

УДК 669

С.А. Аниськин, К.А. Харахнин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛИ СТАНА НЕПРЕРЫВНОЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ В РЕЖИМЕ ПРОХОЖДЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В статье представлена математическая и имитационная модели стана непрерывной холодной прокатки при прохождении в его клетях сварных соединений. Авторами разработан алгоритм пересчета коэффициентов входных параметров матричного уравнения, учитывающий тот факт, что процесс прохождения сварного шва обусловлен изменением основных технологических параметров прокатки. Адекватность математической и имитационной модели проверена на основе порядка сорока наборов экспериментальных данных.

Стан бесконечной холодной прокатки, моделирование, сварной шов, толщина полосы, межклетевое натяжение.

The paper presents the mathematical and imitation models of infinite cold rolling mill when welded junctions pass the stands. The authors have developed an algorithm for recalculation of coefficients of the input parameters of the matrix equation, taking into account the fact that the process of passing the weld is determined by the change of the basic technological parameters of rolling. Adequacy of the mathematical and simulation model is verified with forty sets of experimental data.

Infinite (continuous) cold rolling mill, modeling, weld, strip thickness, interstand tension.

Исследованию процесса холодной прокатки металла посвящены работы [1], [3], [4], [5]. В [5] приведена имитационная модель гидравлической системы управления толщиной полосы. В работе [1] изложены основы теории прокатки и автоматизации непрерывного стана холодной прокатки, где представлены математическая и имитационная модели стана в стационарном режиме работы. В [4] разработана и описана имитационная модель группы чистовых клетей стана горячей прокатки. В [3] рассмотрены общие принципы работы модели реверсивного двухклетевого стана. В [2] представлена модель механической части двух смежных клетей непрерывного стана холодной прокатки. Анализ известных работ показывает, что большинство из них [1] – [5] посвящены исследованию процесса холодной прокатки в стационарном режиме. Вопросы моделирования процесса прокатки при прохождении сварных соединений не рассматриваются. Таким образом, разработка адекватной модели стана непрерывной холодной прокатки в режиме прохождения сварных соединений является актуальной.

Из [1] известна математическая модель клетки в стационарном режиме, согласно которой модель многоклетевого стана можно получить путем объединения математических моделей нескольких клетей. При этом нахождение передаточных функций для разных входов такой системы можно свести к операциям над матрицами передаточных функций отдельных клетей стана. Переменными входными параметрами математической модели прокатной клетки будут являться заднее и переднее натяжения прокатываемой полосы, толщина прокатываемой полосы

на входе и на выходе клетки, скорость полосы на выходе из текущей и последующей клетей, управляющее напряжение «эквивалентного» электродвигателя, а также положение гидронажимного устройства прокатной клетки. Параметры (толщина полосы на выходе из клетки, переднее натяжение полосы, скорость полосы на выходе из текущей клетки) являются выходными параметрами модели клетки, так как они определяют прямую связь клетей через прокатываемую полосу.

Математическая модель прокатной клетки представляется в виде выражения (1) [1]:

$$\begin{pmatrix} \Delta V_i(p) \\ \Delta H_{fi}(p) \\ \Delta T_{fi}(p) \end{pmatrix} = W_{fi}(p) * \begin{pmatrix} \Delta H_{bi}^*(p) \\ \Delta T_{bi}(p) \\ \Delta U_i(p) \\ \Delta d_i(p) \\ \Delta V_{i+1}(p) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где Δ обозначает отклонение значения параметра прокатки от заданного значения, p – комплексная переменная, V_i – скорость полосы на выходе из клетки i , H_{fi} – толщина полосы на выходе из клетки i , T_{fi} – переднее натяжение клетки i , T_{bi} – заднее натяжение клетки i , U_i – управляющее напряжение «эквивалентного» электродвигателя клетки i , d_i – положение гидронажимного устройства прокатной клетки i , V_{i+1} – скорость полосы на выходе из клетки $i+1$, H_{bi}^* – толщина прокатываемой полосы на входе в i -ю клеть

