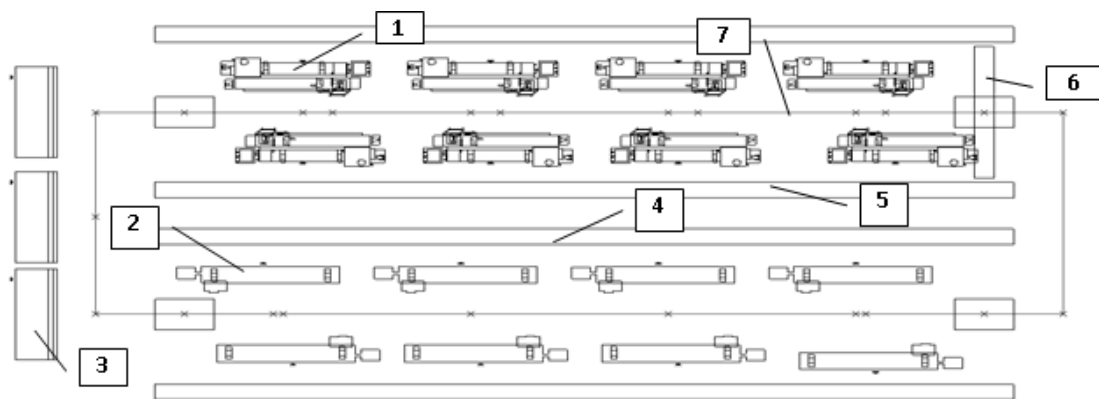


Рисунок 11 – Планировка участка ремонта валков:

- 1 – шлифовальный станок; 2 – токарный станок; 3 – склад изделий;
- 4, 5 – транспортный путь крана; 6 – мостовой кран

Проведено имитационное моделирование одной смены работы участка (рис. 13, а, б), в результате которого выявлена нестабильность загрузки технологических модулей и большая нагрузка на транспортную систему (рис. 13, б), что объясняется некоторой вариативностью технологии ремонта валков в зависимости от степени их износа (рис. 13, а). Это позволило адаптировать технологию восстановления валка под текущие организационно-технологические условия и получить экономический эффект в объеме 25418 гривен.

