

Экономико-математические методы и модели

DOI: 10.18721/JE.13312

УДК 338.984

МОДЕЛЬ ВЫБОРА ПРИОРИТЕТА ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТНЫХ КАРТ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Левенцов А.Н., Лавров А.С., Маркина А.С.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Одной из важнейших задач в нашей стране является дальнейшее развитие экономики промышленного производства, включая повышение глубины передела отечественной промышленной продукции, предопределяющее необходимость автоматизации и компьютеризации машиностроительного производства, создание современных методик цифровой экономики в части оптимизации кривой предложения. Это обуславливает постановку задач совершенствования системы планирования и управления машиностроительного производства. Машиностроительным предприятиям необходима система планирования загрузки производственных мощностей, которая бы объективно отражала установившуюся экономическую ситуацию, чтобы принимать целесообразные управленческие решения. Главной задачей планирования является формирование графика производства, максимальная загрузка рабочих центров с учетом имеющихся ограничений и приоритетов заказов. В работе показано укрупненное, или межцеховое, планирование графика производства на длительный горизонт планирования и детальное, или пооперационное внутрицеховое, планирование с учетом графика производства, доступности рабочих центров и производственных заделов. Проведено сравнение уровней планирования. На этапе укрупненного планирования происходит планирование графика производства, представляющего собой календарное расписание выполнения маршрутных карт производства и позволяющего оценить исполнимость полученных заказов на производство к дате потребности, перепланировать построенный график при внесении изменений и отклонениях в производственных планах. На этом этапе при первичном размещении заказа в графике производства по каждой строке определяется возможность исполнения заказа к указанной дате потребности. В случае невозможности обеспечения производства конкретного изделия к дате потребности, рассчитывается дата его предполагаемого выпуска. На уровень детального планирования передается график производства — объем работ на интервал планирования, для исполнения которого в заданном интервале хватает доступности групп рабочих центров. В рамках данного интервала планируется конкретное время выполнения для каждой операции с определением конкретных рабочих центров, которые будут задействованы на выполнение операций. В результате проведенных математических расчетов получена рекомендованная последовательность планирования маршрутных карт производства. Представленная в работе математическая модель выбора приоритета планирования маршрутных карт производства позволяет рассчитать исполнимость заказов в срок, а также определить планируемый интервал времени, в который должна быть выполнена каждая маршрутная карта.

Ключевые слова: маршрутная карта, планирование, критерии планирования, модель выбора, машиностроение, оптимизация, кривая предложения, загрузка, математическая модель, напряженность

Ссылка при цитировании: Левенцов А.Н., Лавров А.С., Маркина А.С. Модель выбора приоритета планирования маршрутных карт в машиностроительном производстве // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2020. Т. 13, № 3. С. 158–173. DOI: 10.18721/JE.13312

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

MODEL OF PLANNING PRIORITY CHOICE FOR PRODUCTION MAPPING IN MACHINE INDUSTRY

A.N. Leventsov, A.S. Lavrov, A.S. Markina

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

One of the most important tasks in our country is the further development of the economy of industrial production, including increasing the depth of redistribution of domestic industrial products. It predetermines the need for automation and computerization of machine-building production, introduction of modern methods of the digital economy in terms of optimizing the supply curve. This leads to setting the tasks of improving the planning and management system of engineering production. Machine-building enterprises need a capacity planning system that would objectively reflect the established economic situation for efficient management decision-making. The main planning objective is to form a production schedule, maximum load of work centers taking into account the existing restrictions and priorities of orders. The paper shows enlarged, or inter-workshop, planning of a production schedule for a long planning horizon and detailed, or operational intra-workshop, planning. We take the production schedule, the availability of work centers and production facilities into account. The planning levels are compared. At the stage of enlarged planning, a production schedule consists in a calendar schedule for the execution of production routing maps. It allows to evaluate the feasibility of received orders for production by the date of need, to reschedule the constructed schedule when changes and deviations take place in the production plans. At this stage, during the initial placement of the order in the production schedule for each line, the possibility of fulfilling the order by the specified requirement date is determined. If it is impossible to ensure the production of a particular product by the date of need, the date of its intended release is calculated. The production schedule is transferred to the level of detailed planning – the volume of work per planning interval, for the execution of which the availability of groups of work centers is enough for a given interval. Within this interval, a specific execution time is planned for each operation with the definition of specific work centers that will be involved in the execution of operations. As a result of mathematical calculations, we obtained a recommended sequence of planning production route maps. The mathematical model of choosing the planning priority for production mapping presented in the work allows us to calculate the feasibility of orders on time, and also to determine the planned time interval in which each routing map should be completed.

