

УДК 621.993.2

к.э.н. Зинченко А. М.,
к.т.н. Кучма С. Н.,
Стародубов С. Ю.
(ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАРЕЗАНИИ РЕЗЬБЫ МЕТЧИКОМ

Рассмотрен процесс динамической настройки технологической системы под действием неуравновешенных составляющих силы резания при нарезании резьбы метчиком. Предложен алгоритм имитационной модели взаимодействия метчика с заготовкой, предназначенный для реализации средствами специального программного обеспечения.

Ключевые слова: метчик, динамическая настройка, погрешность резьбы, резьбонарезание, имитационная модель, силы резания.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами

Одним из основных методов получения внутренних резьб является нарезание метчиками. Это объясняется простотой и универсальностью данного метода. Однако непрерывное повышение требований к точности и качеству обработки резьбовых поверхностей вынуждает искать пути его совершенствования.

Известно, что значительную часть в общем балансе точности метода обработки занимает динамическая настройка. Исследование факторов, влияющих на уровень погрешности динамической настройки, позволяет разрабатывать методы её снижения. Вместе с тем для оценки эффективности принимаемых конструкторских и технологических решений необходим инструмент, позволяющий прогнозировать уровень точности обработки резьбы метчиком ещё на этапе проектирования. Традиционно таким инструментом является моделирование.

Моделированию процесса нарезания резьбы метчиком посвящён ряд современных исследований. Так, в работе [1] получена математическая модель скручивания метчика под действием момента сил резания. Модель представлена в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка, позволяющих определить в любой момент времени нагрузку на любом из зубьев, угол скру-

чивания конкретного зуба и время, затраченное на процесс резания. Реализованная средствами математического пакета Maple 7.0, она даёт графическую зависимость угла скручивания метчика от времени его работы. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [2].

Моделирование процесса изменения суммарного статического момента, действующего на метчик, выполнено в работах [3, 4]. Полученная математическая модель, реализованная средствами САПР СПРУТ v1.9, позволила авторам установить связь между величиной угла заборного конуса метчика, силой резания и несущей способностью опорных кромок профиля обработанной резьбы [5].

Модель площади среза единичного зуба метчика приведена в работе [6]. Авторами установлено, что площадь среза единичного зуба определяется не только типом нарезаемой резьбы, но и технологической наследственностью поверхности под резьбу.

Таким образом, обзор литературных источников свидетельствует о наличии различных подходов исследователей к моделированию процесса нарезания резьбы метчиком. Следовательно, данная проблема сохраняет свою актуальность.

Постановка задачи. Вышеприведенный обзор литературных данных свиде-

тельствует о том, что моделирование нарезания резьбы метчиком в настоящее время ведётся в направлении изучения уровня влияния отдельных факторов (жёсткости инструмента, момента сил резания, площади срезаемого слоя) на точность обработки. Такой подход объясняется значительными сложностями разработки строгого математического описания процесса.

В то же время накопленный исследователями материал во многом достаточен для разработки модели, воспроизводящей поведение технологической системы «метчик-заготовка», иначе говоря, имитационной модели нарезания резьбы метчиком. В этом случае конечным результатом моделирования должна стать модель обработанной внутренней резьбы, имеющая теоретически ожидаемый уровень погрешностей и пригодная для исследования и визуализации средствами современного специализированного программного обеспечения.

Учитывая изложенное, целью предлагаемого исследования является разработка алгоритма имитационного моделирования процесса динамической настройки технологической системы «заготовка-метчик».

Достижение указанной цели требует решения следующих задач:

1. Анализа особенностей процесса нарезания резьбы метчиком и выявления факторов, влияющих на точность обработки, оценки их значимости и уровня влияния.
2. Формулирования принципов моделирования и допущений модели.
3. Разработки схемы и математического описания процесса.
4. Составления укрупнённого алгоритма моделирования процесса нарезания резьбы метчиком.

Изложение материала и результаты.

Метчик является осевым многолезвийным инструментом, процесс обработки которым характеризуется следующими особенностями:

- движения формообразования заложены в конструкцию метчика. Главное движение (винтовое) зависит от шага резьбы

метчика, а подача определяется углом заборного конуса;

- процесс нарезания резьбы метчиком чаще всего осуществляется без принудительного осевого перемещения инструмента. При этом шпиндель или суппорт станка отключаются от цепи подач, а метчик закрепляется в плавающем патроне (на малых станках) или в патроне с пружинной компенсацией (на крупных станках) [7];

- обработка ведётся с относительно небольшими скоростями резания: 4...15 м/мин [8].