с учетом транспортной задержки, обусловленной расположением толщиномера в середине межклетевого промежутка:

$$\Delta H_{bi}^*(p) = \Delta H_{bi}(p) * e^{-\tau_{si} * p},$$

где H_{bi} – толщина прокатываемой полосы на входе в i -ю клеть, τ_{si} – время транспортной задержки прокатываемой полосы металла при движении от $i - 1$ клетки до i -й клетки, s ; $W_{fi}(p)$ – матрица передаточных функций с коэффициентами i -й прокатной клетки:

$$W_{fi}(p) = C_{2i}^{-1} \cdot C_{1i} =$$

$$= \begin{pmatrix} W_{H_{bi}V_i}(p) & W_{T_{bi}V_i}(p) & W_{U_iV_i}(p) & W_{d_iV_i}(p) & W_{V_{i+1}V_i}(p) \\ W_{H_{bi}H_{fi}}(p) & W_{T_{bi}H_{fi}}(p) & W_{U_iH_{fi}}(p) & W_{d_iH_{fi}}(p) & W_{V_{i+1}H_{fi}}(p) \\ W_{H_{bi}T_{fi}}(p) & W_{T_{bi}T_{fi}}(p) & W_{U_iT_{fi}}(p) & W_{d_iT_{fi}}(p) & W_{V_{i+1}T_{fi}}(p) \end{pmatrix},$$

где $W_{H_{bi}V_i}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние толщины полосы на входе в клеть i на скорость полосы на выходе из клетки i , $W_{H_{bi}H_{fi}}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние толщины полосы на входе в клеть i на толщину полосы на выходе из клетки i , $W_{H_{bi}T_{fi}}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние толщины полосы на входе в клеть i на переднее натяжение клетки i , $W_{T_{bi}V_i}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние заднего натяжения клетки i на скорость полосы на выходе из клетки i , $W_{T_{bi}H_{fi}}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние заднего натяжения клетки i на толщину полосы на выходе из клетки i , $W_{T_{bi}T_{fi}}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние заднего натяжения клетки i на переднее натяжение клетки i , $W_{U_iV_i}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние напряжения электродвигателя клетки i на скорость полосы на выходе из клетки i , $W_{U_iH_{fi}}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние напряжения электродвигателя клетки i на толщину полосы на выходе из клетки i , $W_{U_iT_{fi}}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние напряжения электродвигателя клетки i на переднее натяжение клетки i , $W_{d_iV_i}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние зазора валков клетки i на скорость полосы на выходе из клетки i , $W_{d_iH_{fi}}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние зазора валков клетки i на толщину полосы на выходе из клетки i , $W_{d_iT_{fi}}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние зазора валков клетки i на переднее натяжение клетки i , $W_{V_{i+1}V_i}(p)$ – передаточная функция,

описывающая влияние скорости полосы на выходе из клетки $i+1$ на скорость полосы на выходе из клетки i , $W_{V_{i+1}H_{fi}}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние скорости полосы на выходе из клетки $i+1$ на толщину полосы на выходе из клетки i , $W_{V_{i+1}T_{fi}}(p)$ – передаточная функция, описывающая влияние скорости полосы на выходе из клетки $i+1$ на переднее натяжение клетки i , C_{1i} – матрица коэффициентов входных параметров матричного уравнения (1) i -й прокатной клетки, C_{2i} – матрица коэффициентов выходных параметров матричного уравнения (1) i -й прокатной клетки;

$$C_{1i} = \begin{pmatrix} c_{1,1i} & c_{1,2i} & c_{1,4i} & c_{1,5i} & c_{1,8i} \\ c_{2,1i} & c_{2,2i} & c_{2,4i} & c_{2,5i} & c_{2,8i} \\ c_{3,1i} & c_{3,2i} & c_{3,4i} & c_{3,5i} & c_{3,8i} \end{pmatrix}$$

$$C_{2i} = \begin{pmatrix} -c_{1,3i} & -c_{1,6i} & -c_{1,7i} \\ -c_{2,3i} & -c_{2,6i} & -c_{2,7i} \\ -c_{3,3i} & -c_{3,6i} & -c_{3,7i} \end{pmatrix},$$