Keywords: route map, planning, planning criteria, selection model, engineering, optimization, supply curve, loading, mathematical model, tension

Citation: A.N. Leventsov, A.S. Lavrov, A.S. Markina, Route maps planning priority model in engineering, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 13 (3) (2020) 158–173. DOI: 1018721/JE.13312

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Задача развития экономики промышленного производства, в том числе повышения глубины передела отечественной промышленной продукции [12] предопределяет необходимость автоматизации и компьютеризации промышленного, в том числе и машиностроительного производства, создания современных методик цифровой экономики в части оптимизации кривой предложения [11], что обуславливает постановку задач совершенствования системы планирования и управления машиностроительного производства [8]. Статья базируется на ряде уже разработанных и апробированных методик, изложенных в цикле статей П.А. Аркина и К.А. Соловейчика 2017 г. [2–5, 16, 19, 20], их дальнейших разработках [6, 17, 18] и работах других авторов [1, 7, 9, 10, 13–15].

Машиностроительному предприятию необходима система планирования загрузки производственных мощностей, которая будет объективно отражать установившуюся экономическую ситуацию для принятия целесообразных управленческих решений. В качестве внедряемой на машиностроительном предприятии ОАО «ЛЕНПОЛИГРАФМАШ» такой системы была выбрана базирующаяся на платформе 1С система 1С:MES.

Этот выбор обусловлен следующими факторами:

- на предприятии используется система 1С:УПП (управление промышленным предприятием), а в 1С:MES реализован типовой обмен с 1С:УПП;
- все программы 1С имеют открытый код, поэтому их возможно дорабатывать и поддерживать силами собственных специалистов (а не специалистами разработчика);
- системы программ на базе 1С являются одними из самых недорогих.

Производство, на базе которого происходила разработка и внедрение системы 1С:MES, относится к серийному машиностроительному производству.

Целью данной работы стала разработка методики планирования, в том числе создание математической модели, выбор приоритета планирования маршрутных карт производства на первом уровне планирования.

Планирование в 1С:MES

Главная задача планирования — это формирование графика производства, максимальная загрузка рабочих центров (РЦ) с учетом ограничений и приоритетов заказов (подсказать планировщику, какие заказы не укладываются в сроки для принятия оперативных решений). Существует два уровня планирования:

- укрупненное (APS) планирование — межцеховое планирование графика производства на длительный горизонт планирования;
- детальное (MES) планирование — пооперационное внутрицеховое планирование с учетом графика производства, доступности РЦ, производственных заделов.

Сравнение уровней планирования представлено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение укрупненного и детального планирования

№	Характеристика	APS	MES
1.	Горизонт планирования	6 месяцев - 1 год	1-2 месяца
2.	Частота перепланирования графика/расписания производства	При появлении новых производственных заказов, внесение технологических указаний/улучшений, отсутствии обеспечения материалами и покупными комплектующими, отклонении расписания производства (MES) от Главного плана (APS)	При появлении новых маршрутных карт производства, технологических указаний/улучшений, возникновении аварийных ремонтов, изменении маршрута производства, изменении сроков Главного плана
3.	Учет доступности оборудования	APS-планирование учитывает доступность каждого рабочего центра, но не назначает конкретный рабочий центр на выполнение операции	MES-планирование учитывает доступность каждого рабочего центра и назначает рабочий центр на выполнение операции. MES- планирование проверяет РЦ только из указанной группы заменяемости РЦ в Маршрутных картах производства (МК)
4.	Учет ремонтов оборудования	При планировании необходимо учитывать график планово-предупредительных ремонтов (ППР) и время остановки станка на аварийный ремонт	
5.	Детализация планирования	Год, месяц, неделя, час	Минуты, секунды

APS-планирование

На этом этапе происходит планирование графика производства, представляющего собой календарное расписание выполнения маршрутных карт производства. Уровень APS передает на уровень MES-планирования список операций маршрутной карты, которые должны быть выполнены в каждый интервал времени (см. рис. 1). График производства позволяет оценить исполнимость полученных заказов на производство к дате потребности, перепланировать построенный график при внесении изменений и отклонениях в производственных планах.