Из указанных особенностей процесса нарезания резьбы метчиком следует, что геометрические погрешности данного инструмента полностью переносятся на обрабатываемую резьбу и являются систематическими. Вместе с тем, благодаря применению компенсирующего вспомогательного инструмента, геометрические и кинематические погрешности станка практически не влияют на точность обработки. Малые скорости резания позволяют пренебречь влиянием на инструмент и заготовку сил инерции.

На основании вышеизложенного формулируются следующие принципы моделирования процесса нарезания резьбы метчиком:

1. Модель предназначена для изучения поведения замкнутой системы «метчик-заготовка».
2. Моделирование сводится к определению мгновенных относительных положений метчика и заготовки на всём протяжении периода обработки.
3. Изменение относительного положения метчика и заготовки происходит под влиянием неуравновешенной составляющей силы резания, т. е. фактически моделируется процесс динамической настройки технологической системы.
4. Относительное положение метчика и заготовки определяется из условия равновесия системы под действием сил резания и моментов этих сил.

При разработке модели вводятся следующие допущения:

1. Параметры профиля режущей части метчика соответствуют теоретическим значениям. Геометрические погрешности отсутствуют.

2. Влияние станка и приспособлений на изменение относительного положения заготовки и инструмента отсутствует.

3. Заготовка и инструмент считаются абсолютно жёсткими.

4. Поведение системы «заготовка-метчик» исследуется только под действием сил резания и момента, создаваемого приводом станка. Силами трения стружки по передней поверхности инструмента и задней поверхности метчика по обработанной поверхности резьбы пренебрегают.

Следует отметить, что при необходимости по мере совершенствования разрабатываемой модели ряд допущений может быть снят. Например, влияние крутильной жёсткости метчика на точность обработки может быть учтено путём введения в модель данных, полученных в [1, 2].

Для определения относительного положения метчика и заготовки вводится система координат заготовки $XOYZ$ и система координат инструмента $X_1O_1Y_1Z_1$. Система координат инструмента рассматривается как подвижная (рис. 1). Её положение относительно системы координат заготовки определяется геометрическими и кинематическими связями.

Математическое выражение геометрических связей, описывающее номинальное положение метчика относительно заготовки в текущий момент времени, имеет вид:

$$\begin{cases} Y = 0 \\ Z = 0 \\ \varphi = \varphi(t), \\ \psi = 0 \\ \Theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где Y, Z — координаты точки O_1 в системе координат $XOYZ$;

φ, ψ, Θ — углы между координатными осями: $X—X_1; Y—Y_1; Z—Z_1$ соответственно.

$\varphi(t)$ — текущее значение угла поворота метчика вокруг собственной оси (оси X_1).

Текущее положение метчика по оси X определяется из уравнения кинематической связи:

$$X = x_{O_1}(t) = -\frac{P}{2\pi} \cdot \varphi(t) + x_{O_1}(t_0), \quad (2)$$

где $x_{O_1}(t)$ — текущая координата X точки O_1 в системе координат $XOYZ$;

P — шаг резьбы;

$x_{O_1}(t_0)$ — координата X точки O_1 в начальный момент времени t_0 .

Реальный процесс обработки сопровождается погрешностями установки заготовки и статической настройки инструмента. В результате точка O_1 смещается в положение O'_1 , а выражения (1) и (2) приобретают вид:

$$\begin{cases} Y = \pm \delta Y \\ Z = \pm \delta Z \\ \varphi = \varphi(t), \\ \psi = \pm \delta \psi \\ \Theta = \pm \delta \Theta \end{cases} \quad (3)$$

$$X = x_{O_1}(t) = -\frac{P}{2\pi} \cdot \varphi(t) + x_{O_1}(t_0) \pm \delta X, \quad (4)$$

где $\delta X, \delta Y, \delta Z$ — линейное смещение точки O_1 относительно номинального положения;

$\delta \psi, \delta \Theta$ — угловое смещение оси X_1 (собственной оси метчика) относительно осей Y и Z .

Знаки линейных и угловых смещений определяются в соответствии с выбранной системой координат (правой или левой).