где $c_{1,1i} \dots c_{3,8i}$ – коэффициенты матричного уравнения для i -й прокатной клетки стана холодной прокатки, определяемые через частные дифференциальные уравнения для усилия прокатки на валки прокатной клетки, уравнения динамики «эквивалентного электродвигателя» и уравнения, учитывающего упругость прокатываемой полосы [1].

Математическая модель стана непрерывной холодной прокатки в стационарном режиме [1] не может быть применена для описания режима прохождения сварных соединений, так как процесс прохождения шва обусловлен изменением заданных значений следующих технологических параметров: толщина полосы, межклетевое натяжение, усилие прокатки, скорость вращения валков. Для ее реализации необходимо представить матрицу передаточных функций (1) с переменными во времени коэффициентами этого матричного уравнения. Следовательно, необходима матрица передаточных функций, изменяющихся во времени. На рис. 1 представлена структура имитационной модели одной клетки. На схеме блоки W11(p) – W35(p) представляют матрицу передаточных функций прокатной клетки, как описано в уравнении (1). Блок “Recalculation OPFs” выполняет пересчет коэффициентов матричного уравнения (1), вследствие чего происходит постоянное изменение операторных функций W11(p) – W35(p). Блок “Recalculation OPFs”, как и вся имитационная модель, реализован в программной среде Matlab 13.0. Он вызывает на выполнение каждые 0,01 с m -функцию, передавая в нее в качестве аргументов основные параметры процесса прокатки: усилие клетки, толщина полосы на входе в клеть, толщина полосы на выходе из клетки, заднее и переднее натяжение полосы, скорость полосы на выходе из клетки, скорость вращения валков прокатных клетей.

На рис. 2 представлен алгоритм m -функции. В первую очередь, каждые 0,01 с мы получаем текущие значения основных технологических параметров: толщина полосы на выходе из клетки (H_{fi}), заднее (T_{bi}) и переднее (T_{fi}) натяжение полосы, толщина полосы на входе в клетку (H_{bi}), усилие прокатки (P_i), скорость полосы на выходе из клетки (V_i). Затем начинается расчет усилия прокатки по формуле Целикова (P_{i_calc}) [1]. Он выполняется с обнуления переменной цикла j и ведется до тех пор, пока P_i не

станет близко совпадать с P_{i_calc} . После цикла расчета усилия прокатки вычисляются частные производные для расчета технологических коэффициентов. Далее вычисляются технологические коэффициенты и коэффициенты матричного уравнения $c_{1,li} \dots c_{3,8i}$. На последнем шаге алгоритма составляются матрицы передаточных функций, описывающих прокатные клетки, и передаются в среду Simulink в реальном времени.

