

## МНГОВАРИАНТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАРТИЙ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ СИТУАЦИОННО-НОРМАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ. СООБЩЕНИЕ 2

**Кулаков С.М.**, д.т.н., профессор кафедры «Автоматизация и информационные системы» (kulakov-ais@mail.ru)

**Мусатова А.И.**, старший преподаватель кафедры «Менеджмент и отраслевая экономика» (musatova-ai@yandex.ru)

**Кадыков В.Н.**, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (kadikov\_vn@mail.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Для рационального планирования и прогнозирования сроков производства необходим четкий учет и нормирование продолжительности циклов выпуска продукции. Длительность изготовления партий продукции – основа построения оперативных планов-графиков. Без продолжительности циклов невозможно установить календарные сроки запуска полуфабрикатов на ту или иную стадию обработки, а также определить сроки выпуска продукции, сроки прохождения партии продукции по отдельным производственным участкам. Рассматриваемая задача многовариантного оценивания нормативной длительности изготовления конкретной партии стальной проволоки состоит в определении для каждой производственной ситуации оптимальной длительности операций, требуемых для выпуска данной партии. Для ее решения необходимо построить модели производственных процессов, выполняемых в каждом отделении сталепроволочного комплекса. Определен состав, продолжительность и условия выполнения технологических, естественных, трудовых, контрольных и транспортных операций. Указаны типы и количество применяемого оборудования в каждом отделении. Перечислены виды единиц материального потока (бунты, мотки, катушки). Установлен характер и вид движения полуфабрикатов (изделий) по операциям каждого процесса. Заданы способы перемещения изделий от каждой предыдущей операции на каждую последующую (штучный, пакетный, партионный), а также количество перемещаемых пакетов и партий. Учтены виды применяемых поточных линий (непрерывная, полунепрерывная, дискретная). Все перечисленное отражено в представленном многоконтурном алгоритме, апробация которого выполнена методом моделирования с использованием натурных данных действующего предприятия.

**Ключевые слова:** длительность изготовления партий продукции, продолжительность цикла, ситуационно-нормативные модели, многоконтурный алгоритм, многовариантное оценивание.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-652-659

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] рассмотрена задача формирования ситуационных нормативных моделей тактов работы оборудования в сталепроволочном комплексе, сложного по составу функционирования и неоднородности технологических процессов (дискретных, непрерывных, полунепрерывных) внутри отделений и с гибкими связями между отделениями, что требует создания буферных (накопительных) устройств для бесперебойной работы всей системы с целью прогнозирования длительности выполнения заказов [2 – 5]. Обоснован выбор ведущего звена – отделения грубого волочения, от работы которого зависят предыдущие и последующие отделения (необходимое количество оборудования, технологических линий, временные характеристики производственных операций и процессов).

### ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Рассматривается процедура многовариантного определения нормативной длительности изготовления стальной проволоки на примере конкретного заказа (маршрут № 5): продукция – омедненная стальная проволока диаметром  $d_m^* = 2,0$  мм в мотках (м); масса мотка  $g_m^* = 20$  кг; ГОСТ 2246 – 70; сталь марки Св-08; масса заказа (партия отгрузки  $\beta_3$ )  $G_{\beta_3}^* = 64$  т; доставка – в железнодорожных вагонах.

Первоначально выполняются следующие подготовительные действия.

1. Выбор технологического маршрута по отделениям сталепроволочного комплекса, а также последовательности основных производственных операций и агрегатов в отделениях [1] (рис. 1, а) ( $d_1, d_2, d_3$  – диаметры стальной проволоки (полупродукта) для разных технологических операций).

2. Планирование процесса изготовления полуфабрикатов и использования соответствующих им агрегатов в каждом отделении, начиная от заданных параметров мотка готовой проволоки (по принципу «против хода технологического маршрута»).

2.1 Выбор видов входных и выходных полуфабрикатов для основных агрегатов отделений, начиная с готовой омедненной проволоки в мотках (рис. 1, б).

2.2 Выбор типов станов тонкого и грубого волочения для выполнения заказа с учетом их количества, специализации по виду выпускаемого полуфабриката, массе и диапазону диаметров проволоки [1], включая:

– станы тонкого волочения 7/350, работающие «с катушки грубого волочения на катушку тонкого волочения» ( $K_{гв} - K_{гв}$ );

– станы грубого волочения 2/550 или 3/550, работающие «с бунта на катушку» ( $Б - K_{гв}$ ).

3. Конкретизация диаметров заготовочной проволоки на входе и на выходе агрегатов, начиная с диаметра  $d_m^*$  готовой проволоки (рис. 1, в).