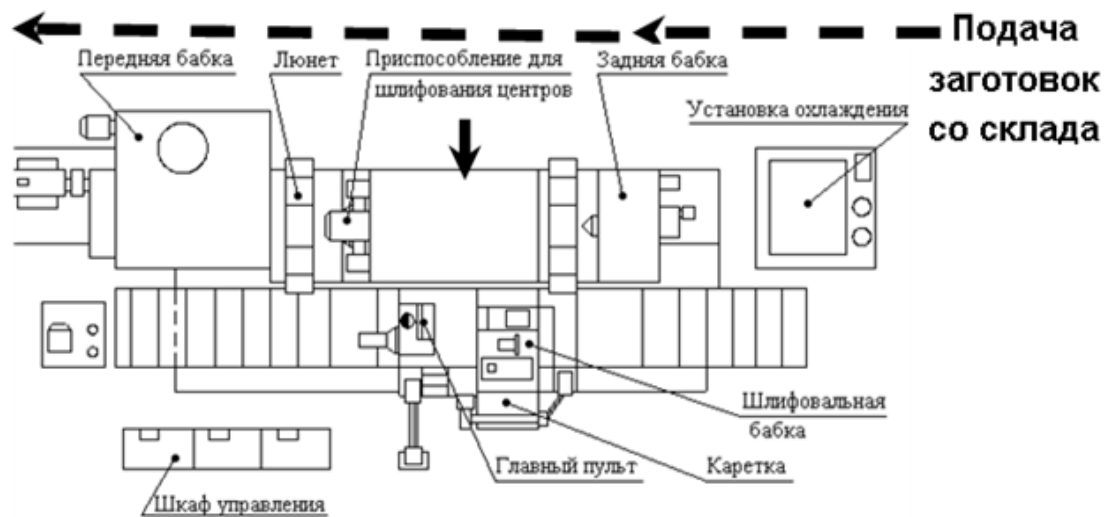
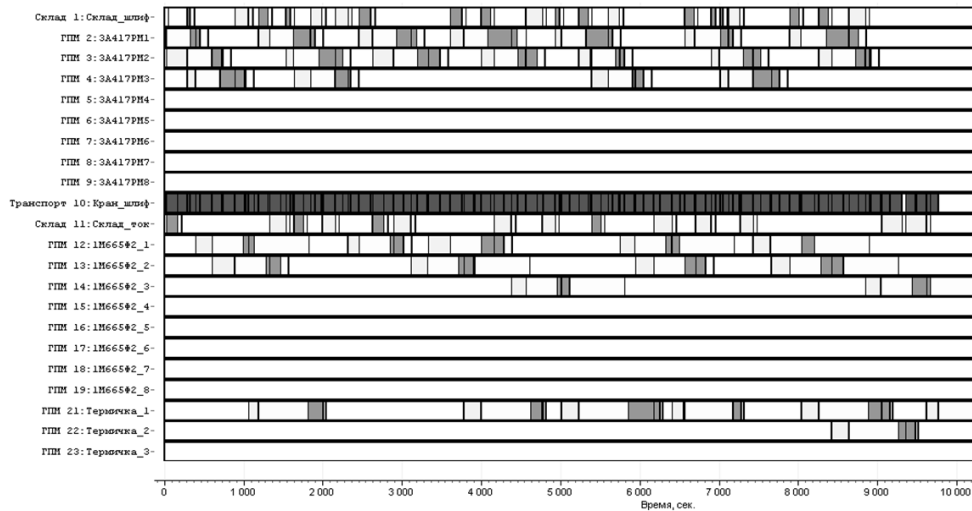
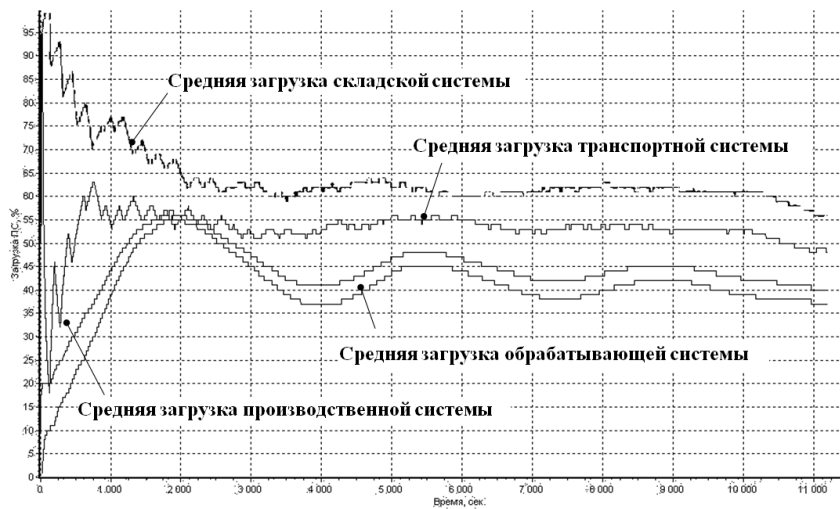


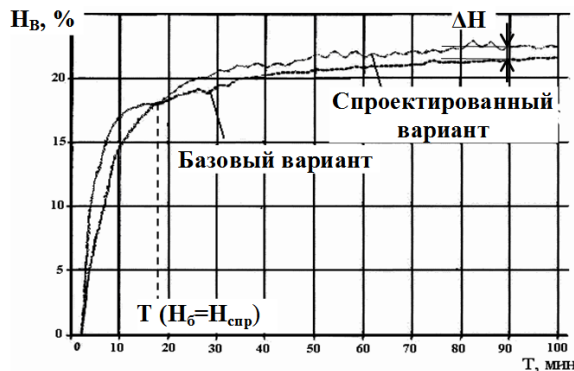
Рисунок 12 – Организация рабочего места шлифовщика



А) Циклограмма работы производственной системы (диаграмма Ганта)



Б) График средней загрузки производственной системы



где  $H_b$  – процент изменения нормы выработки со временем:

$$H_b = \frac{100 \cdot H_{вр}(T_{оп}, T_{обсл})}{100 + H_{вр}(T_{оп}, T_{обсл})}$$

$H_{вр}(T_{оп}, T_{обсл})$  – норма времени, учитывающая время оперативной работы  $T_{оп}$ , и время обслуживания  $T_{обсл}$ .

