

## МНОВОВАРИАНТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАРТИЙ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ СИТУАЦИОННО-НОРМАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ. СООБЩЕНИЕ 1

*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»*

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

**Аннотация.** Рассмотрены задачи системного анализа и разработки моделей, необходимых для синтеза процедуры ситуационного (многовариантного) оценивания нормативной длительности изготовления партии продукции в рамках многоструктурного сталепроволочного комплекса (объекта исследования), включающего самостоятельно функционирующие подразделения с непрерывными, полунепрерывными и дискретными технологическими процессами (травление, волочение, отжиг, меднение), которые связаны единым материальным потоком. Комплекс отличается многообразием технологических маршрутов, позволяющих выпускать широкий спектр продукции (стальной проволоки), соответствующий разным стандартам, маркам стали, диаметрам, формам и массам готовых изделий; многовариантной специализацией волочильных станов; гибкими связями между подразделениями; параллельной, последовательной и комбинированной работой основного и вспомогательного оборудования; оснащением специализированными транспортными средствами (кранами, конвейерами, передаточными тележками, электрокарами). В ходе системного анализа объекта исследования решены следующие вопросы: определены и описаны множество технологических маршрутов в отделениях комплекса, оценены их характеристики; разработаны графические модели производственных процессов, отображающих последовательность и параллельность операций, декомпозицию их на элементы и микроэлементы для каждого отделения; выявлены определяющие факторы, характеризующие организацию производственных процессов для всех отделений; разработаны нормативные модели длительности операций на основе комплексирования разных методов исследования. Решение названной задачи основано на тактовом подходе и включает построение факторной модели штучного ситуационного такта работы волочильного стана *s*-го типа, подсистемы «травильная ванна – кран», термической печи, линии меднения. Дополнительно введено понятие штучного эквивалентного такта работы оборудования для приведения к сопоставимому виду с тактами станов грубого волочения. Для обеспечения согласованной работы отделения грубого волочения с другими отделениями определено соответствующее количество оборудования травильного, термического, тонкого волочения, меднения. Сформированы модели взаимосвязанных партионных тактов работы предшествующих и последующих отделений (по отношению к отделению грубого волочения). Степень согласованности работы определялась на основе сравнения партионных тактов оборудования и транспортных средств на входе и выходе каждого отделения. Для этого предварительно построены нормативные модели тактов работы транспортных средств. Результаты выполненной работы позволяют перейти к изложению собственно алгоритма оценивания длительности изготовления партий стальной проволоки, который представлен во втором сообщении.

**Ключевые слова:** сталепроволочный комплекс, технологические маршруты, волочильные станы, ситуационно-нормативные модели тактов, модели оценки необходимого количества оборудования.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-484-491

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной задачей в планировании и оперативном управлении производством является создание информационно-нормативной базы показателей, характеризующих организационно-логистический уровень функционирования производственной системы [1, 2]. Эффективность применения многовариантной нормативной базы достигается путем разработки оптимальных норм и нормативов таких показателей, как длительности операций, такты

и циклы работы оборудования, производительность, трудоемкость продукции, длительность изготовления единицы продукции и выполнения заказов потребителей [3 – 5]. При этом необходимо учитывать возникающие характерные производственные ситуации (изменение номенклатуры и ассортимента продукции, количества поступающих заказов, объема производства, технического состояния оборудования, технологических режимов, квалификационного уровня персонала, наличие «узких мест» в производственном потоке и др.).

Задачи оптимизации производственной программы и выполнения «точно в срок» заказов потребителей решаются как при составлении планов-графиков работы производственных подразделений, так и при их реализации в процессе оперативного управления на основе созданной автоматизированной системы, формирующей многовариантные решения в каждой конкретной ситуации для выбора менеджером (руководителем) предпочтительного варианта [6 – 11].

Разработанные авторами [12 – 14] ситуационно-нормативные модели длительности производственных процессов позволяют обоснованно планировать и четко координировать оперативную работу каждого подразделения и всей производственной системы.

### ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

На примере метизного производства металлургического предприятия рассмотрена задача построения интегрированной ситуационно-нормативной модели длительности изготовления партий готовой продукции, соответствующих заказам потребителей. В качестве объекта исследования выбран сталепроволочный комплекс метизного производства, представляющий собой многоструктурную систему. Последняя включает несколько самостоятельных технологических подразделений, связанных между собой материальными потоками единого производственного процесса, ориентированного на изготовление проволоки диам. 0,8 – 9,0 мм в виде мотков массой от 20 до 1500 кг по ГОСТ и ТУ (см. рисунок).