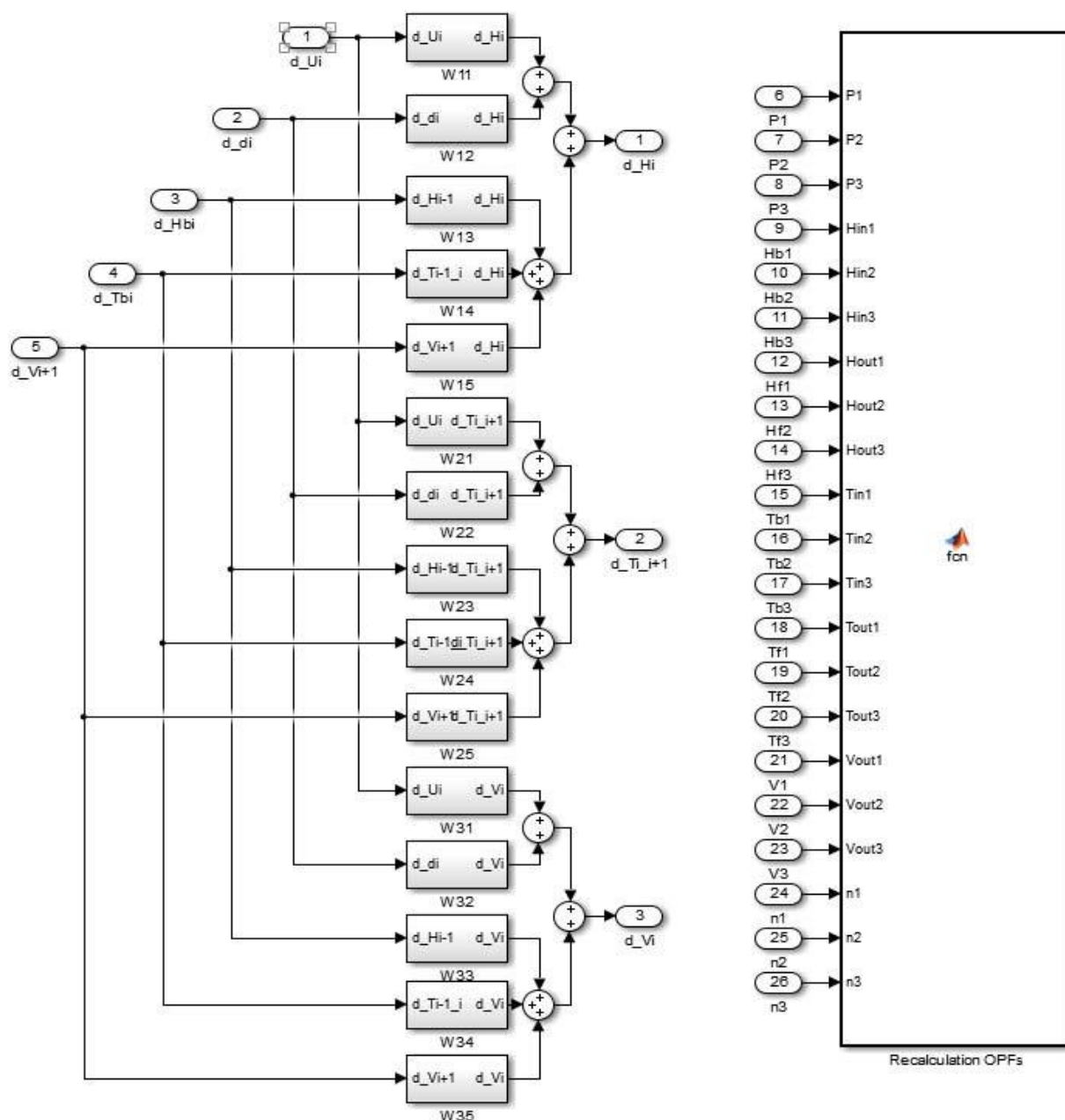


Рис. 1. Структура общей имитационной модели стана холодной прокатки

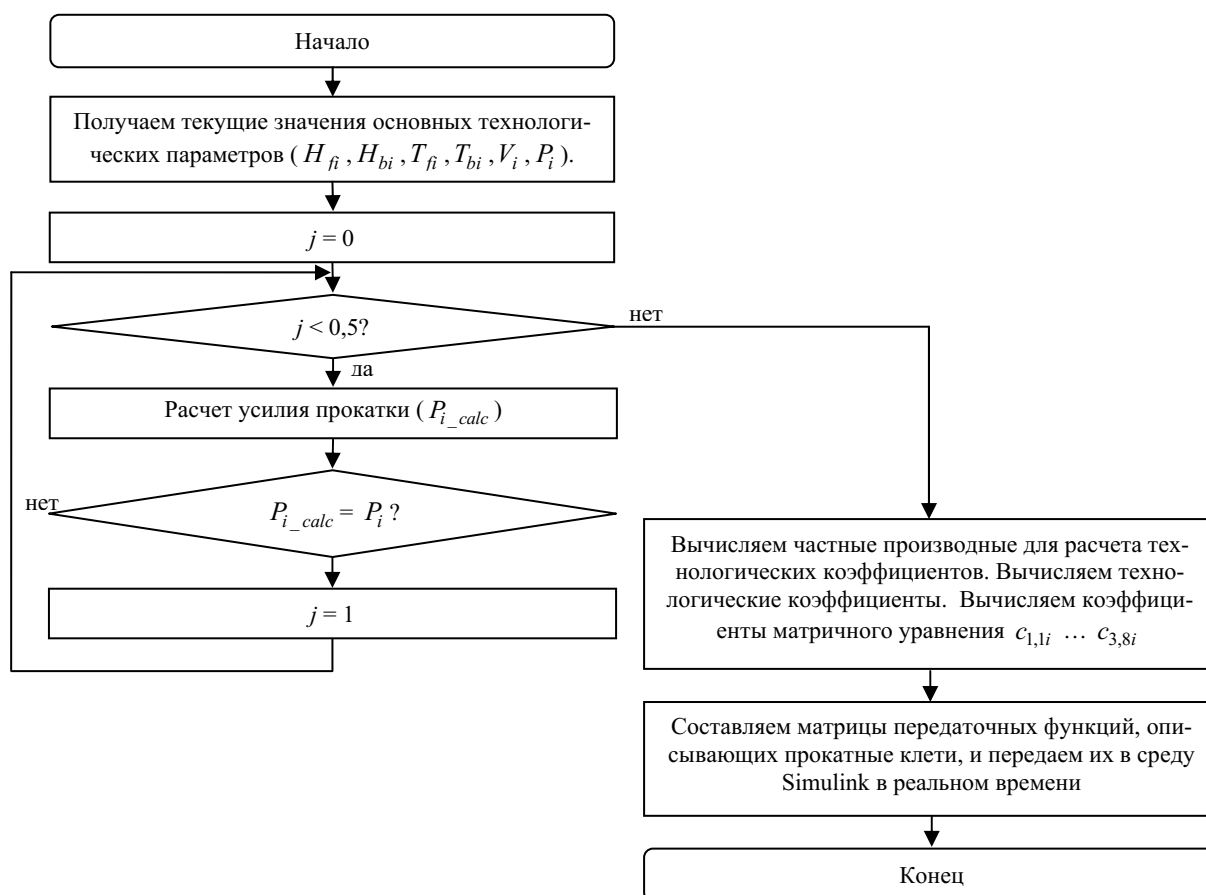


Рис. 2. Алгоритм m -функции, реализованный в блоке “Recalculation OPFs”

Исследования разработанной математической и имитационной моделей проводились при конструктивных параметрах стана непрерывной холодной прокатки 1700 ОАО «Северсталь», указанных в табл. 1. При этом принимаем во внимание следующие допущения:

1. Ширина прокатываемых полос не изменяется.
2. Модули упругости прокатываемых полос равны.
3. Стан непрерывной холодной прокатки состоит из трех прокатных клеток.

Таблица 1

Параметры стана непрерывной холодной прокатки

№ клетки	1	2	3
Диаметр рабочих валков, мм	595	597,5	596
Диаметр опорных валков, мм	1450	1455	1450
Промежуток между клетями, мм	4800	4800	4800
Модуль упругости клетки, МН*мм ⁻¹	5,5	5,5	5,5

В табл. 2 и 3 представлены значения основных параметров старой и новой полосы, описывающих процесс при проведении моделирования.

На рис. 3 изображено изменение толщины полосы на выходе из третьей клетки с 0,924 мм на 0,821 мм в момент времени, равный 69,5 с.