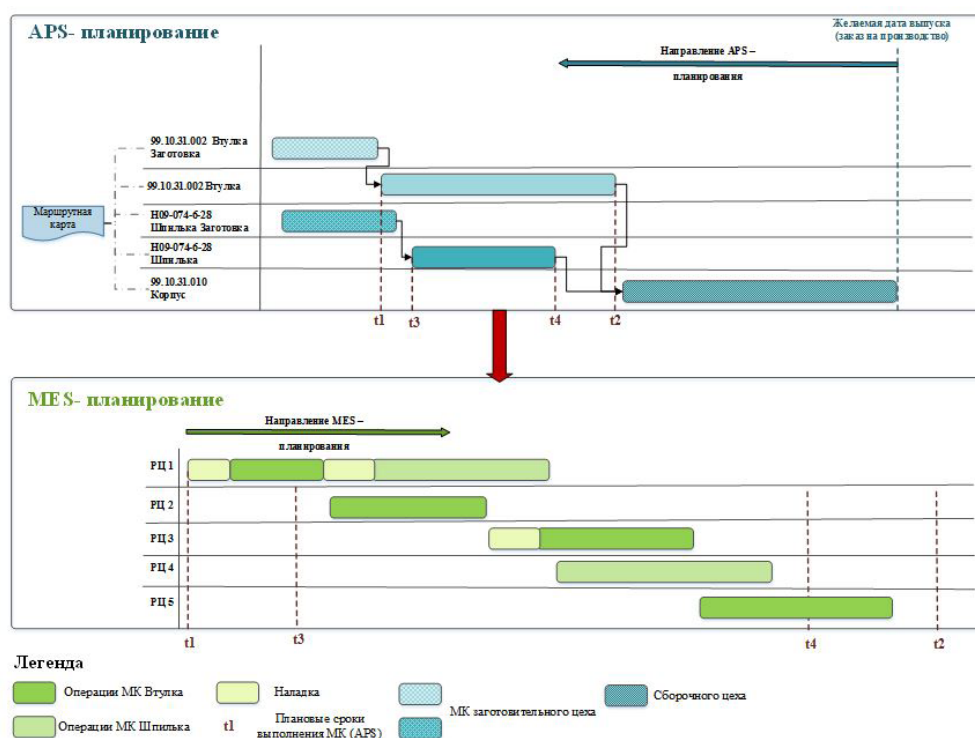


Рис. 1. Сравнение MES- и APS-планирования

На уровне укрупненного планирования, при первичном размещении заказа в графике производства по каждой строке определяется возможность исполнения заказа к указанной дате потребности. В случае невозможности обеспечения производства конкретного изделия к дате потребности, рассчитывается дата его предполагаемого выпуска. Ответственный пользователь (планировщик) должен принять решение о дальнейших шагах:

- согласовать изменение даты потребности и внести исправления в заказ на производство;
- передать часть тех. операций на кооперацию;
- пересмотреть приоритетность заказов на производство для высвобождения ограничивающих ресурсов.

Под перепланированием понимается реформирование существующего графика производства по конкретным заказам с учетом текущей ситуации и изменившихся исходных данных.

Причинами перепланирования маршрутных карт могут быть:

1. Внешние:

- изменение приоритетов заказов;
- появление новых срочных заказов клиентов.

2. Внутренние:

- аварийный ремонт рабочих центров (если на уровне MES не хватает доступности оставшихся РЦ для выполнения маршрутной карты в сроки, установленные Главным планом. Если же доступности хватает и сроки укрупненного плана не сдвигаются, перепланирование не происходит);

- изменение доступности ресурсов;
- критичная задержка в выполнении отдельных маршрутных карт и др.;
- передача технологических операций маршрутных карт на кооперацию;
- изменение маршрута производства.

Модель планирования — точно к сроку (в экономике принятое название — «точно в срок»).

Обратное календарное планирование позволяет соблюдать сроки выполнения операций, установленные заказчиками или определенные последующими операциями согласно основному производственному плану.

В данном подходе установлены сроки выполнения последней операции изготовления продукции, и после этого осуществляется планирование производства изделий в обратной последовательности. В нем также назначается срок допустимого завершения выполнения операции (в заказе на производство) (см. рис. 2).

Рис. 2. Интерфейс документа «Заказ на производство»

Сначала выстраивается очередь МК. В случае невозможности обеспечения производства изделия к дате потребности, рассчитывается дата предполагаемого выпуска. Ответственный пользователь (планировщик) должен принять решение о дальнейших шагах:

- согласовать изменение даты потребности и внести исправления в заказ на производство;
- передать часть технологических операций на кооперацию.

MES-планирование

На уровень MES-планирования передается график производства (Главный план) — объем работ на интервал планирования, для исполнения которого в заданном интервале хватает доступности групп рабочих центров. В рамках интервала MES планирует конкретное время выполнения для каждой операции с определением конкретных рабочих центров, которые будут задействованы на выполнение операций.

В основе такого механизма планирования заложена концепция MRP II (Manufacturing Resource Planning — Планирование производственных ресурсов). Данная концепция задаёт принципы детального планирования производства предприятия, включающие учет заказов, планирование загрузки производственных мощностей (оборудования), моделирование хода производства, его учет, планирование выпуска готовых изделий, оперативное корректирование плана и производственных заданий.

Объектом планирования являются технологические операции (без технологических переходов) технологических карт производства. Технологические операции маршрутных карт содержат необходимую информацию о нормативных сроках исполнения, зависимостях от других операций, а также прочую аналитическую информацию (заказы на производство и т.п.) (см. рис. 3).

Все операции маршрутных карт, переданные на уровень MES, планируются прямым планированием, с учетом сроков выполнения МК, полученных после APS-планирования.