Бунты заготовочной проволоки (катанки) поступают на склад сталепроволочного комплекса из сортопрокатного цеха в железнодорожных полувагонах, которые

разгружаются электромостовыми кранами в специальные корзины. Затем, по мере необходимости, из бунтов формируются партии («садки»), которые передаются малым штанговым конвейером в травильное отделение (для удаления окалины с поверхности катанки химическим способом) или большим конвейером в отделение грубого волочения к установкам для удаления окалины механическим способом. После травления бунты поступают по конвейеру в отделение грубого волочения, где установлено множество заготовительных станов, отличающихся по кратности процесса волочения (от одного до шести), по диаметру чистового (последнего) барабана (750, 650, 550 мм), по конструкции размоточного и наматочного устройств, по виду размотки заготовочной проволоки (бунт) и намотки полученной проволоки (моток, катушка), по массе единичной продукции (изделия), а также по диаметрам обработанной проволоки (см. таблицу).

В соответствии с технологическими маршрутами, определяемыми ГОСТами, ТУ и требованиями заказчиков, из отделения грубого волочения одна часть изделий направляется на склад готовой продукции (мотки проволоки диам. от 9,0 до 2,5 мм и массой от 1500 до 100 кг) (маршрут № 1). Другая часть передается в термическое отделение для отжига в роликовых печах мотков и катушек, которые затем направляются либо на склад готовой продукции (маршрут № 2), либо катушки поступают в отделение среднего волочения, где подвергаются дальнейшему процессу волочения на станах типа 1/550, 6/550, 7/550 для получения проволоки меньших диаметров (2,5 – 1,8 мм) массой мотков 100 кг и передаются на склад готовой продукции (маршрут № 3).

Часть катушек после отжига направляется в отделение тонкого (семикратного) волочения на станах типа 7/350 (см. таблицу), где производится проволока диам. от 2,0 до 0,8 мм в мотках (60 кг) и отправляется на склад готовой продукции (маршрут № 4) или в катушках (1000 кг), поступающих в отделение меднения для нанесения на поверхность проволоки слоя меди и формирования мотков массой до 20 кг (маршрут № 5), которые затем передаются на склад готовой продукции. На складе осуществляется финишный контроль качества всех изделий на соответствие ГОСТ и ТУ, оформляется документация, формируются партии отгрузки продукции по заказам потребителей.

Следует отметить, что связь между отделениями в таком производстве полужесткая, отличающаяся наличием буферных (накопительных) устройств в виде конвейера в травильном отделении, конвейера и площадки временного складирования в отделении грубого волочения, площадок временного складирования в термическом отделении, в отделении тонкого волочения и меднения. Поэтому для выполнения заказов по каждому маршруту в конкретных производственных условиях необходимо учитывать межоперационные заделы,



Схема технологических маршрутов сталепроволочного цеха

Scheme of technological routes of steel wire shop

## Специализация волочильных станов по отделениям

## Specialization of drawing mills by departments

Тип стана	Виды размотки и намотки проволоки	Масса изделия, кг	Количество станов, шт.	Диапазон диаметров, мм
1. Станы в отделении грубого волочения				
1/750	Б → М	150, 200, 250	1	10,0 – 5,0
1/650	Б → М	100	2	9,0 – 5,0
	Б → БМ	1000	2	9,2 – 4,0
2/550	Б → М	1000	8	6,3 – 4,0
	Б → К	1000	3	5,7 – 4,0
3/550	Б → БМ	1500	7	5,5 – 3,5
	Б → К	1000	2	5,5 – 3,5
4/550	Б → БМ	1500	2	4,6 – 3,0
	Б → К	1000	1	4,6 – 3,0
5/550	Б → БМ	1000	1	4,0 – 2,5
	Б → К	1500	1	4,0 – 3,0
6/550	Б → БМ	1000	2	4,0 – 1,8
	Б → К	1000	2	4,0 – 2,0
2. Станы в отделении среднего волочения				
1/550	К → М	100	4	5,5 – 1,6
6/550	К → М	100	2	2,7 – 1,8
7/550	К → М	100	2	2,5 – 1,2
3. Станы в отделении тонкого волочения				
7/350	К → М	60	16	2,0 – 0,8
	К → К	1000	4	2,0 – 0,9

Пр и м е ч а н и е. Б – бунт заготовочной проволоки, К – катушка с проволокой, М и БМ – мотки проволоки: малый и большой.

предотвращающие простои оборудования по техническим, технологическим и организационным причинам.