Как отмечалось выше, разрабатываемая имитационная модель воспроизводит динамическую настройку технологической системы только под действием сил резания, возникающих на зубцах метчика, и момента M_P , создаваемого приводом станка. С учётом погрешности моделирования условие мгновенного равновесия системы «метчик-заготовка» имеет вид:

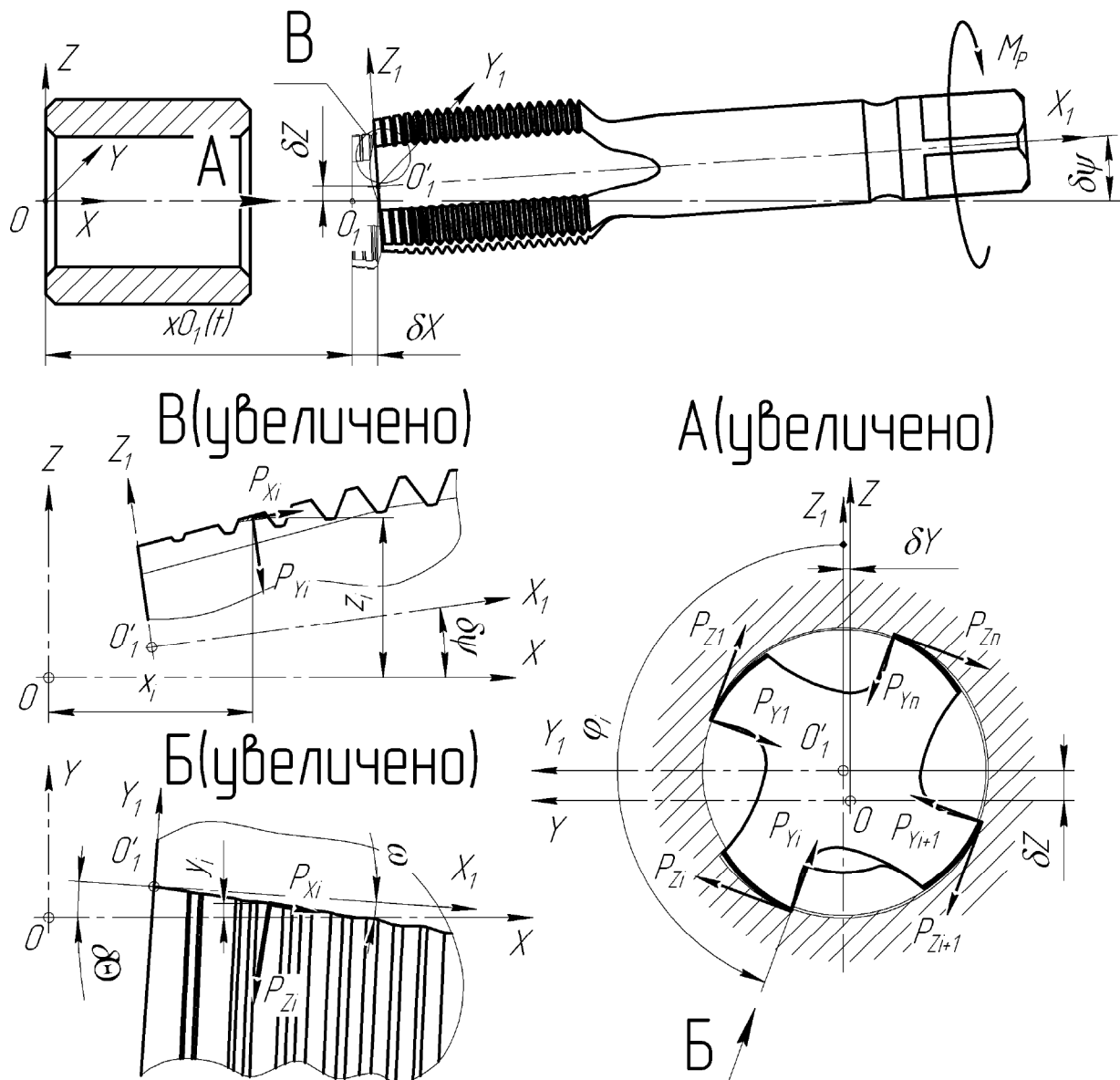


Рисунок 1 Расчётная схема равновесия системы «метчик-заготовка»

$$(5) \quad \begin{cases} \sum P_X \leq \delta P \\ \sum P_Y \leq \delta P \\ \sum P_Z \leq \delta P \\ \sum M_Y \leq \delta M \\ \sum M_Z \leq \delta M \end{cases}$$

где $\sum P_X, \sum P_Y, \sum P_Z$ — суммы проекций составляющих сил резания, действующих на зубьях инструмента, на оси X, Y, Z ;

$\sum M_Y, \sum M_Z$ — суммы моментов сил относительно осей Y и Z ;

$\rho P, \rho M$ — допустимые погрешности определения равновесия системы, соответственно, под действием сил и моментов сил.