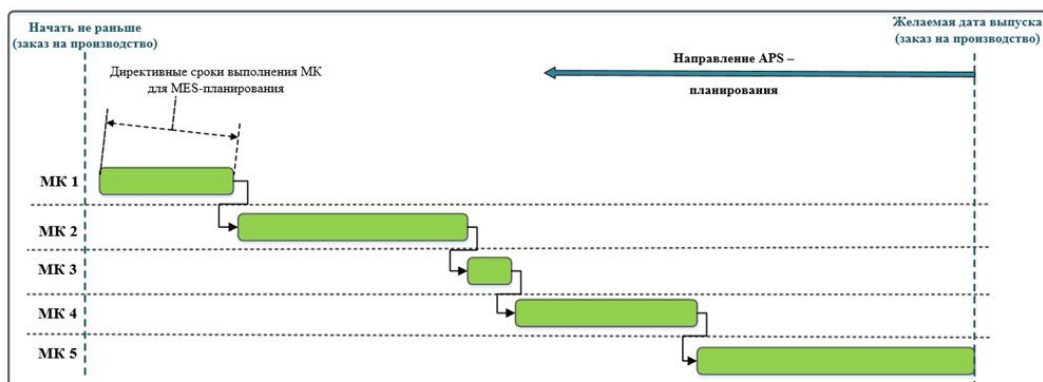


Рис. 3. Схема планирования маршрутных карт

Критерии планирования

На уровне MES-планирования будут использоваться несколько моделей планирования в соответствии с выбранными критериями оптимизации.

При запуске пооперационного планирования, ответственному пользователю необходимо указать следующие параметры:

Момент планирования — определяет момент времени, начиная с которого будет выполняться размещение технологических операций в расписании производства.

Горизонт планирования — определяет интервал времени, на котором будут размещаться операции, начиная от момента планирования.

Подразделение — подразделение, расписание которого необходимо рассчитать.

Модели планирования — указываются модели планирования, в соответствии с которыми будет выполнен расчет расписания.

Для каждой модели планирования в процессе расчета будет построен отдельный вариант расписания (см. рис. 4).

Модели планирования ответственный пользователь создает самостоятельно, используя критерии оптимизации (см. рис. 5).

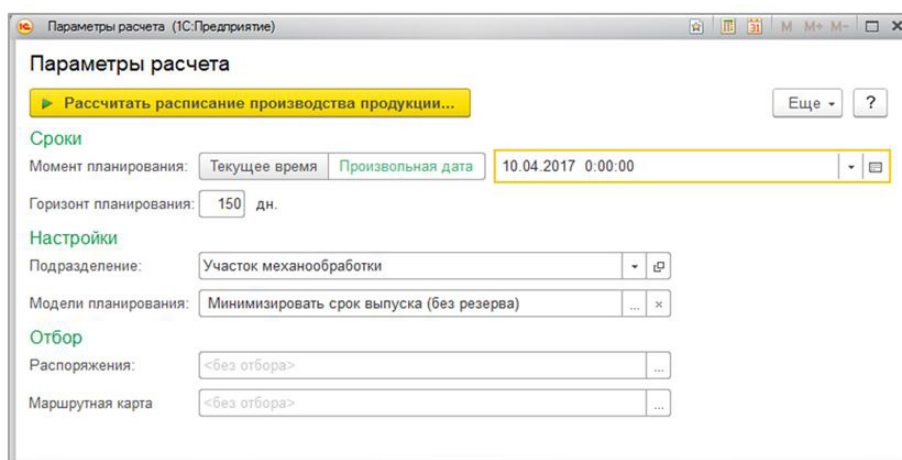


Рис. 4. Параметры расчета расписания производства

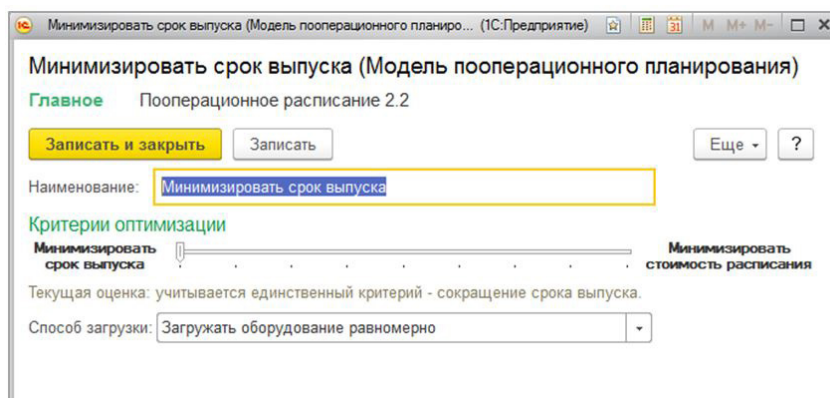


Рис. 5. Критерии оптимизации в моделях планирования

В группе «Критерии оптимизации» определяется значимость (весовая оценка) двух сводных критериев оптимизации: минимизировать срок выпуска и минимизировать стоимость расписания. Критерии оптимизации оказывают влияние на модель согласно своему весу (см. рис. 6). Вес критерия — процентное соотношение важности влияния данного критерия на результат планирования — расписание производства (сумма весов всех критериев = 1) (см. рис. 7).