#### ЭТАПЫ ОЦЕНИВАНИЯ НОРМАТИВНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАРТИЙ ПРОДУКЦИИ

Для расчета нормативной длительности изготовления партии продукции выделены исследуемые производственные отделения и участки комплекса, определены технологические маршруты, составленные с учетом технических условий и требований ГОСТ на готовую проволоку. На основе ретроспективного анализа и отбора наиболее часто встречающихся заказов выбраны характерные партии с учетом количества и грузоподъемности транспортных средств. Выбраны партии прибытия бунтов на склад катанки из мелко-сортного цеха с учетом периодичности поступления, количества и грузоподъемности полувагонов.

Предлагаемая процедура многовариантного оценивания нормативной длительности изготовления партий продукции основана на использовании интегрированных моделей, создание которых включает следующие этапы:

– подготовка исходной информации на основе изучения проектной, нормативной, технической и отчетной документации; классификация режимов работы оборудования; анализ организации производственного процесса в каждом отделении комплекса;

– разработка графических моделей процессов, отображающих последовательность производственных операций и их декомпозицию на элементы и микро-элементы для каждого отделения на основе проведения визуальных наблюдений и данных, полученных при выполнении предыдущего этапа;

– построение табличных моделей производственных операций и их элементов для каждого отделения, включающих: наименование операций (элементов); пространственные координаты фиксажных точек, соответствующих моментам начала и окончания операций (элементов); наименование используемого оборудования, видов операций (машинные, ручные, машинно-ручные); классов операций (технологические, транспортные, естественные, контрольные); единиц обрабатываемых изделий (бунт, садка, моток, катушка, партия);

– разработка нормативных моделей длительности операций на основе комплексирования разных методов

исследования (декомпозиция операций на элементы, обработка данных натурных наблюдений, построение формульных моделей длительности элементов операций) с учетом сортамента продукции (диаметров готовой проволоки), технических и технологических параметров работы оборудования;

- определение ситуационно-нормативных тактов (штучных и партионных) работы оборудования, технологических линий и отделений;

- построение ситуационно-нормативных моделей длительности производственных процессов на базе нормативных моделей длительности операций с учетом скоростных режимов, количества параллельно работающего оборудования, технологических маршрутов в каждом отделении;

- формирование многовариантной нормативной модели длительности изготовления партии готовой продукции для каждого технологического маршрута (с учетом вышеперечисленных факторов и производственных ситуаций).

Методики моделирования нормативной длительности производственных операций в отделениях, основанные на тактовом подходе, изложены в работах [12 – 14].

Для построения комплексных нормативных моделей длительности изготовления партии продукции по технологическим маршрутам были исследованы виды и характер организации материальных потоков в отделениях сталепроволочного производства. Также исследован пространственно-временной характер движения элементов материальных потоков (полуфабрикатов, изделий) между смежными операциями производственного процесса (последовательный, параллельный, параллельно-последовательный). Структурная организация материальных потоков в процессе производства является одним из сложных аспектов построения маршрутных моделей длительности изготовления партий готовой продукции [15 – 20].

Чтобы определить длительность изготовления конкретной партии продукции, необходимо задать: технологию процесса обработки изделия; состав, продолжительность и условия выполнения технологических, естественных, трудовых, контрольных и транспортных операций; типы и количество применяемого оборудования; вид единицы материального потока (бунт, моток, катушка); характер и вид движения полуфабрикатов (изделий) по операциям процесса; способ их перемещения с каждой предыдущей операции процесса на каждую последующую (штучный, пакетный, партионный); количество входных пакетов и партий; вид поточной линии (непрерывная, полунепрерывная, дискретная).

Характер движения полуфабрикатов в каждом отделении устанавливался для отдельных единиц (штук) и для партий. В зависимости от этого классифицировались виды организации материальных потоков. Например, в травильном отделении при работе одной техно-

логической линии, а в ней – одной травильной ванны, вид потока – последовательный. Если количество работающих технологических линий больше единицы и количество работающих травильных ванн в каждой линии также больше единицы, то вид потока – параллельно-последовательный. В волочильном отделении при работе одного стана изготовление одного изделия или партии изделий происходит последовательно, а изготовление партии изделий одновременно на нескольких однотипных станах – параллельно.

Системный анализ организации функционирования сталепроволочного комплекса выявил, что ведущим является отделение грубого волочения, исходя из объема формоизменения заготовочной проволоки, степени влияния на работу других отделений и включения во все технологические маршруты (см. рисунок). Поэтому расчеты длительности изготовления партии продукции начинались с отделения грубого волочения. Сюда вошли расчеты продолжительности следующих операций: транспортировки бунтов катанки (садки) из травильного в отделение грубого волочения, подачи садки краном на размоточное устройство, волочения проволоки на стане, снятия готового изделия (полуфабриката) с намоточного устройства, подачи краном изделий на площадку временного складирования, погрузки изделий краном на передаточную тележку.