4. Определение количества готовых изделий (мотков проволоки) в заказе:

$$\theta_{м, \beta 3}^* = \frac{G_{\beta 3}^*}{g_m^*}. \quad (1')$$

5. Расчет количества полуфабрикатов (катушек) вида  $K_{гв}$ ,  $K_{гв}$ , соответствующего заказу для отделений:

– тонкого волочения

$$\theta_k^{гв} = \frac{G_{\beta 3}^* h_2}{g^k h_1}, \quad (2'')$$

– грубого волочения

$$\theta_k^{гв} = \frac{G_{\beta 3}^* h_3}{g^k h_2}, \quad (3''')$$

здесь  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$  – расходные коэффициенты металла для линии меднения, станов тонкого и грубого волочения, т/г;  $g_k$  – масса катушки, т.

## АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

### ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАРТИИ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

Алгоритм определения длительности изготовления партии стальной проволоки (рис. 2) синтезирован на основе взаимосвязанных контуров (циклов), из которых главными являются два контура моделирования производственного комплекса, начиная с отделения грубого волочения ( $t_{кр1}^{гв}$ ,  $t_{кр2}^{гв}$ ,  $t_{кр3}^{гв}$  – время крановых операций на участке грубого волочения при подаче катушек на площадку хранения, на разматочное устройство, на передачную тележку;  $\tau_{гв}^{ок}$ ,  $\tau_{гв}^{ок}$ ,  $\tau_{гв}^{ок}$  и  $\tau_{гв}^{ок}$  – время осмотра и контроля на участках травления, термическом, меднения, грубого и тонкого волочения;  $\tau_{гв}^{б}$  и  $\tau_{гв}^{б}$  – время подготовки проволоки к станам грубого и тонкого волочения;  $\beta 2$  – транспортная партия;  $\theta_{\beta 2}$  – количество изделий в транспортной партии;  $D_{кр, \beta 2}^{гв}$  и  $D_{кр, \beta 2}^{гв}$  – время крановых операций на участке тонкого волочения и термическом;  $D_{кр, \beta 2}^{гв}$  – время формирования партии на участке тонкого волочения;  $t_{тр, \beta 2}^{гв}$ ,  $t_{тр, \beta 2}^{гв}$ ,  $t_{тр, \beta 2}^{гв}$  и  $t_{тр, \beta 2}^{гв}$  – время транспортировки катушек до термической обработки, до тонкого волочения, до меднения, до склада готовой продукции). Первый контур осуществляет моделирование длительности операций для различного количества волочильных станов (блоки 4 – 57), второй – путем перебора скоростных режимов волочения (блоки 5 – 56). Другие контуры являются локальными и входят в состав главных контуров, в них реализуется перебор ситуаций, отличающихся скоростными режимами работы станов тонкого волочения (блоки 7 – 21), скоростью процессов меднения (блоки 13 – 20), концентрацией травильных растворов (блоки 22 – 27).

Локальный контур моделирования процесса тонкого волочения определяет ситуационные штучные такты работы станов тонкого волочения, необходимое количество станов (для заданного количества и скоростных режимов станов грубого волочения), выполнение ограничения на количество имеющихся в наличии станов тонкого волочения. Локальный контур моделирования процесса меднения определяет ситуационные штучные такты, необходимое количество нитей меднения

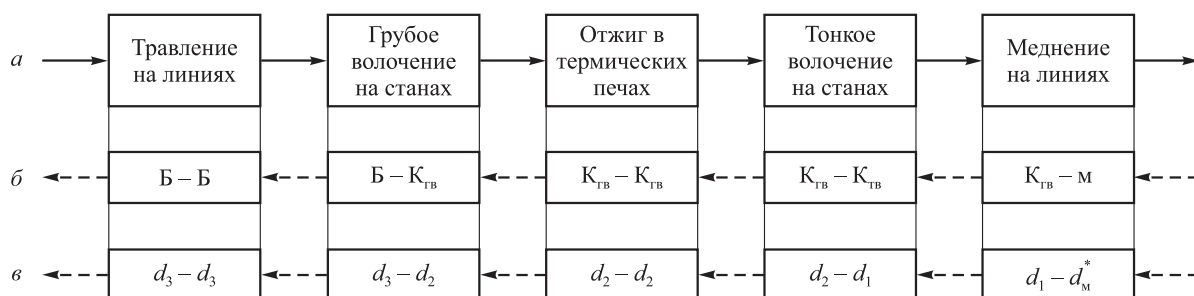


Рис. 1. Технологический маршрут основных операций (а), а также планирование процесса изготовления продукции по видам выходных и входных полуфабрикатов (б) и по диаметрам ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ) проволоки на выходе и входе агрегатов (в)

Fig. 1. Technological route of the main operations (a), and planning of the process of products manufacturing by types of output and input of semi-finished products (b) and by diameters ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ) of wire at output and inlet of the aggregates (v)