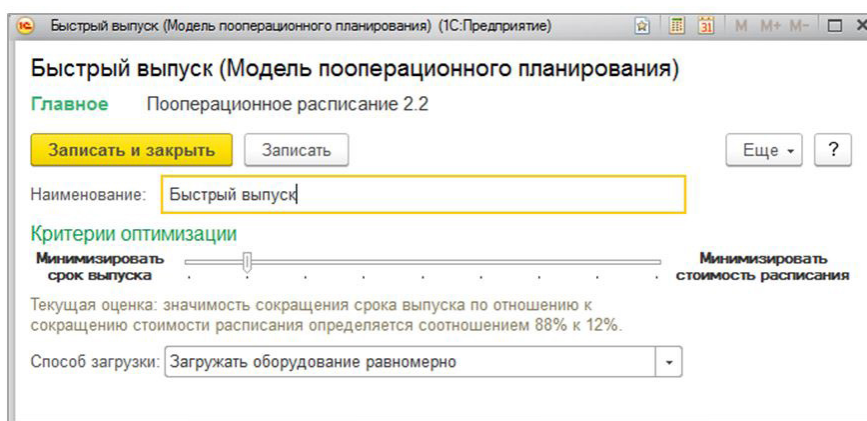


Рис. 6. Способ загрузки оборудования

Способ загрузки определяет принцип загрузки взаимозаменяемых рабочих центров:

- максимизировать загрузку единицы оборудования — определяет, что при расчете расписания система будет стремиться загрузить минимальное количество рабочих центров данного вида, тем самым, максимизируя загрузку отдельно взятой единицы оборудования;
- загружать оборудование равномерно — определяет, что при расчете расписания система будет стремиться загрузить максимальное количество рабочих центров данного вида, обеспечив тем самым равномерную загрузку всего парка оборудования.

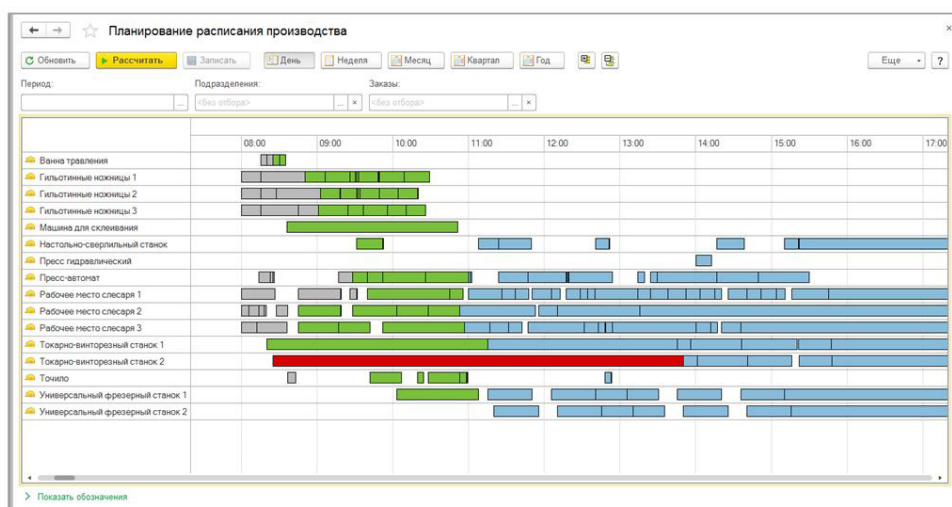


Рис. 7. Диаграмма Ганта расписания производства

Выбор приоритетов маршрутных карт

Маршрутная карта составляется на партию деталей/сборок/изделий и содержит в себе описание технологического процесса изготовления по всем операциям в технологической последовательности с указанием соответствующих данных по оборудованию, материальным и другим нормативам. В маршрутной карте указывается цех и участок, где должна производиться обработка детали и ряд других сведений, необходимых главным образом для планирования производства.

Для решения задачи построения планов в системе 1С:MES применяется математический аппарат теории расписаний, в частности, эвристический алгоритм, сочетающий «жадные стратегии» и «стратегии ограниченного перебора», элементы теории графов. Рассматривается частный случай построения расписания выполнения работ с учетом отношений предшествования и ограничений на ресурсы, с прерываниями обслуживания требований (PRCPSP — Preemption Resource-Constrained Project Scheduling Problem).

Далее в работе будет рассмотрена часть алгоритма APS-планирования, позволяющая рассчитать приоритетность планирования маршрутных карт.

Как говорилось ранее, на уровне APS-планирования вначале выстраивается очередь маршрутных карт производства.

Для определения очереди планирования маршрутных карт используется безразмерная числовая характеристика, называемая напряженностью (H), под которой понимается соотношение между временем, располагаемым для производства, и остающейся трудоемкостью изготовления партии деталей [1, 10].