С целью обеспечения сопоставимости тактов работы отделения грубого волочения и тактов работы других отделений введены элементы материальных потоков: штучные изделия (полуфабрикаты), партии штучных изделий.

В отделении грубого волочения, в зависимости от классификации станов (см. таблицу) и назначения продукции, штучным считается изделие (малый и большой моток) или полуфабрикат (катушка); в травильном отделении под штучным полуфабрикатом понимается садка – определенное количество бунтов катанки, размещаемое на крюке крана; в термическом отделении – количество полуфабрикатов, размещаемых на одном поддоне; в отделениях среднего, тонкого волочения и меднения – количество полуфабрикатов или готовых изделий, соответствующих (по массе) полуфабрикатам отделения грубого волочения.

Модель штучного ситуационного такта работы стана  $s$ -го типа грубого волочения на одно изделие (полуфабрикат) представлена на основе данных работы [12] следующей формулой:

$$T_{sr}^1(m_r, d, N_r) = t_m(m_r, d, s, N_r) + \sum_{n=1}^n \tau_q^n(m_r, d, s), \quad (1)$$

где  $t_m(m_r, d, s, N_r)$  – машинное время волочения;  $\tau_q^n(m_r, d, s)$  – длительность выполнения рабочим-оператором  $n$ -ой ручной операции;  $m_r \in [М, БМ, К]$  – вид полуфабриката;  $d$  – диаметр проволоки на выходе стана;  $N_r$  – номер скорости волочения.

**МОДЕЛИ СИТУАЦИОННЫХ ТАКТОВ РАБОТЫ  
ОБОРУДОВАНИЯ И ОТДЕЛЕНИЙ**

Модель штучного ситуационного такта работы подсистемы травильная ванна – кран (на одну садку) имеет вид:

$$T_B^1(m_c, d, \mu) = \tau_T(m_c, d, \mu) + \sum_{i=1}^{j^*} t_{кр}^B(i) + \tau_{пр} + \tau_{св} + t_{кр}^{МК}, \quad (2)$$

где  $\tau_T(m_c, d, \mu)$  – длительность травления садки  $m_c \in [Б]$  в ванне с раствором соляной кислоты;  $\mu$  – концентрация раствора кислоты;  $t_{кр}^B(i)$  – длительности подачи садки краном от малого конвейера к травильной и далее – к другим ваннам, затем до сушильной установки;  $\tau_{пр}$  – длительность каскадной промывки садки в трех ваннах с водой;  $\tau_{св}$  – длительность обработки садки в специальной ванне;  $t_{кр}^{МК}$  – длительность переезда крана от сушильной установки до малого конвейера.

Модель штучного ситуационного такта работы термической печи с учетом количества изделий на одном поддоне на основе данных работы [13] описывается формулой

$$T_{п}^1(m_T, d, N_{п}) = \max\{T_{пj}^1(m_T, d, N_{пj}) \mid j = 1, j^*\}, \quad (3)$$

где  $T_{пj}^1(m_T, d, N_{пj})$  – такт работы  $j$ -й зоны печи (для одного поддона);  $N_{пj}$  – скоростной режим  $j$ -й зоны печи.

Для приведения к сопоставимому виду тактов работы станков грубого волочения  $T_{ст}^1(m_T, d, N_T)$  к тактам работы оборудования травильного  $T_B^1(m_c, d, \mu)$  и термического  $T_{п}^1(m_T, d, N_{п})$  отделений дополнительно определялись штучные эквивалентные такты на одну садку  $T_{ст}^{эс}(m_c, d, N_T)$ , один поддон  $T_{ст}^{эп}(m_T, d, N_{п})$ , соответствующие по суммарной массе полуфабрикатам (изделиям).

Структура модели штучного ситуационного такта работы стана  $s$ -го типа тонкого (среднего) волочения  $T_{ст}^1(m_T, d, N_T)$  на один полуфабрикат (катушку) или изделие (моток) аналогична модели (1),  $m_T \in [К, М]$ .