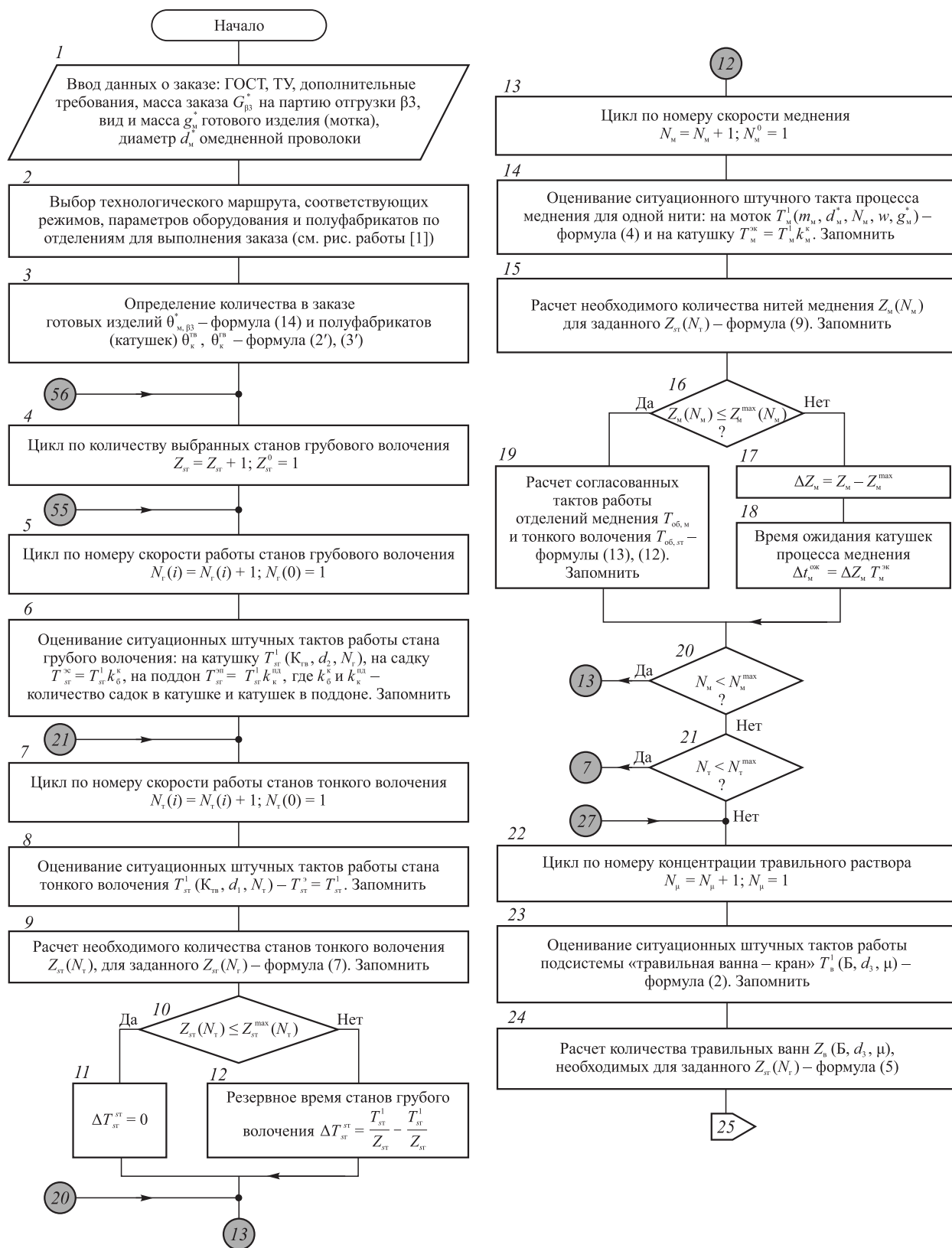


Рис. 2 (начало). Укрупненный алгоритм многовариантного оценивания длительности изготовления партии заказа на стальную проволоку (нумерация формул (1) – (13) и обозначения величин по работе [1])

Fig. 2 (First part). Enlarged algorithm for multivariate estimation of duration of steel wire batch manufacturing (formulas numbering (1) – (13) and values designation from the work [1])