Суммы проекций составляющих сил резания определяются по рисунку 1:

$$\sum P_x = \sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{l} (-P_{Zi} \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi_i - P_{Yi} \cdot \sin \varphi_i) \times \\ \times \sin \delta \Theta + \\ + (P_{Zi} \cdot \cos \omega \cdot \sin \varphi_i - P_{Yi} \cdot \cos \varphi_i) \times \\ \times \sin \delta \psi + P_{Xi} \cdot \cos \delta \Theta \cdot \cos \delta \psi \end{array} \right); \quad (6)$$

$$\sum P_Y = \sum_{i=1}^n \left(-P_{Zi} \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi_i - P_{Yi} \cdot \sin \varphi_i \right) \times \cos \delta \Theta + \sum_{i=1}^n P_{Xi} \cdot \sin \delta \Theta; \quad (7)$$

$$\sum P_Z = \sum_{i=1}^n \left(P_{Zi} \cdot \cos \omega \cdot \sin \varphi_i - P_{Yi} \cdot \cos \varphi_i \right) \times \cos \delta \psi + \sum_{i=1}^n P_{Xi} \cdot \sin \delta \psi, \quad (8)$$

где P_{Xi}, P_{Yi}, P_{Zi} — составляющие силы резания на каждом из зубьев метчика;

n — число зубьев метчика, участвующих в резании в рассматриваемый момент времени;

ω — угол наклона стружечной канавки;

φ_i — угловая координата i -го зуба метчика. Её величина определяется из выражения:

$$\varphi_i = \varphi(t) + \frac{i-1}{Z} \cdot \left(2\pi \pm \frac{P \cdot \operatorname{tg} \omega}{D} \right), \quad (9)$$

где Z — число стружечных канавок;

D — наружный диаметр метчика.

Суммы моментов сил согласно рисунку 1, определяются из выражений:

$$\sum M_Y = \sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{l} P_{Yi} \cdot x_i + \\ + P_{Xi} \cdot z_i + \\ + P_{Zi} \cdot \sin(\delta \Theta) \cdot z_i \end{array} \right) \times \cos \omega \cdot \cos \delta \psi; \quad (10)$$

$$\sum M_Z = \sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{l} P_{Zi} \cdot \cos \omega \cdot x_i + \\ + P_{Xi} \cdot y_i + \\ + P_{Yi} \cdot \sin \delta \psi \cdot y_i \end{array} \right) \times \cos \omega \cdot \cos \delta \Theta, \quad (11)$$

где x_i, y_i, z_i — координаты точки, в которой приложены составляющие силы резания.

Блок-схема алгоритма имитационного моделирования динамической настройки технологической системы нарезания резьбы метчиком приведена на рисунке 2.

На начальном этапе (блок 2) задаётся уровень точности моделирования в виде допустимой погрешности определения силовых факторов. Предельные значения начальных погрешностей (блок 3) могут быть определены по известным методикам для погрешностей установки заготовки и статической настройки инструмента. В блоке 4 задаются параметры исследуемого метчика, а в блоке 5 — его исходное (начальное) положение.

После определения исходных данных вычисляются силовые факторы на каждом из зубьев метчика, участвующих в работе (блок 6), затем по формулам (6)—(8), (10), (11) вычисляются результирующие силы и моменты сил, действующие на метчик. Следует отметить, что вычисление силовых факторов целесообразно выполнить в виде самостоятельных программных модулей.

В блоке 8 проверяется условие равновесия метчика (5). Если оно не выполняется, текущим значениям погрешностей δX , δY , δZ , $\delta \psi$, $\delta \Theta$ даются приращения ΔX , ΔY , ΔZ , $\Delta \psi$, $\Delta \Theta$ в направлении действия неуравновешенных сил и моментов. Затем повторяется вычисление силовых факторов с новыми значениями δX , δY , δZ , $\delta \psi$, $\delta \Theta$.

Цикл 6–7–8–9 повторяется до достижения мгновенного равновесия системы «заготовка-метчик».