Штучный ситуационный такт процесса меднения для одной «нити» (проволоки) при изготовлении одного изделия (мотка) рассчитывался на основе данных [14] по следующей формуле:

$$T_M^1(m_M, d, N_M, w, g) = t_{мн}(m_M, d, N_M, w, g) + \sum_{\alpha=1}^{\alpha^*} \tau_{ч}^{\alpha}(m_M, d, g), \quad (4)$$

где  $t_{мн}(m_M, d, N_M, w, g)$  – машинное время меднения (намотки проволоки в моток);  $N_M$  – скоростной режим меднения;  $w$  – концентрация раствора медного купороса;  $g$  – масса мотка омедненной проволоки;  $\tau_{ч}^{\alpha}(m_M, d, g)$  – длительность выполнения ручных операций,  $m_M \in [М]$ .

Для приведения к сопоставимому виду моделей штучных тактов  $T_{ст}^1(m_T, d, N_T)$  и  $T_M^1(m_M, d, N_M, w, g)$  к тактам работы станков грубого волочения  $T_{ст}^1(m_T, d, N_T)$  вычислялись эквивалентные штучные такты  $T_{ст}^э(m_T, d, N_T)$  и  $T_M^{эк}(m_M, d, N_M, w, g)$  на определенное количество  $k_M^K$  готовых мотков, которое по массе соответствует полуфабрикату (катушке).

Кроме штучных тактов работы оборудования каждого отделения определялись партионные такты для следующих видов партий: крановая (количество полуфабрикатов  $\theta_{\beta 1}$ , соответствующее грузоподъемности крана); транспортная – количество полуфабрикатов или изделий  $\theta_{\beta 2}$ , соответствующее грузоподъемности транспортного средства (конвейера, рельсовой тележки, электрокара) для передачи их между отделениями; партия отгрузки – количество готовых изделий  $\theta_{\beta 3}$ , одновременно отгружаемых потребителю.

В связи с партионной передачей полуфабрикатов между отделениями на специальных транспортных средствах, сочетанием дискретных и непрерывных производственных процессов, а также из-за влияния отказов оборудования (часто имеющих вероятностный характер) для достижения ритмичной работы отделений используются «буферные запасы» на площадках временного хранения полуфабрикатов. При этом важно определять и поддерживать минимально необходимые запасы на этих площадках, что обеспечивается установлением нормативных объемов хранения с учетом особенностей функционирования основного оборудования в отделениях и производственных ситуаций.

В основу алгоритма многовариантного оценивания нормативной длительности изготовления партии продукции по каждому технологическому маршруту положены модели штучных и партионных тактов работы станков отделения грубого волочения (в зависимости от производственных условий), тактов работы оборудования предшествующих и последующих отделений, что важно для согласования их работы и накопления запаса полуфабрикатов на площадках временного хранения. Предварительно определялось количество необходимого оборудования в смежных отделениях (по отношению к главному).

Для предшествующего (травильного) отделения с учетом производственных условий в отделении грубого волочения необходимое количество основного оборудования (травильных ванн) вычислялось по соотношению

$$Z_B(m_c, d, \mu) = \frac{T_{ст}^{эс}(m_c, d, N_T) : Z_{ст}}{\gamma_{ок} T_B^1(m_c, d, \mu)}, \quad (5)$$

где  $Z_{ст} \in [1, 2, \dots, Z_{ст}^{max}]$  – заданное количество используемых станков  $s$ -го типа грубого волочения;  $\gamma_{ок} \in [0,6 \div 0,9]$  –

коэффициент формирования запаса садов на передаточном конвейере.

Необходимое количество  $Z_{\Pi}$ ,  $Z_{ST}$  оборудования для двух последующих после грубого волочения отделений определялось в соответствии с выражениями:

а) для термического отделения

$$Z_{\Pi}(m_{\Gamma}, d, N_{\Pi}) = \frac{\gamma_{\Pi} T_{\Pi}^1(m_{\Gamma}, d_3, N_{\Pi})}{T_{ST}^{ЭП}(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma}):Z_{ST}} \text{ при } \gamma_{\Pi} T_{\Pi}^1 > T_{OX}^1, \quad (6)$$

где  $\gamma_{\Pi} \in [0,5 \div 0,8]$  – коэффициент формирования запаса полуфабрикатов на площадке термического отделения;  $T_{OX}^1$  – штучный такт процесса охлаждения полуфабрикатов на стеллажах после отжига;

б) для отделения тонкого волочения – при выпуске проволоки в катушках

$$Z_{ST}(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma}) = \frac{\gamma_{TK} T_{ST}^1(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma})}{T_{ST}^1(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma}):Z_{ST}}, \quad (7)$$

