

УДК 621.771.01: 621.771.23

Грибков Э. П.  
Переходченко В. А.  
Сорочан Е. Н.

### ИМИТАЦИОННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ НАГРУЗОК В ПРИВОДЕ ГЛАВНЫХ ЛИНИЙ РАБОЧИХ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Повышение требований, предъявляемых к механическому оборудованию прокатных станов делает необходимым изучение статистических закономерностей механизмов их формирования [1, 2]. Весьма немаловажным с точки зрения оценки надежности механического оборудования является и вероятностный анализ спектра рабочих нагрузок, имеющих место при реализации той или иной технологической схемы [3]. Отмеченное, наряду с широкими возможностями вычислительных средств, определило целесообразность использования методов имитационного моделирования, получивших в научно-технической литературе название методов Монте-Карло [4, 5].

Целью работы является создание на основе детерминированных математических моделей, подпрограммы генерирования псевдослучайных равномерно и нормально распределенных чисел, а также алгоритма статистической обработки массивов получаемых данных комплекса имитационных математических моделей, численная реализация которых позволит исследовать вероятностные аспекты различных технологических схем, связанных с производством листового металлопроката [6].

Псевдослучайные равномерно распределенные числа  $c_k$  в диапазоне от нуля до единицы получали, используя машинный оператор RND, а нормально распределенные числа  $\beta_k$  с математическим ожиданием, равным нулю, и средним квадратическим отклонением, равным единице, вычисляли в соответствии с зависимостями, полученными на основе аппроксимации функции ошибок, выполненной автором работы [7], и аппроксимации, расширенного в рамках данного исследования в диапазон  $|c_k - 0,5| > 0,487$  :

$$\beta_k = \left\{ 3 - \sqrt{9 - 12\pi(c_k - 0,5)^2} \right\} / \left\{ (c_k - 0,5)\sqrt{2\pi} \right\} \text{ при } |c_k - 0,5| \leq 0,487 ; \quad (1)$$

$$\beta_k = \frac{|c_k - 0,5|}{(c_k - 0,5)} \left\{ 2,25867 + 57,0256(|c_k - 0,5| - 0,487) \right\} \text{ при } |c_k - 0,5| > 0,487 . \quad (2)$$

Проверка «случайности» получаемых чисел  $c_k$  и  $b_k$ , проведенная по ряду статистических критериев [8], показала хорошее их «качество» и соответствие заданным законам распределения при количестве разыгрываемых вариантов  $K_J = 200$  и более.

Нормально распределенные числа  $x_k$  с заданными значениями математического ожидания  $\bar{x}$  и коэффициента вариации  $v_x$  получали по формуле, вытекающей из правила трех сигм [8]:

$$x_k = \bar{x}(1 - \beta_k v_x) . \quad (3)$$

Непосредственно имитационное математическое моделирование различных технологических схем процесса листопрокатного производства осуществляли путем многократного разыгрывания по формулам (1)–(3) всего комплекса стохастически изменяющихся исходных параметров и последующего определения соответствующих им деформирующих сил, упругих деформаций элементов рабочей клетки, результирующих геометрических характеристик, а также результирующих механических свойств готовой металлопродукции.

В качестве варьируемых, т. е. разыгрываемых исходных параметров при моделировании процесса горячей прокатки относительно толстых листов и полос, следуя логике условий реализации именно данной технологической схемы использовали:

$h_0, b_0, m_0$  – исходную толщину, ширину и массу раската;

$t_i$  – температуру раската в каждом из проходов;

$\sigma_{S0}$  – показатель механических свойств материала прокатываемых листов [6];

$V_{1i}, \tau_{ni}$  – скорость прокатки и протяженность технологической паузы в каждом из проходов;

$S_{0i}$  – величину предварительного межвалкового зазора, учитывающую радиальные биения рабочих и опорных валков, а также возможную погрешность в отработке нажимного механизма рабочей клетки.

В качестве целевой функции в этом случае, т. е. в качестве методики определения силы и момента прокатки, использовали зависимости, полученные В. Ф. Потапкиным на основе метода полей линий скольжения [9], а в качестве алгоритмической схемы определения удвоенного значения сопротивления сдвигу использовали аналитические решения, представленные в работе [6].