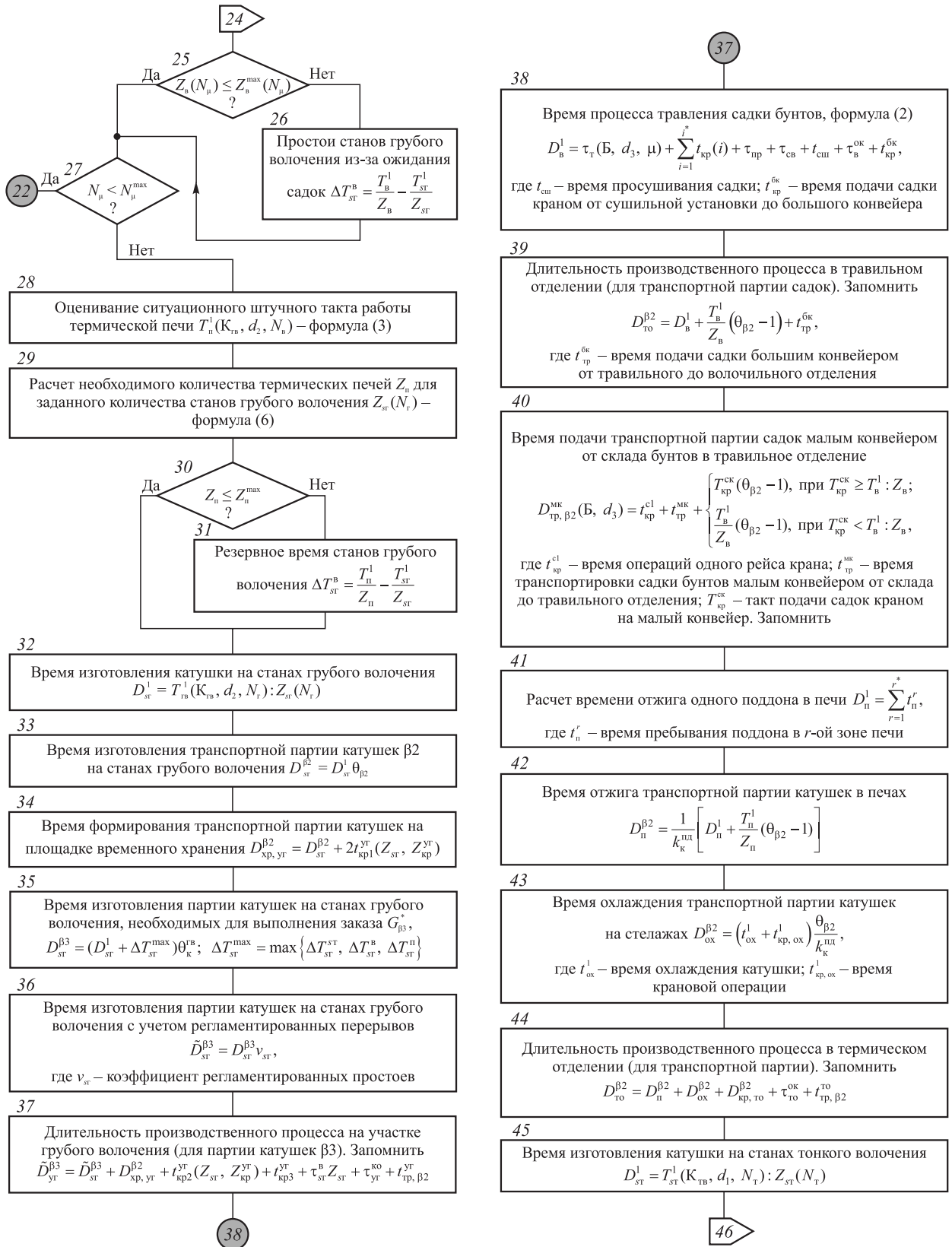


Рис. 2 (продолжение, начало на стр. 654)

Fig. 2 (Second part, see first part on p. 654)