где  $\gamma_{TK} \in [0,6 \div 0,8]$  – коэффициент формирования запаса на площадке тонкого волочения; – при выпуске проволоки в мотках

$$Z_{ST}(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma}) = \frac{\gamma_{TM} T_{ST}^{ЭК}(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma})}{T_{ST}^1(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma}):Z_{ST}}, \quad (8)$$

$$\gamma_{TM} \in [0,8 \div 0,9].$$

Необходимое количество нитей линий меднения проволоки определялось с учетом наличия промежуточных площадок, которые демпфируют нестабильность работы станов грубого волочения. Поэтому достаточно согласовывать работу линий меднения со станами тонкого волочения:

$$Z_M(m_{\Gamma}, d, N_M, g) = \frac{T_M^3(m_{\Gamma}, d, N_M, g)}{\gamma_{TK} T_{ST}^1(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma}):Z_{ST}}. \quad (9)$$

При вычислении значений  $Z_B$ ,  $Z_{\Pi}$ ,  $Z_{ST}$ ,  $Z_M$  результаты округляли до целых чисел по специальным правилам.

Модели согласованных партионных тактов работы предшествующих и последующих отделений (по отношению к станам грубого волочения) формировались с учетом количества необходимого оборудования по следующим формулам:

1) для травильного отделения

$$T_{OB,B}(m_c, d, \mu) = \frac{T_B^1(m_c, d, \mu)}{Z_B(m_c, d, \mu)}, \quad (10)$$

2) для термического отделения

$$T_{OB,\Pi}(m_{\Gamma}, d, N_{\Pi}) = \frac{T_{\Pi}^1(m_{\Gamma}, d, N_{\Pi})}{Z_{\Pi}(m_{\Gamma}, d, N_{\Pi})}, \quad (11)$$

3) для отделения тонкого волочения

$$T_{OB,ST}(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma}) = \frac{T_{ST}^1(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma})}{Z_{ST}(m_{\Gamma}, d, N_{\Gamma})}; \quad (12)$$

4) для отделения меднения

$$T_{OB,M}(m_{\Gamma}, d, N_M, g) = \frac{T_M^1(m_{\Gamma}, d, N_M, g)}{Z_M(m_{\Gamma}, d, N_M, g)}. \quad (13)$$

Для проверки возможности обеспечения бесперебойного функционирования основных агрегатов (оборудования) сравнивались в каждом отделении партионные такты работы оборудования  $T_{OB}$  и такты работы транспортных средств  $T_{TP}^{BX}$ ,  $T_{TP}^{BЫX}$ , используемых на входе (при подаче исходных полуфабрикатов) и выходе (при выдаче обработанных полуфабрикатов или изделий). Предварительно были построены модели партионных тактов работы транспортных средств: малого и большого конвейеров ( $T_{TP,\beta 2}^{MK}$ ,  $T_{TP,\beta 2}^{BK}$ ), передаточных тележек ( $T_{TP,\beta 2}^{TP}$ ), электромостовых кранов ( $T_{TP,\beta 2}^{KP}$ ), электрокаров ( $T_{TP,\beta 2}^{ЭК}$ ).

Сравнение тактов осуществлялось попарно при следующих условиях: если  $T_{TP}^{BX} \theta_{\beta 2} < T_{OB} \theta_{\beta 2}$  и  $T_{TP}^{BЫX} \theta_{\beta 2} < T_{OB} \theta_{\beta 2}$ , то реализуется бесперебойная работа основных агрегатов; если  $T_{TP}^{BX} \theta_{\beta 2} \geq T_{OB} \theta_{\beta 2}$  и  $T_{TP}^{BЫX} \theta_{\beta 2} \geq T_{OB} \theta_{\beta 2}$ , то требуются корректировки количества используемых транспортных средств – такие, чтобы выполнялись первые условия.

## Выводы

Настоящая публикация является первым сообщением, связанным с решением сложной задачи оценивания нормативной длительности выполнения заказов на изготовление партий стальной проволоки в рамках многоструктурного производственного комплекса, включающего ведущее отделение грубого волочения, а также смежные отделения: травильное, термическое, тонкого волочения, меднения. Предлагаемая процедура оценивания включает следующие основные этапы: описание и анализ действующей производственной системы; построение декомпозиционных моделей длительности операций, их элементов и процессов; формирование ситуационно-нормативных моделей штучных и партионных тактов работы оборудования и отделений комплекса; определение количества необходимого (для согласованной работы) оборудования в смежных отделениях по отношению к ведущему отделению. Перечисленные модели положены в основу алгоритма оценивания длительности изготовления партий стальной проволоки, который будет представлен в следующем сообщении.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dušan Malindzak, Andrzej Gazda. The principles and specifics of logistics of metallurgical production // Metal. 2011. No. 5. P. 18 – 20.