При имитационном математическом моделировании процессов прокатки в рабочих клетях с модулем жесткости, отличным от нуля, номинальную величину предварительного межвалкового зазора  $\bar{S}_0$  определяли в рамках нулевой реализации, задаваясь номинальными значениями остальных исходных параметров и требуемым значением конечной толщины готового металлопроката. Дальнейшее варьирование величиной предварительного межвалкового в  $j = 1$  и последующих реализациях, выделяя основные составляющие радиальных биений образующих поверхностей рабочих валков, осуществляли в соответствии с выражением:

$$S_{0j} = \bar{S}_0 - \delta R_1 \cos[2\pi c_{jk}] - \delta R_2 \cos[2\pi c_{j(k+1)}], \quad (4)$$

где  $dR_1, dR_2$  – заданные значения полуразмаха радиального биения образующих поверхностей соответствующих рабочих валков при двухвалковом исполнении и соответствующих опорных валков при четырехвалковом исполнении валкового узла рабочей клетки прокатного стана.

Одной из особенностей рассматриваемых имитационных математических моделей процесса прокатки является возможность учета работы различных по структуре систем автоматического регулирования толщины (САРТ) [10]. В частности, при моделировании работы САРТ в зависимости от текущего значения исходной толщины  $h_{0j}$  окончательное определение величины предварительного зазора в каждой отдельной реализации осуществляли как:

$$S_{0j(CAPT)} = S_{0j} + (P_1 \Big|_{\bar{h}_0, \bar{h}_1} - P_2 \Big|_{h_{0j}, h_1}) / G_{кл}, \quad (5)$$

где  $P_1, P_2$  – значения силы прокатки, имеющие место при номинальном  $h_0$  и разыгранном  $h_{0j}$  значениях исходной толщины полосы в данном проходе.

Зависимости аналогичные (5) были использованы при моделировании работы САРТ по другим каналам возмущения и, в частности, при моделировании работы САРТ толстолистового стана по отклонениям исходной температуры раската. Кроме того, в структуру выражений данного типа могут быть положены и другие функциональные связи между количественными оценками генерируемых возмущающих и расчетных управляемых параметров исследуемых процессов.

В зависимости от возможностей используемой вычислительной техники в качестве подпрограммы определения силы прокатки использовали либо инженерные, либо более трудоемкие численные [6] математические модели соответствующего технологического процесса,

при этом результирующее значение конечной толщины  $h_{1j}$  в рамках каждой отдельной реализации определяли на основе обеспечивающего абсолютную сходимость метода дихотомии. Оценку направления итерационных процедур в этом случае производили по величине расчетного значения силы прокатки  $P_{jt}$  и соответствующего ему значения предварительного валкового зазора  $S_{ojt}^*$ , при этом анализ суммарной величины упругих деформаций элементов рабочей клетки осуществляли с использованием ее обобщенного значения модуля жесткости  $G_{кл}$ . Полученное с учетом изложенного выше аналитическое описание дихотомического подхода имеет следующий вид:

$$h_{1j(t+1)} = (h_{1\min(t+1)} + h_{1\max(t+1)}) / 2;$$

$$h_{1\min(t+1)} = h_{1jt} \text{ и } h_{1\max(t+1)} = h_{1\max t} \text{ при } S_{ojt}^* = h_{1jt} - P_{jt} / G_{кл} < S_{0j};$$

$$h_{1\min(t+1)} = h_{1\min t} \text{ и } h_{1\max(t+1)} = h_{1jt} \text{ при } S_{ojt}^* = h_{1jt} - P_{jt} / G_{кл} > S_{0j}, \quad (6)$$

где  $t$  – порядковый номер очередного цикла используемой итерационной процедуры;

$h_{1\min}$ ,  $h_{1\max}$  – условные значения возможного минимума и максимума при количественном определении конечной толщины полосы  $h_{1j}$  (рис. 1).