Таблица 2

Параметры старой прокатываемой полосы

Параметры	Клеть № 1	Клеть № 2	Клеть № 3
Толщина на входе, мм	2	1,549	1,19
Толщина на выходе, мм	1,549	1,19	0,924
Заднее натяжение, МПа	0,12754	0,27327	0,23241
Переднее натяжение, МПа	0,27327	0,23241	0,2038

Таблица 3

Параметры новой прокатываемой полосы

Параметры	Клеть № 1	Клеть № 2	Клеть № 3
Толщина на входе, мм	2	1,48	1,095
Толщина на выходе, мм	1,48	1,095	0,821
Заднее натяжение, МПа	0,12754	0,26107	0,21389
Переднее натяжение, МПа	0,26107	0,21389	0,1811

На рис. 4 изображено изменение натяжения между второй и третьей клетями прокатного стана с 0,23241 МПа на 0,21389 МПа.

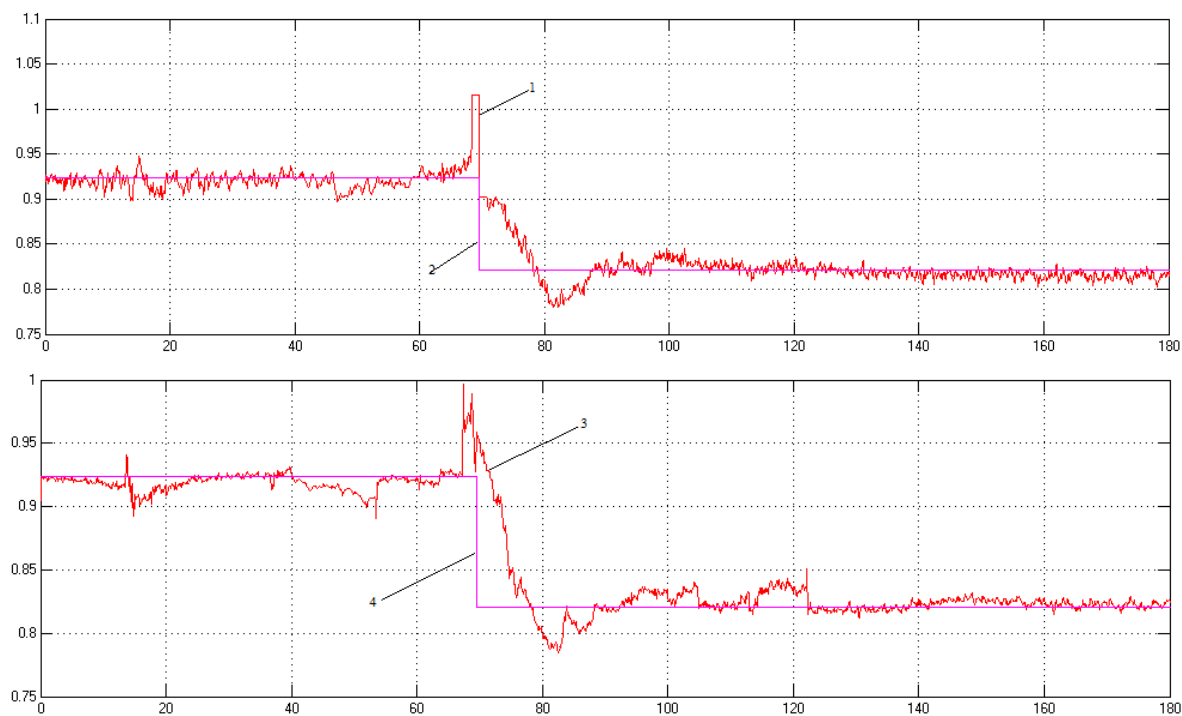


Рис. 3. График изменения толщины полосы на выходе из третьей клетки, мм.
Кривая 1 – реальные данные, кривая 3 – результат работы имитационной модели,
кривые 2 и 4 – изменение задания толщины полосы