Производственную напряженность можно вычислить по каждой операции, единице оборудования, а также по всему подразделению в целом. Напряженность по оборудованию считается как сумма напряженностей ожидающих на нем операций, а напряженность по подразделению в целом — сумма напряженностей операций или оборудования.

Величина времени, необходимого для выполнения одной операции, равна сумме времени выполнения непосредственно операции, подготовительно-заключительного времени, а также времени, необходимого на транспортировку с одного РЦ на другой.

Величина запаса рабочего времени может принимать положительное и отрицательное значение (маршрутную карту невозможно разместить в плане, не сорвав сроков выполнения), а также быть равной нулю (плановое время окончания маршрутной карты равно дате потребности). Для разных знаков запасов рабочего времени следует использовать и разные зависимости.

Для каждой i -ой маршрутной карты формула расчета напряженности (H_i) будет равна:

$$H_i = \frac{T_{1i} + T_{2i}}{G} / \left(\frac{z_{1i}}{G} + 1 \right), \quad (1)$$

при $d_i - t \geq 0$ и

$$H_i = \frac{T_{1i} + T_{2i}}{G} \times \left(\frac{z_{2i}}{G} + 1 \right), \quad (2)$$

при $d_i - t < 0$

где T_{1i} — продолжительность изготовления, определяемая трудоемкостью работы, не выполненной на момент планирования, дней; T_{2i} — составляющая, обусловленная необходимостью передать работу на остающиеся операции, дней; z_{1i} — расчетный запас времени производства по отношению к заказу на производство, дней; z_{2i} — расчетное отставание по времени от заказа на производство, дней; G — количество доступных рабочих дней РЦ в плановом периоде, дней; t — момент планирования, дней. Момент времени графически можно представить точкой на временной оси. Момент планирования на первой итерации равен 0. На последующих итерациях к каждому t прибавляется время трудоемкости выполнения МК (т.е. определяется время, когда МК закончится); d_i — момент окончания крайнего срока изготовления из заказа на производство, дней.

При расчете величины G должны учитываться:

- Графики работы РЦ (интервалы доступности);
- Графики ППР (интервалы недоступности оборудования).

T_{1i} рассчитывается по формуле:

$$T_{1i} = \sum_{j=k_i}^{n_i} p_{ij} \times m_i \quad (3)$$

где k_i — номер первой незаконченной j -ой операции i -ой маршрутной карты; n_i — количество операций в маршрутной карте; p_{ij} — трудоемкость j -ой операции i -ой маршрутной карты, дней; m_i — количество производимых изделий в i -ой маршрутной карте, штук;

Величину T_{2i} определим из зависимости:

$$T_{2i} = \sum_{j=k_i}^{n_i} s_{ij} \quad s_{ij} = t_{пзij} + t_{тij} \quad (4)$$

где s_{ij} — трудоемкость необходимой транспортировки и наладки оборудования при проведении j -ой операции для i -ой маршрутной карты, дни; $t_{пзij}$ — подготовительно-заключительное время j -ой операции, i -ой маршрутной карты, дней; $t_{тij}$ — время, необходимое на транспортировку, дней.

Расчетный запас времени (z_i) доступный для планирования равен:

при $d_i - t \geq 0$ и

$$z_{1i} = d_i - t, \quad (5)$$

при $d_i - t < 0$

$$z_{2i} = t - d_i, \quad (6)$$

В технологическом процессе, утвержденном на исследуемом предприятии, не указано время транспортировки и подготовительно-заключительное, поэтому в расчете им пренебрегаем. Отсюда, напряженность маршрутной карты можно определить по формуле:

$$H_i = \left(\frac{1}{G} \sum_{j=k_i}^{n_i} p_{ij} \times m_i \right) / \left(\frac{d_i - t}{G} + 1 \right), \quad (7)$$

при $d_i - t \geq 0$ и

$$H_i = \left(\frac{1}{G} \sum_{j=k_i}^{n_i} p_{ij} \times m_i \right) \times \left(\frac{t - d_i}{G} + 1 \right), \quad (8)$$

при $t - d_i \geq 0$.

Сумма трудоемкостей маршрутных карт должна быть меньше количества доступных рабочих дней РЦ в плановом периоде, в противном случае необходимо его увеличить.

Целевой функцией ($f(H)$) в данном случае будет сумма максимальных на каждой итерации напряженностей маршрутных карт, которая стремится к минимуму (чем меньше напряженность производства, тем более оптимизирован график производства продукции).

$$f(H) = \sum_{q=1}^g H_q \rightarrow \min \quad (9)$$

где q — номер маршрутной карты с максимальным напряжением; g — количество маршрутных карт.