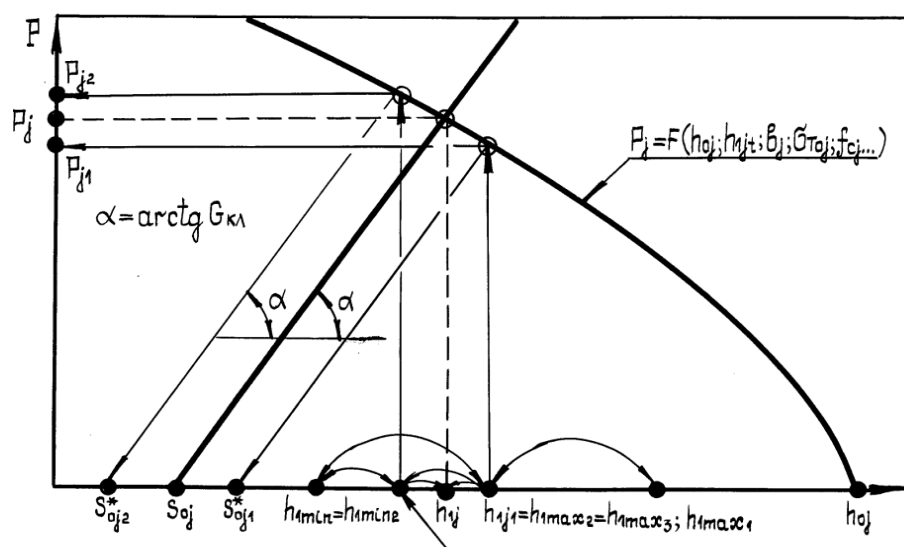


Рис. 1. Графическая интерпретация использования метода дихотомии при итерационном определении конечной толщины полосы  $h_{1j}$  в рамках имитационного математического моделирования процесса прокатки

Непосредственно в процессе имитационного математического моделирования номинальные значения всех исходных параметров не изменяли. Отмеченное по своей сути адекватно предположению о полной отработке обслуживающим персоналом или системой автоматического управления только тех возмущений, вероятностный характер которых не поддается строгому математическому описанию. К таким возмущениям, например, можно отнести изменение величины предварительного межвалкового зазора вследствие износа или разогрева элементов валковой системы, появление отказов или погрешностей в системе управления и так далее. В остальном же, как особенности предыдущего передела, так и наличие логических связей между номинальными значениями основных технологических параметров и их вариациями в предыдущем и последующем технологических циклах при разработке и численной реализации имитационных математических моделей процесса листопрокатного производства были учтены.

Законы распределений исходных параметров, за исключением величины предварительного межвалкового зазора, принимали нормальными, а их номинальные значения и коэффициенты вариации – на основе обобщения известных экспериментальных данных [2, 11].

Обработку массивов, предоставляемых многократными реализациями, значений деформирующих усилий, результирующих геометрических характеристик и результирующих показателей механических свойств производили на основе методов математической статистики, определяя средние выборочные значения, дисперсию, средние квадратические отклонения, коэффициенты вариации, асимметрию, эксцесс, коэффициенты корреляции и выполняя построение расчетных гистограмм распределения (рис. 2) [8].

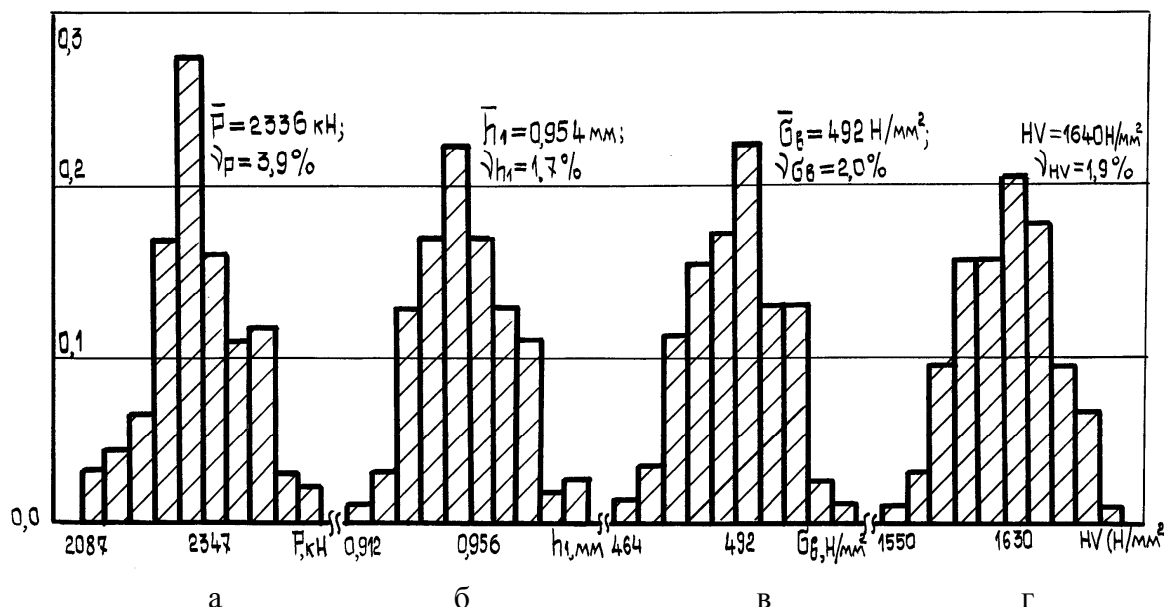


Рис. 2. Расчетные гистограммы распределения силы прокатки  $P$  (а), конечной толщины  $h_1$  (б), предела прочности  $\sigma_B$  (в) и показателя твердости  $HV$  (г), полученные применительно к производству тонких латунных полос ДПНР  $1,0 \times 600$  Л63:

стан  $250/750 \times 800$ ;  $G_{КЛ} = 3500$  кН/мм;  $\delta R = 0,04$  мм;  $\bar{h}_0 = 1,35$  мм;  $v_{h_0} = 1,23\%$ ;  $\bar{f}_C = 0,09$ ;  $v_{\sigma_{T0}} = v_{f_C} = v_{T0} = v_{T1} = 3,0\%$ ;

Касаясь дифференциальных описаний энергосиловых параметров и результирующих геометрических характеристик процессов прокатки необходимо отметить, что полный дифференциал величины момента прокатки  $dM$ , может быть представлен как:

$$dM = \frac{\partial M}{\partial h_0} dh_0 + \frac{\partial M}{\partial h_1} dh_1 + \frac{\partial M}{\partial R} dR + \frac{\partial M}{\partial b} db + \frac{\partial M}{\partial \sigma_{T0}} d\sigma_{T0} + \frac{\partial M}{\partial t} dt + \frac{\partial M}{\partial V_1} dV_1 + \frac{\partial M}{\partial f} df + \frac{\partial M}{\partial T_0} dT_0 + \frac{\partial M}{\partial T_1} dT_1 \quad (7)$$

Аналогично может быть определен также полный дифференциал величины опережения, значение которого необходимо при проектировании приводов и систем автоматического управления технологическими режимами работы прокатных станков [12].

Непосредственно количественное определение передаточных коэффициентов, исходя из возможности их интерпретаций в конечно-разностном виде  $a_{px} = \partial P / \partial x \approx \Delta P / \Delta x$ , может быть осуществлено путем дополнительного расчета силы прокатки при соответствующих приращениях того или иного исходного параметра, т. е.  $a_{px} = [P(x + \Delta x) - P(x)] / \Delta x$ . Точно также могут быть определены и передаточные коэффициенты уравнения (7):

$$a_{px} = [M(x + \Delta x) - M(x)] / \Delta x$$

в качестве целевых функций, предоставляющих количественные оценки силы  $P(j)$ , момента  $M(j)$  и других результирующих характеристик, были использованы численные детерминированные математические модели соответствующих технологических схем процесса прокатки [6].

В качестве примера результатов численной реализации полученных с учетом изложенного выше программных средств в табл. 1 представлены расчетные значения передаточных коэффициентов  $\partial P_i / \partial h_{0(i)}$  и  $\partial M_i / \partial h_{0(i)}$ , имеющих место при холодной прокатке различных типоразмеров на непрерывном четырехклетьевом стане 1700. Из анализа представленных результатов является очевидным, что с уменьшением толщины прокатываемых полос, а также при прокатке полос с более высокими уровнями механических свойств абсолютные значения рассматриваемых передаточных коэффициентов возрастают и возрастают весьма существенно. Абсолютные значения модуля жесткости полосы по отношению к приращению конечной толщины  $\partial P / \partial h_1$ , в самом общем случае, превышают аналогичные значения модуля жесткости по отношению к приращению исходной толщины  $\partial P / \partial h_0$ , при этом с уменьшением толщины  $h_1$  указанная разность возрастает (см. табл. 1). Аналогичная картина имеет место и при прокатке на реверсивных станах, а, это, в свою очередь, свидетельствует о необходимости учета данного фактора при создании самых различных систем автоматического регулирования толщины [10].

Таблица 1

Расчетные значения передаточных коэффициентов, полученные применительно к условиям реализации процесса холодной прокатки на непрерывном стане 1700 ( $b = 1400$  мм ;  $R_j = 300$  мм )

N клетки	$h_{0i}$	$h_{1i}$	$\partial P_i / \partial h_{0i}$	$\partial P_i / \partial h_{1i}$	$\partial M_i / \partial h_{0i}$	$\partial M_i / \partial h_{1i}$
	мм	мм	кН/мм	кН/мм	Нм/мм	Нм/мм
сталь 08кп						
1	2,50	1,55	5 784	-7 431	102 588	-115 962
2	1,55	1,05	5 871	-10 967	119 526	-153 353
3	1,05	0,78	11 255	-17 703	149 521	-175 697
4	0,78	0,70	19 456	-26 601	182 373	-190 878
сталь У8А						
1	2,50	1,55	8 076	-10 534	174 587	-191 984
2	1,55	1,05	8 364	-19 893	188 723	-246 534
3	1,05	0,78	14 853	-39 168	264 015	-335 029
4	0,78	0,70	25 825	-67 389	292 412	-358 866