В) График процентного увеличения нормы выработки рабочего при выполнении МРТО

Рисунок 13 – Фрагмент результатов моделирования работы участка ремонта валков прокатного стана ЛПЦ-2 на ОАО "Северсталь" г. Череповец

**Выводы.**

1. Анализ проблемы сокращения непроизводительных затрат времени в МРТО показал, что основные потери связаны с неэффективным использованием ручного труда.
2. Для прогнозирования и дальнейшего понижения степени влияния человека на эффективность МРТО в системах обработки металлов резанием изучена структура взаимосвязей в ней и выполнена формализация структуры технологического перехода с участием рабочего. Это позволило, используя методы имитационного моделирования, создать математическую модель синтеза рациональных структур вспомогательных операций и переходов, отвечающих заданным организационно-техническим и технологическим условиям их выполнения.
3. Математическая модель синтеза рациональных структур МРТО нашла свою практическую реализацию в виде обобщенной методики ее структурно-параметрического синтеза, которая нашла свое отражение в разработанном и внедренном в производство пакете прикладных программ моделирования организационных и технологических характеристик МРТО «GPS».
4. В результате внедрения методики проектирования организационно-технологической структуры МРТО для формирования организационной структуры участка ремонта валков прокатного стана ЛПЦ-2 в ОАО "Северсталь" г. Череповец, Россия получен экономический эффект 25418 грн.

**Список использованных источников:** 1. Тимофієв Ю.В. Аналітичний підхід до оцінки часових характеристик робочого місця верстатника. / Тимофієв Ю.В., Шелковий О.М., Рузметов А.Р., Концур С.А. // Високі технології в машинобудуванні: моделювання, оптимізація, діагностика: Збірник наукових праць НТУ "ХПІ". Вип. 1(5) - Харків, 2002 р. - С. 370-376. 2. Шелковий О.М. Формат бази знань про об'єкти робітничого середовища обробки металів різанням системи проектування трудового процесу /Шелковий А.Н., Рузметов А.Р. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. - Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – №18. – С. 117-122. 3. Рузметов А.Р. Дослідження змін у тривалості проведення машинно-ручної групової технологічної операції залежно від партійності надходження деталей групи. /Рузметов А.Р. // Вісник Національного технічного

університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2010. - №24 - С. 63-68. 4. Шелковий О.М. Оптимізація маршрутів просторових переміщень у ході реалізації технологічної операції /Шелковий О.М., Рuzметов А.Р., Свидзинская М.Е., Феденюк Д.В. //Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" : науковий збірник – Чернігів: Черніг. держ. технол. ун-т. - 2012. - № 3 (59). – С. 203-208.

**Bibliography (transliterated):** Wear During Hard Machining of AISI H13 Tool Steel. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 293–300 5. Ivester RW, Whinton E, Heigel J (2007) Measuring Chip Segmentation by High-Speed Microvideography and Comparison to Finite-Element Modelling Simulations. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 37–44 6. Fischer C (2007) Runtime and Accuracy Issues in Three Dimensional Finite Element Simulation of Machining Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 45–50. 7. Marusich TD, Usui S, Stephenson DA (2007) Finite Element Modelling of Drilling Processes with Solid and Indexable Tooling in Metals and Stack-ups. Proceedings of the 10th CIRP International 1. Timofiev Ju.V. Analitichnij pidhid do ocinki chasovih karakteristik robochogo miscja verstatnika. / Timofiev Ju.V., Shelkovij O.M., Ruzmetov A.R., Koncur S.A. // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: modeljuvannja, optimizacija, diagnostika: Zbirnik naukovih prac' NTU "HPI". Vip. 1(5) - Harkiv, 2002 r. - S. 370 – 376; 2. Shelkovij O.M. Format bazi znan' pro ob'ekti robotnichogo sere dovishha obrobki metaliv rizannjam sistemi proektuvannja trudovogo procesu /Shelkovij A.N., Ruzmetov A.R. // Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu "Harkivs'kij politehnicnij institut". Zbirnik naukovih prac'. - Harkiv: NTU "HPI".- 2006.- №18. - S. 117-122; 3. Ruzmetov A.R. Doslidzhennja zmin u trivalosti provedennja mashinno-ruchnoї grupovoї tehnologichnoї operacii zalezno vid partionnosti nadhodzhennja detalej grupi. /Ruzmetov A.R. // Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu "Harkivs'kij politehnicnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematicnij vipusk: Tehnologii v mashinobuduvanni. - Harkiv: NTU "HPI". - 2010. - №24- S. 63 – 68; 4. Shelkovij O.M. Optimizacija marshrutiv prostорових переміщень у ході реалізації технологічної операції /Шелковий О.М., Ruzmetov A.R., Svidzinskaja M.E., Fedenjuk D.V. //Visnik Chernigivs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija "Tehnicni nauki" : naukovij zbirnik - Chernigiv: Chernig. derzh. tehnol. un-t. - 2012. - № 3 (59). - S. 203 -208.