Составим математическую модель:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(H) = \sum_{q=1}^g H_q \rightarrow \min \\ H_i = \left(\frac{1}{G} \sum_{j=k_i}^{n_i} p_{ij} \times m_i \right) / \left(\frac{d_i - t}{G} + 1 \right), \quad \text{если } d_i - t \geq 0; \\ H_i = \left(\frac{1}{G} \sum_{j=k_i}^{n_i} p_{ij} \times m_i \right) \times \left(\frac{t - d_i}{G} + 1 \right), \quad \text{если } d_i - t < 0; \\ \sum p_i \leq G \\ H_i \geq 0; \\ p_i \geq 0; \\ G > 0; \\ g > 0; \\ i = 1 \dots a; j = 1 \dots b; \\ a \in N, b \in N. \end{array} \right. \quad (10)$$

Пример использования модели. Имеется 4 Маршрутные карты. Плановый период 3 месяца. $G = 64$.

Операции МК1, $m_1 = 3$

№ Операции	$t_{\text{шгп}}$, дней	$p_{ij} * m_1$, дней
1	1	3
2	0,67	2
3	0,67	2
4	0,34	1

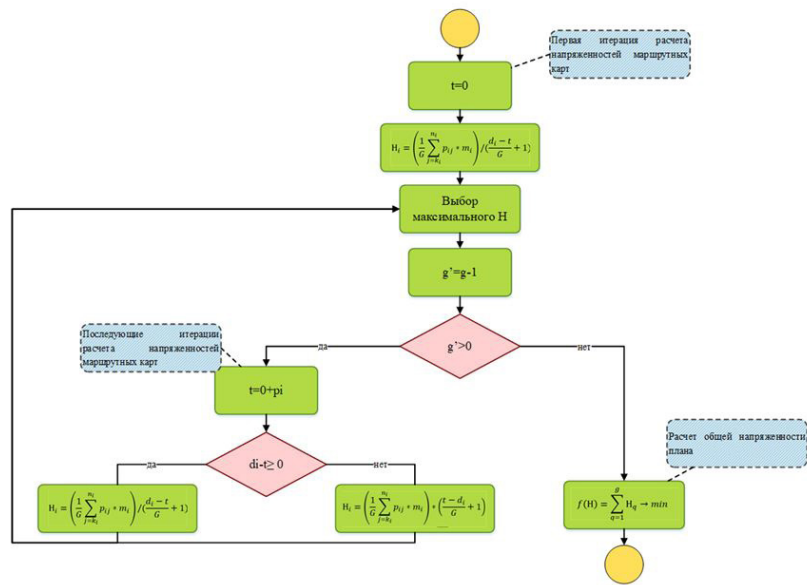


Рис. 8. Алгоритм расчета

Операции МК2, $m_2 = 6$

№ Операции	$t_{шт2}$, дней	$p_{2j} * m_2$, дней
1	0,67	4
2	0,5	3
3	1	6
4	0,25	1,5
5	0,25	1,5

Операции МК3, $m_3 = 6$

№ Операции	$t_{шт3}$, дней	$p_{3j} * m_3$, дней
1	0,41	2,5
2	0,5	3
3	0,08	1
4	0,34	2
5	0,41	2,5

Операции МК4, $m_4 = 6$

№ Операции	$t_{шт4}$, дней	$p_{4j} * m_4$, дней
1	2,5	5
2	1,5	3
3	1,25	2,5
4	2,5	5
5	3	6
6	0,75	1,5
7	1	2

№ маршрутной карты	Трудоемкость в днях, р	Дата из заказа на производство, d
1	8	27
2	16	30
3	10	30
4	25	25

Итерация 1. Для определения первого приоритета, положим, что $t = 0$. Для всех работ

$$H_1 = \frac{(p_{11} + p_{12} + p_{13} + p_{14}) \times m_1}{G} / \left(\frac{d_1 - t}{G} + 1 \right) = \frac{8}{64} / \left(\frac{27}{64} + 1 \right) = 0,125 / 1,4 = 0,089$$

$$H_2 = \frac{(p_{21} + p_{22} + p_{23} + p_{24} + p_{25}) \times m_2}{G} / \left(\frac{d_2 - t}{G} + 1 \right) = \frac{16}{64} / \left(\frac{30}{64} + 1 \right) = 0,25 / 1,47 = 0,17$$

$$H_3 = \frac{(p_{31} + p_{32} + p_{33} + p_{34} + p_{35}) \times m_3}{G} / \left(\frac{d_3 - t}{G} + 1 \right) = \frac{10}{64} / \left(\frac{25}{64} + 1 \right) = 0,156 / 1,39 = 0,11$$

$$H_4 = \frac{(p_{41} + p_{42} + p_{43} + p_{44} + p_{45} + p_{46} + p_{47}) \times m_4}{G} / \left(\frac{d_4 - t}{G} + 1 \right) = \frac{25}{64} / \left(\frac{25}{64} + 1 \right) = 0,39 / 1,39 = 0,28$$

В момент планирования $t = 0$ МК4 имеет наибольшее напряжение, следовательно, и наибольший приоритет. МК4 закончится в момент $t = 25$, при следующей итерации используем его. Для всех МК выполняется условие $d_i - t \geq 0$.