Для определения закона изменения момента прокатки по длине прокатываемой полосы учитывали гармонический характер изменения толщины подката и его температуры. Для этого разбивали длину полосы  $L$  на конечное множество элементарных объемов и для каждого из них определяли энергосиловые параметры с учетом упругой деформации клетки и характеров изменения толщины и температуры. Также была учтена работа САРТ при прокатке. В качестве примера на рис. 3 представлены расчетные распределения момента прокатки на стане ШСГП 1700 ММК им. Ильича. Данные зависимости позволяют определить в количественном плане влияние работы САРТ на момент прокатки, а также позволяют определить частотные характеристики, необходимые для решения динамических задач для линии привода прокатного стана.

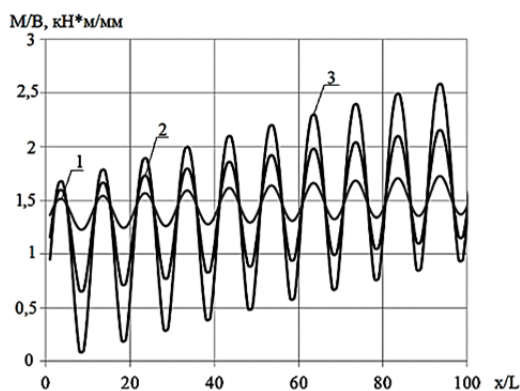


Рис. 3. Распределение приведенного к единице ширины суммарного момента прокатки по длине горячекатаной полосы:

1 – без отработки САРТ; 2 – отработка САРТ на 50 %; 3 – отработка САРТ 100 %; сталь 45;  $h_0 = 3$  мм;  $h_1 = 2,1$  мм;  $t = 900$  °С;  $R = 375$  мм;  $B = 1000$  мм;  $V = 10$  м/с

### ВЫВОДЫ

Разработанный комплекс математических моделей позволяет определять рабочие нагрузки в линиях привода прокатных станов как в статистическом аспекте, так и при заданном характере изменения технологических параметров. Результаты реализации математических моделей могут быть использованы при составлении и решении динамических задач для элементов приводов рабочих клеток листопркатных станов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совершенствование производства холоднокатанной листовой стали / Ю. Д. Железнов [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 232 с.
2. Управление качеством тонколистового проката / В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, Н. Ю. Приходько, А. Н. Яценко. – К. : Техніка, 1997. – 384 с.
3. Носов В. Г. Направления, результаты и перспективы исследований в области производства толстолистового проката / В. Г. Носов // Совершенствование технологии прокатки, термообработки и отделки толстолистового проката. – М. : Металлургия, 1987. – С. 4–11.
4. Бровман М.Я. Современные толстолистовые станы в СССР и за рубежом / М. Я. Бровман. – М. : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1989. – 33 с.
5. Ноговицын А. В. Некоторые тенденции развития непрерывных станов холодной прокатки / А. В. Ноговицын // Сталь. – 1991. – № 2. – С. 46–49.
6. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 244 с.
7. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
8. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М. : Мир, 1975. – 648 с.
9. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос / В. Ф. Потапкин. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 316 с.
10. Филатов А. С. Автоматические системы стабилизации толщины полосы при прокатке / А. С. Филатов, А. П. Зайцев, А. А. Смирнов. – М. : Металлургия, 1982. – 128 с.
11. Мазур В. Л. Повышение достоверности анализа процесса листовой прокатки / В. Л. Мазур, А. К. Голубченко // Сталь, 1991. – № 3. – С. 41–45.
12. А. с. 1311079, СССР, МКИ В 21 В 1/22. Способ прокатки полос между стационарным и приводным рабочим вальцами / В. Ф. Потапкин, И. А. Морозов, В. А. Федоринов, А. В. Сатонин (СССР). – № 3894570; заявлено 08.05.85.

Грибков Э. П. – канд. техн. наук, доц. кафедры АММ ДГМА;

Переходченко В. А. – нач. бюро ПАО «НКМЗ»;

Сорочан Е. Н. – ст. преп. ПГТУ.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.  
 ПАО «НКМЗ» – Публичное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua; ken46@yandex.ua

Статья поступила в редакцию 12.03.2012 г.