2. Jelena R. Jovanovic, Dragan D. Milanovic, Radisav D. Manufacturing Cycle Time Analysis and Scheduling to Optimize Its Duration // *Journal of Mechanical Engineering*. 2013. No. 7. P. 512 – 524.
3. Масло А.В. Анализ длительности производственного цикла упаковочной продукции // *Изв. вуз. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2009. № 4. С. 91 – 100.
4. Duan Gang, Chen Li, Li Yin-Zhen, Song Jie-Yan and Akhtar Tanweer. Optimization on Production-Inventory Problem with Multi-stage and Varying Demand // *Journal of Applied Mathematics*. 2012. No. 10. P. 1 – 16.
5. Geraskin M.I., Egorova V.V. The algorithm for dynamic optimization of the production cycle in bearing industry // *Information Technology and Nanotechnology*. 2016. Vol. 1638. P. 552 – 568.
6. Šnapka P., Mikušová M., Janovská K., Samolejová A. Simulation model of metallurgical production management // *Metalurgija*. 2013. Vol. 52. No. 2. P. 429 – 431.
7. Radim Lenort, Jezy Feliks. Production logistics concepts and systems in metallurgical companies // *Metal*. 2013. No. 5. P. 15 – 17.
8. Malindžák D. Application of logistic principles in metallurgical production // *Metalurgija*. 2012. Vol. 51. No. 3. P. 345 – 348.
9. Korytkowski P. Optimization of production capacity in intangible flow production systems // *IFAC*. 2006. P. 1 – 6.
10. Frank Kübler, Johannes Böhner, 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.
11. Медиков В.Я. Производственные мощности и их использование. – М.: МГУИ, 2002. – 264 с.
12. Кулаков С.М., Мусатова А.И., Кадыков В.Н. Ситуационные модели производительности человеко-машинных систем (на примере волоочильных станков) // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2018. Т. 65. № 6. С. 485 – 489.
13. Мусатова А.И., Кулаков С.М. Разработка нормативной модели функционирования термического отделения метизного производства // *Научное обозрение*. 2016. № 15. С. 76 – 82.
14. 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.
15. 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.
16. Мокеева Н.С., Заев В.А., Сенникова Е.В. Пути сокращения длительности производственного цикла в условиях гибкого производства // *Изв. вуз. Северо-кавказский регион*. 2008. № 5. С. 104 – 106.
17. Благих И.А., Сальников Д.Ю. Управление производственным циклом предприятия (организации) // *Проблемы современной экономики*. 2010. № 4 (36). С. 1 – 7.
18. Malindžák D., Gazda A., Malindžáková M., Vitko D. The basic principles and rules for heuristic model creation in metallurgy // *Metalurgija*. 2013. Vol. 52. No. 4. pp. 549 – 552.
19. Васильев Г.Л., Ефимов Ю.В., Манаков А.А., Чамеев В.В. Математические модели формирования длительности цикла для станочного оборудования // *Молодой ученый*. 2015. № 13. С. 100 – 105.
20. Анисимова Э.С. Моделирование производственной поточной линии // *Экономика и социум*. 2015. № 3 (16). С. 29 – 34.

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

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 6, pp. 484–491.

## MULTIVARIATE ESTIMATION OF PRODUCTION DURATION OF STEEL WIRE BATCHES ON THE BASIS OF SITUATIONAL-REGULATORY MODELS. MESSAGE 1

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

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

**Abstract.** The article considers the tasks of system analysis and development of models required for the synthesis of a situational (multivariate) procedure for estimating the standard duration of manufacturing a batch of products within a multi-structural steel wire complex (object of study), including independently functioning units with continuous, semi-continuous and discrete technological processes (etching, drawing, annealing, copper plating), which are connected by a single material flow. The complex is distinguished by: a variety of technological routes, allowing to produce a wide range of products (steel wire), corresponding to different standards, steel grades, diameters, shapes and masses of finished products; multivariate specialization of drawing mills; flexible connections between departments; parallel, sequential and combined work of the main and auxiliary equipment; equipment by specialized vehicles (cranes, conveyors, transfer carts, electric vehicles). During the system analysis of the research object, the following issues were resolved: a number of technological routes in the branches of complex were identified and described, their characteristics were evaluated. Graphic models of production processes have been developed, displaying sequence and parallelism of operations, their decomposition into elements and microelements for each compartment. The determining factors were identified characterizing the organization of production processes for all departments. Regulatory models have been developed for the