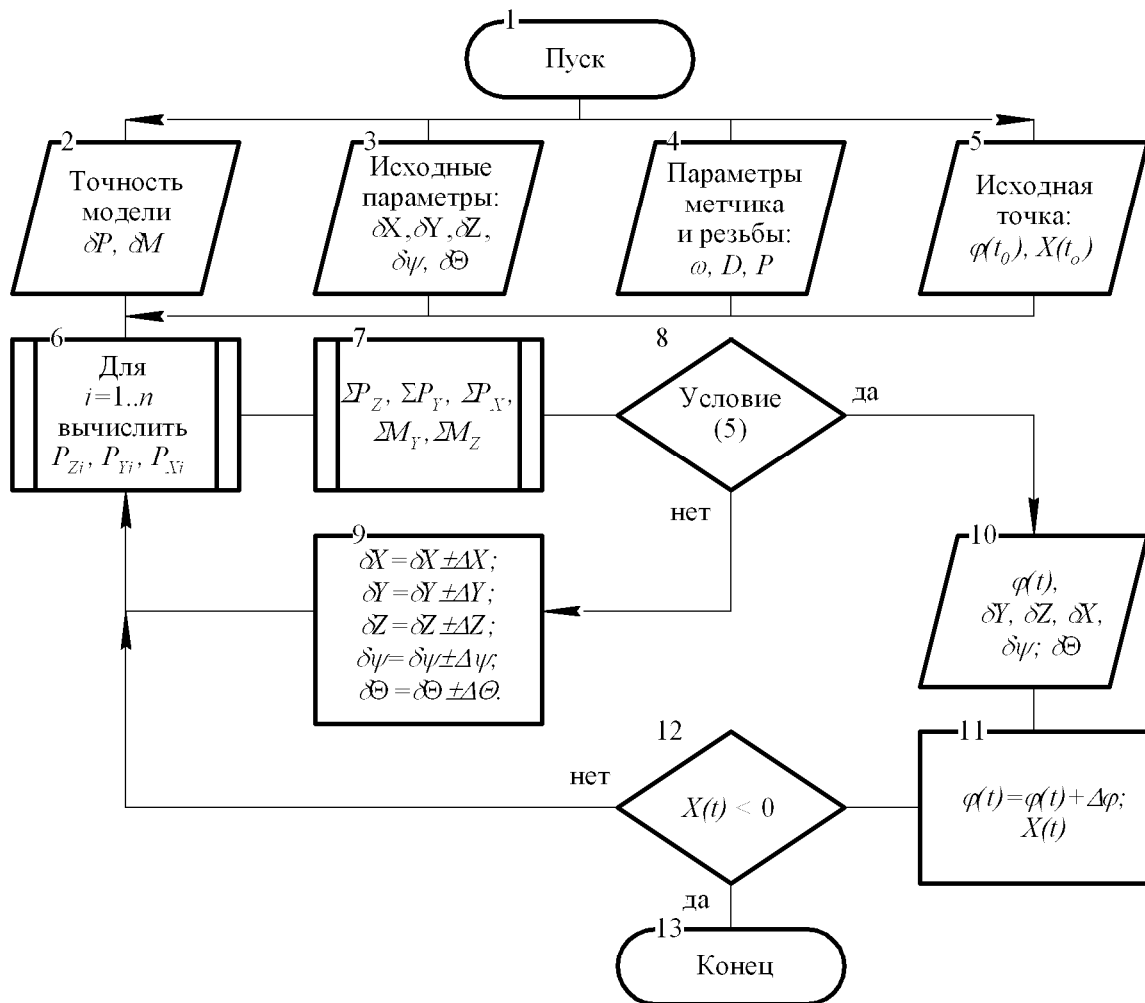


Рисунок 2 Блок-схема алгоритма моделирования динамической настройки технологической системы при нарезании резьбы метчиком

Значения погрешностей, при которых условие (5) для мгновенного значения $\varphi(t)$ выполняется, записывается в результирующий файл. В блоке 11 задаётся приращение угла поворота метчика $\Delta\varphi$ и из уравнения кинематической связи (4) определяется текущее положение метчика по оси X .

Система координат заготовки выбирается таким образом, что при завершении обработки текущее значение координаты метчика X становится отрицательным. Если это условие (блок 12) не выполняется, вновь переходят к расчёту силовых факторов, но с новым значением угла поворота метчика $\varphi(t)$. При достижении условия $X < 0$ моделирование завершается.

Результатом моделирования является файл, содержащий данные о линейных и угловых смещениях метчика под действием сил резания при каждом его последовательном положении. Известно, что погрешности метчика полностью переносятся на обрабатываемую резьбу. Следовательно, полученные данные можно интерпретировать как погрешности резьбы, вызванные динамической настройкой системы «заготовка-метчик».