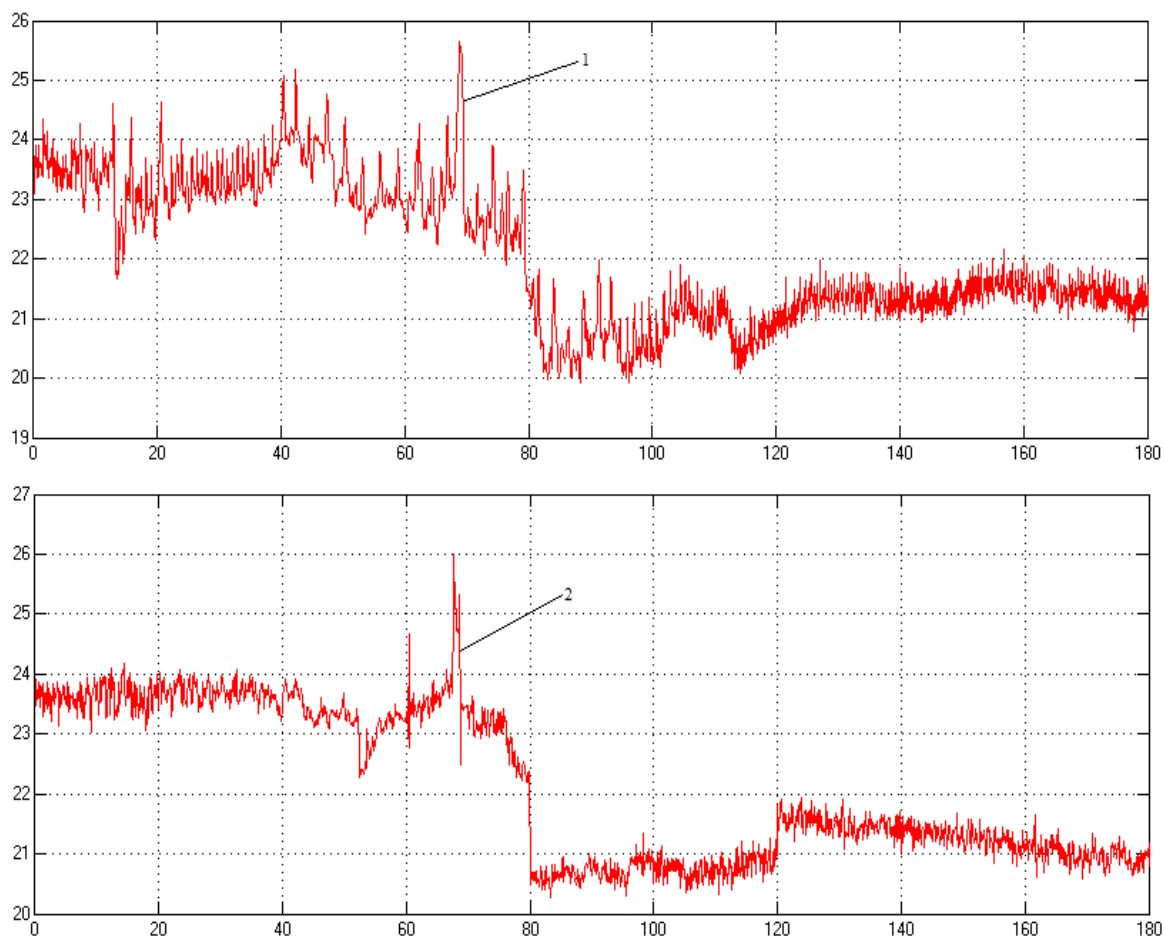


Рис. 4. График изменения натяжения полосы между второй и третьей клетями, МПа.
Кривая 1 – реальные данные, кривая 2 – результат работы имитационной модели

На рис. 3 изображены графики изменения толщины полосы на выходе из третьей клетки. Кривая 1 – это реальные данные, полученные с помощью программы IbaAnalyzer и экспортированные в среду Simulink. Кривая 3 – это результат работы имитационной модели. Кривые 2 и 4 – это изменение задания толщины полосы на выходе из третьей клетки. При сравнении графиков можно заметить, что кривые 1 и 3 почти полностью идентичны. Величина отклонения толщины полосы между двумя кривыми находится в рамках $\pm 0,06$ мм, что составляет порядок ± 6 %.