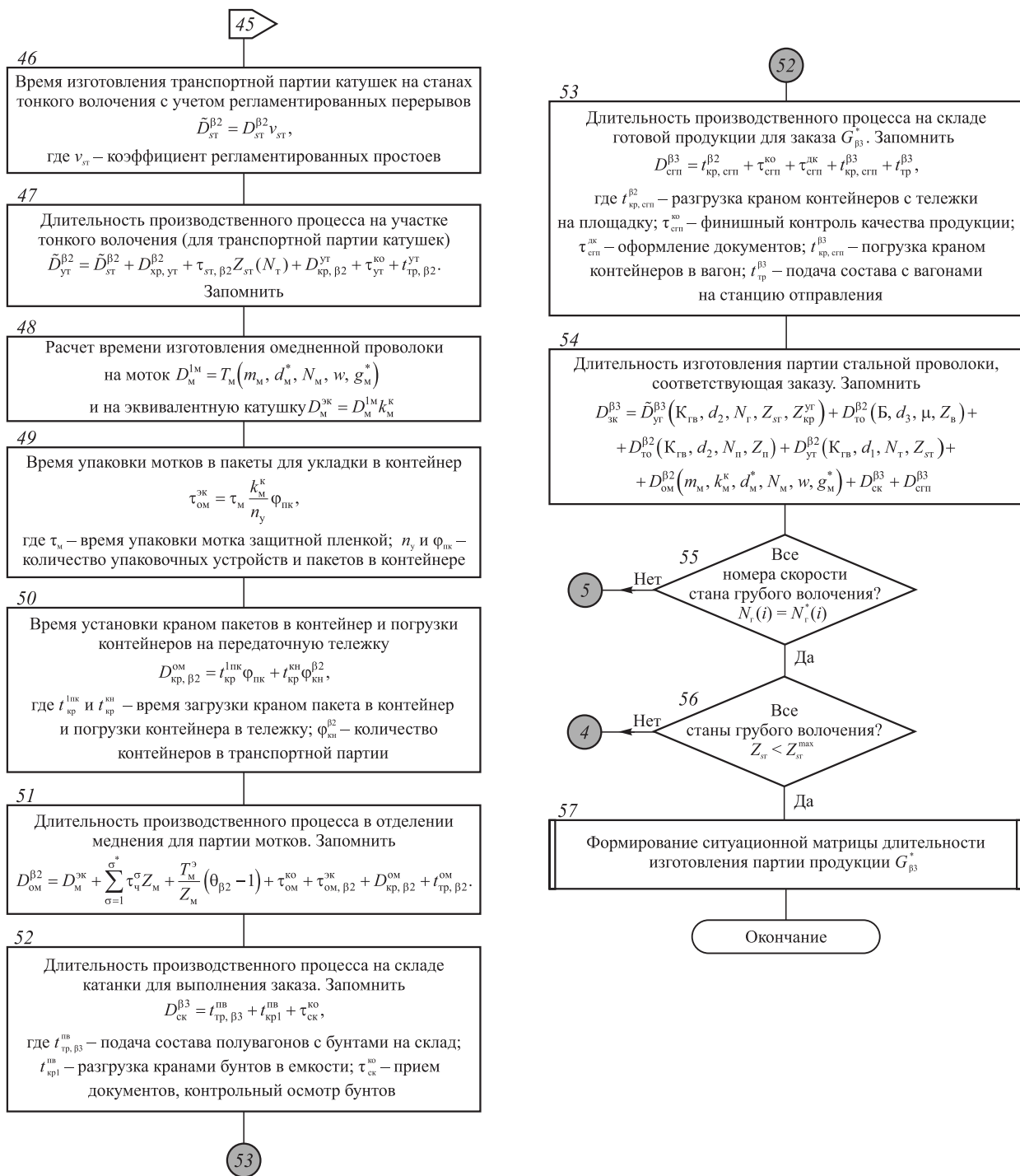


Рис. 2 (окончание, начало на стр. 654 – 655)

Fig. 2 (Third part, see previous parts on pp. 654 – 655)

(для заданного количества и скорости работы станов тонкого волочения), выполнение ограничения на количество нитей. Локальный контур моделирования работы травильного отделения определяет ситуационные штучные такты подсистемы ванна – кран, необходимое количество ванн (для заданного количества и скорости работы станов грубого волочения), выполнение ограничения на количество имеющихся в наличии травильных ванн. Необходимое количество термичес-

ких печей, соответствующее заданному количеству и скорости станов грубого волочения, определяется в блоках 28 – 31.

Ситуационные многофакторные модели длительности производственных процессов в подразделениях используются в следующих алгоритмических блоках: на участке грубого волочения (блоки 32 – 37); в травильном отделении (блоки 38, 39); в термическом отделении (блоки 41 – 44); на участке тонкого волочения



(блоки 45 – 47); в отделении меднения (блоки 48 – 51). Модели длительности производственных процессов на складах катанки и готовой продукции представлены в блоках 52, 53.

Оценивание ситуационной длительности изготовления партии продукции на заказ осуществляется в блоке 54 с учетом результатов многофакторного моделирования согласованной работы предшествующих и последующих отделений по отношению к ведущему отделению грубого волочения, изменение параметров которого определяет начало и окончание двух главных контуров алгоритма.

Результатом цикличной процедуры определения многовариантной длительности изготовления партии продукции является соответствующая ситуационная матрица (формируется в блоке 57), позволяющая анализировать, прогнозировать и выбирать из множества представленных значений рациональный вариант сроков выполнения конкретного заказа в зависимости от сложившихся производственных условий, количества и масштаба заказов по различным технологическим маршрутам.

Методика построения представленного алгоритма оценивания длительности изготовления партии продукции (рис. 2) имеет следующие особенности:

- использование многоуровневой декомпозиции сложного процесса производства сталепроволочных изделий [6 – 9];
- учет параллельно-последовательной работы производственных отделений, участков и транспортных средств [10 – 13];
- учет сочетания непрерывных и дискретных процессов в отделениях;
- учет наличия специализированных средств хранения и транспортировки полуфабрикатов, изделий;
- применение многофакторных ситуационных тактовых моделей нормативной длительности основных производственных процессов [14 – 20];
- выделение ведущего и подчиненных производственных подразделений;
- применение принципа встроенных алгоритмических циклов.

Для каждой партии заказов рассчитывалась технически возможная (расчетная) и нормативная длительность изготовления с учетом регламентированных текущих простоев и простоев во время планово-предупредительных ремонтов. Для оперативного планирования производственного процесса были рассчитаны длительности изготовления продукции на партии заказа с учетом режима работы сталепроволочного комплекса (в сутках две смены по 12 ч).