duration of operations based on the integration of various research methods. The solution of the above task is based on the clock approach and includes: building a factor model of the piece situational tact of the *s*-type drawing mill, “pickling bath-tap” subsystem, heat treatment furnace, and the copper plating line. Additionally, the concept of piece equivalent operation of equipment was introduced to bring to a comparable form with the strokes of coarse-drawing mills. To ensure the coordinated work of the coarse drawing department with other departments, an appropriate amount of pickling, thermal, fine drawing equipment and copper plating has been determined. Models of interconnected part-time steps of the work of previous and subsequent branches (in relation to the rough drawing department) are formed. The degree of work coordination was determined on the basis of comparison of the part-time work cycles of equipment and vehicles at the entrance and exit of each section. To do this, regulatory models of vehicle operation were pre-built. The results of the performed work allow us to proceed to the presentation of the algorithm itself for estimating production duration of batches of steel wire, which will be presented in the second message.

**Keywords:** steel-wire complex, technological routes, drawing mills, situational-normative tact models, models for estimating the required amount of equipment.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-484-491

### REFERENCES

1. Malindzak D., Gazda A. The principles and specifics of logistics of metallurgical production. *Metal*. 2011, no. 5, pp. 18–20.

2. Jovanovic J.R., Milanovic D.D., Radisav D. Manufacturing cycle time analysis and scheduling to optimize its duration. *Journal of Mechanical Engineering*. 2013, no. 7, pp. 512–524.
3. Maslo A.V. Analysis of duration of production cycle of packaging products. *Izv. vuz. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela*. 2009, no. 4, pp. 91–100. (In Russ.).
4. Duan Gang, Chen Li, Li Yin-Zhen, Song Jie-Yan, Akhtar Tanweer. Optimization on production-inventory problem with multistage and varying demand. *Journal of Applied Mathematics*. 2012, no. 10, pp. 1–16.
5. Geraskin M.I., Egorova V.V. The algorithm for dynamic optimization of the production cycle in bearing industry. *Information Technology and Nanotechnology*. 2016, vol. 1638, pp. 552–568.
6. Šnapka P., Mikušová M., Janovská K., Samolejová A. Simulation model of metallurgical production management. *Metallurgija*. 2013, vol. 52, no. 2, pp. 429–431.
7. Radim L., Jezy F. Production logistics concepts and systems in metallurgical companies. *Metal*. 2013, no. 5, pp. 15–17.
8. Malindžák D. Application of logistic principles in metallurgical production. *Metallurgija*. 2012, vol. 51, no. 3, pp. 345–348.
9. Korytkowski P. Optimization of production capacity in intangible flow production systems. *IFAC*. 2006, pp. 1–6.
10. 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.
11. Medikov V.Ya. *Proizvodstvennye moshchnosti i ikh ispol'zovanie* [Production facilities and their use]. Moscow: MGUP, 2002, 264 p. (In Russ.).
12. 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. 65, no. 6, pp. 485–489. (In Russ.).
13. Musatova A.I., Kulakov S.M. Development of a regulatory model of functioning thermal department of hardware mill. *Nauchnoe obozrenie*. 2016, no. 15, pp. 76–82. (In Russ.).
14. 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.).
15. Mikhailova L.V., Paramonov F.I., Chudin A.V. *Formirovanie i operativnoe upravlenie proizvodstvennymi sistemami na baze potочно-grupпового производства v avtomatizirovannom rezhime* [Formation and operational management of production systems on basis of flow-group production in an automated mode]. Moscow: ITTs MATI, 2002, 60 p. (In Russ.).
16. Mokeeva N.S., Zaev V.A., Sennikova E.V. Ways to reduce duration of production cycle at flexible cutting production. *Izv. vuz. Severokavkazskii region*. 2008, no. 5, pp. 104–106. (In Russ.).
17. 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.).
18. Malindžák D., Gazda A., Malindžáková M., Vitko D. The basic principles and rules for heuristic model creation in metallurgy. *Metallurgija*. 2013, vol. 52, no. 4, pp. 549–552.
19. Vasil'ev G.L., Efimov Yu.V., Manakov A.A., Chameev V.V. Mathematical models of duration development of machine equipment cycle. *Molodoi uchenyi*. 2015, no. 13, pp. 100–105. (In Russ.).
20. Anisimova E.S. Modeling of production line. *Ekonomika i sotsium*. 2015, vol. 16, no. 3, pp. 29–34. (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)  
**Kadykov V.N.**, 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