Выводы и направление дальнейших исследований.

Разработанная имитационная модель формирования динамической погрешности при нарезании резьбы метчиком позволяет получить данные о линейных и угловых

смещениях метчика при всех его последовательных положениях в процессе обработки. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования уровня погрешности резьбы, вызванного влиянием силовых факторов, и оценки эффективности изменения параметров метчика и процесса обработки. Форма представления данных моделирования даёт возможность

визуализировать их средствами САПР.

Вместе с тем для создания специализированного программного обеспечения, реализующего приведенный в работе алгоритм моделирования, необходимо разработать методику определения составляющих силы резания на зубьях метчика, воспроизводящую их непрерывное изменение в процессе обработки.

Библиографический список

1. Новиков, П. А. Математическая модель процесса нарезания внутренних резьб малых диаметров (М2-М6) [Текст] / П. А. Новиков // *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї - наука - виробництво: Тези доповідей П'ятої Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції*. — Суми, 2005. — С. 63–64.
2. Канареев, Ф. Н. Влияние деформаций кручения рабочей части метчиков на точность внутренних резьб малых диаметров (М2...М6) [Текст] / Ф. Н. Канареев // *Вісник СевНТУ: серія Машинобудування та транспорт*. — Севастополь, 2010. — Вип. 111/2010. — С. 81–88.
3. Ананьев, А. С. Моделирование процесса нарезания резьбы метчиком [Текст] / А. С. Ананьев, В. П. Серов // *Известия ВГТУ*. — Волгоград, 2007. — №3(29), Т.1. — С. 8–10.
4. Ананьев, А. С. Силовая модель процесса нарезания резьбы метчиком [Текст] / А. С. Ананьев, В. П. Серов // *Технология машиностроения*. — 2009. — N2. — С. 16–18.
5. Ананьев, А. С. Влияние угла заборного конуса метчика на силу резания и несущую способность опорных кромок профиля резьбы [Текст] / А. С. Ананьев, М. С. Землянский // *Известия ВГТУ*. — Волгоград. — 2010. — №12(72), Вып.6. — С. 6–8.
6. Новиков, П. А. Моделирование площади среза металла при нарезании внутренних малых резьб (М2...М6) [Текст] / П. А. Новиков, Ф. Н. Канареев // *Вісник СевНТУ: серія Машинобудування та транспорт*. — Севастополь, 2014. — Вип.151/2014. — С. 111–114.
7. Маслов, А. Р. Приспособления для металлообрабатывающего инструмента [Текст]: справочник / А. Р. Маслов. — М. : Машиностроение, 2008. — 320 с., ил.
8. Режимы резания металлов [Текст]: справочник / Ю. В. Барановский др.; под ред.: А. Д. Корчемкина. — М. : НИИТавтопром, 1995. — 456 с.

© Зинченко А. М.

© Кучма С. Н.

© Стародубов С. Ю.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. ДонГТУ Зелинским А. Н.,
д.т.н., проф., зав. каф. ТМ ДонНТУ Михайловым А. Н.**

Статья поступила в редакцию 10.01.17.

**к.е.н. Зинченко А. М., к.т.н. Кучма С. М., Стародубов С. Ю. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)
ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО НАСТРОЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ
СИСТЕМИ ПРИ НАРІЗАННІ РІЗЬБИ МІТЧИКОМ**

Розглянуто процес динамічного настроювання технологічної системи під дією неврівноважених складових сили різання при нарізанні різьби митчиком. Запропоновано алгоритм імітаційної моделі взаємодії митчика з заготовкою, призначений для реалізації засобами спеціального програмного забезпечення.

Ключові слова: митчик, динамічне настроювання, похибка різьби, різьбонарізання, імітаційна модель, сили різання.

PhD in Economics Zinchenko A. M., PhD in Engineering Kuchma S. N., Starodubov S. Y. (Don-STU, Alchevsk, LPR)

SIMULATION MODELLING OF DYNAMIC RELOCATION OF TECHNOLOGICAL SYSTEM AT THREAD TAPPING

Process of dynamic relocation of technological system has been studied in response to the unbalanced cutting forces at thread tapping. The imitation model algorithm of interaction between a tap and workpiece is proposed for implementation by means of special software program.

Key words: tap, dynamic relocation, thread error, cutting, imitation model, cutting forces.