Например, рассмотрим длительность изготовления заказа (64 т) на омедненную проволоку в мотках по 20 кг, диам. 2,0 мм (маршрут № 5). Проволока проходит пять стадий передела: травление; волочение катанки диам. 6,5 мм в диам. 4,0 мм на участке грубого волоче-

ния; отжиг в термическом отделении; тонкое волочение проволоки диам. 4,0 мм в диам. 2,0 мм; меднение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ СИТУАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### АЛГОРИТМА

На основе предлагаемой методики и ее апробации рассмотрено несколько производственных вариантов выполнения заказа (64 т) на проволоку омедненную. В зависимости от заданных сроков поставок заказ может быть выполнен от 6,9 суток до 11,4 суток. Длительность производственного цикла изготовления омедненной проволоки включает затраты времени на складе катанки (3,2 ч), в травильном отделении (2,4 ч), на участке грубого волочения (от 3 до 5 суток), в отделении термической обработки (14,4 ч), на участке тонкого волочения (от 19,1 до 28,8 ч), в отделении меднения (от 3 до 4,5 суток); на складе готовой продукции, оформление документов и погрузка в крытый вагон (1,6 ч). Многовариантное моделирование производственных ситуаций дает возможность прогнозировать количество работающего оборудования в каждом из перечисленных подразделений комплекса.

При выполнении конкретного заказа на омедненную проволоку предлагаются три варианта организации производственного процесса. В первом варианте следует использовать на участке грубого волочения станы 3/550 на второй скорости, тогда сократится пролеживание полуфабрикатов в буферном запасе. Однако производственные мощности будут использоваться не в полную силу, что приведет к снижению производительности стана и перерасходу электроэнергии. Во втором варианте предлагается работа волочильных станов 3/550 на третьей скорости, при этом производительность стана повысится на участке грубого волочения, тогда на участке тонкого волочения станы 7/350 будут сдерживающим звеном, что приведет к значительному скоплению полуфабрикатов (катушек) перед их обработкой. В третьем варианте предлагается одновременное выполнение нескольких заказов на стане 3/550: то есть каждая шестая катушка будет изготовлена на четырех станах 7/350 ( $K_{гв} - K_{гв}$ ), а остальные пять катушек (при условии имеющихся заказов) будут изготавливаться на станах других типов, относящихся к участкам среднего и тонкого волочения 1/550, 7/350 для изготовления мотков массой 60, 100 кг.

Расчеты длительности производственного процесса позволяют точно определить календарные сроки запуска и выпуска продукции, согласовать во времени загрузку оборудования, планы работы отделений и тем самым обеспечить бесперебойный и равномерный ход производственного процесса.

### Выводы

Рассмотрен укрупненный алгоритм расчета нормативной длительности выполнения заказов, который