На рис. 4 изображены графики изменения межклетевого натяжения между второй и третьей клетями. Кривая 1 – это реальные данные, полученные с помощью программы IbaAnalyzer и экспортированные в среду Simulink, кривая 2 – это результат работы имитационной модели. При сравнении графиков можно заметить, что кривые 1 и 2 почти полностью идентичны. Величина отклонения межклетевого натяжения полосы между двумя кривыми находится в рамках $\pm 0,03$ МПа, что составляет порядок ± 8 %.

Выводы:

1. Разработаны математическая и имитационная модели стана непрерывной холодной прокатки в режиме прохождения сварного соединения.
2. Разработан алгоритм пересчета коэффициентов входных параметров матричного уравнения (1),

учитывающий факт, что процесс прохождения сварного шва обусловлен изменением основных технологических параметров прокатки.

3. Результаты моделирования на основе порядка сорока наборов экспериментальных данных подтверждают адекватность модели при сравнении с экспериментальными данными на стане 1700 ОАО «Северсталь» (с отклонением между собой в среднем не более 5 – 8 % по параметру толщины и не более 6 – 8 % по параметру межклетевого натяжения).

Литература

1. Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н.Н. Дружинин. – М., 1975.
2. Кожевников, А.В. Имитационная модель механической части двух смежных клетей непрерывного стана холодной прокатки / А.В. Кожевников, С.В. Белкова // Сталь. – 2012. – № 5. – С. 55 – 59.
3. Huiming, G. Modeling and simulation of finishing mill group of hot strip mill / Gao Huiming, Zeng Jianchao // Journal of System Simulation. – 2000. – № 12(1). – P. 51 – 53.
4. Imsek, B.H. Dynamic Simulation of Dual-Continuous Strip Processing Operations / B.H. Imsek // Iron and Steel Engineer. – 1997. – № 6.
5. Yingjie, G. Dynamic simulation of hydraulic AGC system in a strip mill / Gao Yingjie, Wang Yiqun, Kong Xiangdong // China Mechanical Engineering. – 1998. – № 9(7). – P. 23 – 26.

К 681.324

Е.В. Книга, И.О. Жаринов

СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ МНОГОМОДУЛЬНЫХ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Приводится анализ существующих принципов и алгоритмов организации тестирования мультипроцессорных многомодульных бортовых цифровых вычислительных систем, предлагается новый алгоритм тестирования мультипроцессора, соответствующий стандартам проектирования программного обеспечения для изделий интегрированной модульной авионики. Рассматривается структура унифицированного автоматизированного рабочего места для проверки функциональных модулей интегрированной модульной авионики.

Тестирование, вычислительные системы, интегрированная модульная авионика.

The article presents the analysis of existing principles and algorithms of test organization of multimodule multiprocessor onboard digital computing systems and a new testing algorithm of multiprocessor conforming to design standards of software for integrated modular avionics products. The authors consider the structure of the unified automated workplace for verification of functional modules of integrated modular avionics.

Testing, computing systems, integrated modular avionics.

Введение. Современные бортовые цифровые вычислительные системы (БЦВС) представляют собой сложные технические объекты, относящиеся по системе Флинна к классу мультипроцессорных систем с множественным потоком команд и множественным потоком данных и состоящие из набора конструктивно-функциональных модулей (КФМ), связанных между собой в единую локальную сеть. Для организации сетевых связей между КФМ используются

различные топологии сети, в частности [9] – [11]: «общая шина», «звезда», «двойная звезда», «полносвязная сеть» и др.

БЦВС выполняют в составе объекта — летательного аппарата (ЛА) — сложные функциональные задачи. Отказ БЦВС создает предпосылки к возникновению летного происшествия, поэтому необходимо осуществлять контроль работоспособности (тестирование) БЦВС во время полета на предмет выяв-