включает два главных и три локальных контура моделирования работы производственного комплекса. В этих контурах использованы многофакторные модели длительности производственных процессов, реализуемых в отделениях грубого волочения, травильном, термическом, тонкого волочения, меднения. Апробация алгоритма выполнена на примере конкретного заказа на партию омедненной проволоки. По результатам моделирования рассмотрено несколько альтернативных вариантов организации производственного процесса. Предложенный метод алгоритмизации может быть использован на других производственных комплексах различных отраслей промышленности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Кулаков С.М., Мусатова А.И., Кадыков В.Н. Многовариантное оценивание длительности изготовления партий стальной проволоки на основе ситуационно-нормативных моделей. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 6. С. 484 – 491.
- Korytkowski P. Optimization of production capacity in intangible flow production systems // IFAC. 2006. Vol. 12. Part 1. P. 1 – 6.
- Frank Kübler, Johannes Böhrer, Rolf Steinhilper. Resource efficiency optimization of manufacturing processes using evolutionary computation: A turning case. The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering. 2015. Vol. 29. P. 822 – 826.
- Голубчик Э.М., Кузнецова А.С., Рубин Г.Ш. и др. Применение модели и принципов технологической адаптации показателей качества в процессах производства метизной продукции // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. № 1. С. 101 – 108.
- Мачулин В.М., Сидорчук В.Е., Астратов С.Н. и др. Контроллинг в метизном производстве РУП «БМЗ» // Литье и металлургия. 2011. № 2. С. 115 – 123.
- Wiśniewski P. Decomposition of business process models into reusable sub-diagrams // ITM Web of Conferences. 2017. Vol. 15. No. 01002. P. 1 – 8.
- Foley J.T., Cochran D.S. Manufacturing system design decomposition: an ontology for data analytics and system design evaluation // Procedia CIRP. 2017. Vol. 60. P. 175 – 180.
- Rüttimann Bruno G., Stöckli Martin T. Going beyond triviality: the Toyota production system-lean manufacturing beyond muda and kaizen // Journal of Service Science and Management. 2016. No. 9. P. 140 – 149.
- Muhammad Bashir, Ding Liu, Murat Uzam, Naiqi Wu, Abdulrahman Al-Ahmari, Zhiwu Li. Optimal enforcement of liveness to flexible manufacturing systems modeled with Petri nets via transition-based controllers // Advances in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 10. No. 1. P. 1 – 19.
- Михайлова Л.В., Парамонов Ф.И., Чудин А.В. Формирование и оперативное управление производственными системами на базе поточно-группового производства в автоматизированном режиме. – М.: ИТЦ МАТИ, 2002. – 60 с.
- Мокеева Н.С., Заев В.А., Сенникова Е.В. Пути сокращения длительности производственного цикла в условиях гибкого раскройного производства // Изв. вуз. Северо-кавказский регион. 2008. № 5. С. 104 – 106.
- Благих И.А., Сальников Д.Ю. Управление производственным циклом предприятия (организации) // Проблемы современной экономики. 2010. Т. 36. № 4. С. 1 – 7.
- Malindžak D. Application of logistic principles in metallurgical production // Metalurgija. 2012. Vol. 51. No. 3. P. 345 – 348.
- Julka N., Baines T., Tjahjono B., Lendermann P., Vitanov V. Review of multi-factor capacity expansion models for manufacturing plants: Searching for a holistic decision aid // International Journal of Production Economics. Special section on organizational structure, culture and operations management: an empirical missing link, April 2007. Vol. 106. No. 2. P. 607 – 621.
- Van Dongen B.F., Crooy R.A., Van der Aalst W.M.P. Cycle time prediction: When will this case finally be finished? // On the Move to Meaningful Internet Systems 2008: OTM 2008 Confederated International Conferences (Monterrey, Mexico, November 9-14, 2008). 2008. Part I. P. 319 – 336.
- De Bucourt M., Busse R., Güttler F., Wintzer C., Colletini F., Kloeters C., Hamm B., Teichgräber U.K. Lean manufacturing and Toyota Production System terminology applied to the procurement of vascular stents in interventional radiology // Insights Imaging. 2011. Vol. 4. No. 2. P. 415 – 423.
- Толмачева Е.А. Прогнозирование объема отгруженной продукции на промышленных предприятиях // Гуманитарные научные исследования. 2016. Т. 57. № 5. С. 193 – 196.
- Муравьева Г.Ю. Комплексный подход к определению длительности производственного цикла в отраслях с нештучным учетом выпускаемой продукции // Научные ведомости. 2016. № 2(223). Вып. 37. С. 38 – 41.
- Кулаков С.М., Мусатова А.И., Кадыков В.Н. Ситуационные модели производительности человеко-машинных систем (на примере волочильных станков) // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 6. С. 485 – 489.
- Кулаков С.М., Мусатова А.И., Кадыков В.Н. Нормативное моделирование производительности комплекса меднения стальной проволоки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 2. С. 164 – 167.

Поступила в редакцию 7 июля 2018 г.  
После доработки 2 ноября 2018 г.  
Принята к публикации 2 ноября 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 8, pp. 652–659.

## MULTIVARIATE ESTIMATION OF PRODUCTION DURATION OF STEEL WIRE BATCHES ON THE BASIS OF SITUATIONAL-REGULATORY MODELS. MESSAGE 2

*S.M. Kulakov, A.I. Musatova, V.N. Kadykov*

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

**Abstract.** Accurate accounting and rating of duration of production cycles is necessary for rational planning and forecasting of production time. Production duration of products batches is the basis for operational schedules design. Without duration of cycles, it is impossible to establish calendar dates for start-up of semi-finished products to a particular stage of processing, as well as to determine timing of production and timing of the

products batch for individual production sites. The considered task of multivariate estimation of standard duration of manufacturing of a specific batch of steel wire is to determine optimal duration of operations required for this batch production for each situation. To solve it, it is necessary: to build models of production processes performed in each branch of steel-wire complex; to determine composition, duration and conditions for performing technological, natural, labor, control and transport operations; to specify the type and amount of equipment used in each department; to list types of material flow units (riots, skeins, coils); to establish nature and type of movement of semi-finished products (products) in operations of each process; to specify ways of moving products from each previous

operation for each subsequent (piece, batch, batch), as well as the number of packages and lots being moved; to take into account the type of applied production lines (continuous, semi-continuous, discrete). All of the above is reflected in presented multi-loop algorithm, approbation of which is performed by simulation method using field data of operating enterprise.

**Keywords:** production time, production batches, equipment operation cycles, situational-normative models, main and local contours of the algorithm, multivariance.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-8-652-659

## REFERENCES

1. Kulakov S.M., Musatova A.I., Kadykov V.N. Multivariate estimation of production duration of steel wire batches on the basis of situational-regulatory models. Message 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 6, pp. 484–491. (In Russ.).
2. Korytkowski P. Optimization of production capacity in intangible flow production systems. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-Papers Online)*. 2006, vol. 12, part 1, pp. 1–6.
3. Kübler F., Böhner J., Steinhilper R. Resource efficiency optimization of manufacturing processes using evolutionary computation: A turning case. *The 22<sup>nd</sup> CIRP conference on Life Cycle Engineering*. 2015, vol. 29, pp. 822–826.
4. Golubchik E.M., Kuznetsova A.S., Rubin G.Sh. etc. Application of the model and principles of technological adaptation of quality indicators in production processes of hardware products. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2016, no. 1, pp. 101–108. (In Russ.).
5. Machulin V.M., Sidorchuk V.E., Astratov S.N. etc. Controlling in hardware production at RUE “BMZ”. *Lit'e i metallurgiya*. 2011, no. 2, pp. 115–123. (In Russ.).
6. Wiśniewski P. Decomposition of business process models into reusable sub-diagrams. *ITM Web of Conferences*. 2017, vol. 15, no. 01002, pp. 1–8.
7. Foley J.T., Cochran D.S. Manufacturing system design decomposition: an ontology for data analytics and system design evaluation. *Procedia CIRP*. 2017, vol. 60, pp. 175–180.
8. Rüttimann B. G., Stöckli M. T. Going beyond triviality: the Toyota production system-lean manufacturing beyond muda and kaizen. *Journal of Service Science and Management*. 2016, no. 9, pp. 140–149.
9. Muhammad Bashir, Ding Liu, Murat Uzam, Naiqi Wu, Abdulrahman Al-Ahmari, Zhiwu Li. Optimal enforcement of liveness to flexible manufacturing systems modeled with Petri nets via transition-based controllers. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018, vol. 10, no. 1, pp. 1–19.
10. Mikhailova L.V., Paramonov F.I., Chudin A.V. *Formirovanie i operativnoe upravlenie proizvodstvennymi sistemami na baze potokno-gruppovogo proizvodstva v avtomatizirovannom rezhime* [Design and operational management of production systems based on thread-group production in an automated mode]. Moscow: ITTs MATI, 2002, 60 p. (In Russ.).
11. Mokeeva N.S., Zaev V.A., Sennikova E.V. Ways to reduce duration of production cycle at flexible cutting production. *Izv. vuz. Severo-kavkazskii region*. 2008, no. 5, pp. 104–106. (In Russ.).
12. Blagikh I.A., Sal'nikov D.Yu. Management of production cycle of the enterprise (organization). *Problemy sovremennoi ekonomiki*. 2010, vol. 36, no. 4, pp. 1–7. (In Russ.).
13. Malindžák D. Application of logistic principles in metallurgical production. *Metallurgija*. 2012, vol. 51, no. 3, pp. 345–348.
14. Julka N., Baines T., Tjahjono B., Lendermann P., Vitanov V. Review of multi-factor capacity expansion models for manufacturing plants: Searching for a holistic decision aid. *International Journal of Production Economics. Special section on organizational structure, culture and operations management: an empirical missing link, April 2007*, vol. 106, no. 2, pp. 607–621.
15. Van Dongen B.F., Crooy R.A., Van der Aalst W.M.P. Cycle time prediction: When will this case finally be finished? *On the Move to Meaningful Internet Systems 2008: OTM 2008 Confederated International Conferences (Monterrey, Mexico, November 9-14, 2008)*. 2008, part I, pp. 319–336.
16. De Bucourt M., Busse R., Güttler F., Wintzer C., Colletini F., Kloeters C., Hamm B., Teichgräber U.K. Lean manufacturing and Toyota Production System terminology applied to the procurement of vascular stents in interventional radiology. *Insights Imaging*. 2011, vol. 4, no. 2, pp. 415–423.
17. Tolmacheva E.A. Predicting the volume of products shipped at industrial enterprises. *Gumanitarnye nauchnye issledovaniya*. 2016, vol. 57, no. 5, pp. 193–196. (In Russ.).
18. Murav'eva G.Yu. Integrated approach to determining duration of production cycle in industries with non-piece account of the products. *Nauchnye vedomosti*. 2016, no. 2 (223), Issue 37, pp. 38–41. (In Russ.).
19. Kulakov S.M., Musatova A.I., Kadykov V.N. Digital prototypes of man-machine system performance (in the case of drawing mills). *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 6, pp. 485–489. (In Russ.).
20. Kulakov S.M., Musatova A.I., Kadykov V.N. Normative modeling of performance of steel wire coppering unit. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 2, pp. 164–167. (In Russ.).

## Information about the authors:

**S.M. Kulakov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of “Automation and Information Systems” (kulakov-ais@mail.ru)  
**A.I. Musatova**, Senior Lecturer of the Chair “Management and Branch Economy” (musatova-ai@yandex.ru)  
**V.N. Kadykov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming and Metal Science”, OJSC “EVRAZ ZSMK” (kadykov\_vn@mail.ru)

Received July 7, 2018  
 Revised November 2, 2018  
 Accepted November 2, 2018