Итерация 2. $t = 25$.

$$H_1 = \frac{(p_{11} + p_{12} + p_{13} + p_{14}) \times m_1}{G} / \left(\frac{d_1 - t}{G} + 1 \right) = \frac{8}{64} / \left(\frac{27 - 25}{64} + 1 \right) = 0,125 / 1,03 = 0,121$$

$$H_2 = \frac{(p_{21} + p_{22} + p_{23} + p_{24} + p_{25}) \times m_2}{G} / \left(\frac{d_2 - t}{G} + 1 \right) = \frac{16}{64} / \left(\frac{30 - 25}{64} + 1 \right) = 0,25 / 1,078 = 0,23$$

$$H_3 = \frac{(p_{31} + p_{32} + p_{33} + p_{34} + p_{35}) \times m_3}{G} / \left(\frac{d_3 - t}{G} + 1 \right) = \frac{10}{64} / \left(\frac{30 - 25}{64} + 1 \right) = 0,156 / 1,078 = 0,14$$

В момент планирования при $t = 25$ МК2 имеет наибольшее напряжение, следовательно, и наибольший приоритет. МК2 закончится в момент $t = 41$, при следующей итерации используем его. Для МК1 и МК3 выполняется условие $d_i - t < 0$ – используем вторую формулу.

Итерация 3. $t = 41$.

$$H_1 = \frac{(p_{11} + p_{12} + p_{13} + p_{14}) \times m_1}{G} \times \left(\frac{t - d_1}{G} + 1 \right) = \frac{8}{64} \times \left(\frac{41 - 27}{64} + 1 \right) = 0,125 \times 1,2 = 0,15$$

$$H_3 = \frac{(p_{31} + p_{32} + p_{33} + p_{34} + p_{35}) \times m_3}{G} \times \left(\frac{t - d_3}{G} + 1 \right) = \frac{10}{64} \times \left(\frac{41 - 30}{64} + 1 \right) = 0,156 \times 1,17 = 0,18$$

В момент планирования $t = 41$ МК3 имеет наибольшее напряжение, следовательно, и больший приоритет, чем МК1. МК3 закончится в момент $t = 51$.

Итерация 4. $t = 51$

$$H_1 = \frac{(p_{11} + p_{12} + p_{13} + p_{14}) \times m_1}{G} \times \left(\frac{t - d_1}{G} + 1 \right) = \frac{8}{64} \times \left(\frac{51 - 27}{64} + 1 \right) = 0,125 \times 1,375 = 0,17$$

МК1 закончится в $t = 59$.

В результате расчета получаем рекомендованную последовательность планирования маршрутных карт производства.

Последовательность МК: 4, 2, 3, 1.

МК1 и МК3 будут просрочены (т.к. $d_i - t < 0$), поэтому планировщику необходимо либо согласовать новые сроки производства (например, с заказчиком), либо передать операции на кооперацию (и пересчитать план). Далее расчет повторяется снова, пока не будет принят устраивающий всех оптимальный вариант.

Оптимальное значение целевой функции при заданных параметрах: $f(H) = 0,28 + 0,23 + 0,18 + 0,17 = 0,86$.

Заключение

Математический аппарат системы 1С:MES в своей основе сочетает стратегии ограниченного перебора и элементы теории графов.

Планирование в системе 1С:MES разделено на 2 уровня: APS- и MES-планирование, которые имеют значительные отличия.

На уровне APS определяется выполнимость заказов на производство. Рассчитать выполнимость заказов в срок позволяет представленная в данной работе математическая модель выбора приоритета планирования маршрутных карт производства. Модель также позволяет определить планируемый интервал времени, в который должна быть выполнена каждая маршрутная карта. Приоритетность маршрутных карт определяется на уровне APS-планирования. Результатом планирования является Главный план, который спускается на уровень MES-планирования.

Горизонтом планирования APS может быть год и более.

Главный план передается на уровень MES-планирования. В рамках интервала MES планирует конкретное время выполнения для каждой операции, с определением конкретных рабочих центров, которые будут работать над выполнением операций. Горизонт планирования не большой: от одной смены до месяца. Уровень характеризуется высокой частотой перепланирования (ситуация в цехе динамична, изменения происходят постоянно — аварийные ремонты оборудования, невыход запланированного количества сотрудников, необеспеченность заготовками и пр.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абчук В.А., Лифшиц А.Л., Федулов А.А.** Автоматизация управления. М.: Радио и связь, 1984. 264 с.
2. **Аркин П.А., Соловейчик К.А., Аркина К.Г.** Методология оптимизационных подходов к процессам управления производством в машиностроении // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2017. № 1(103). Ч. 2. С. 69–77.
3. **Аркин П.А., Соловейчик К.А., Аркина К.Г.** Реализация методологии оптимизационных подходов при разработке алгоритма модуля диспетчирования производства на машиностроительном // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2017. № 2(104). С. 94–100.
4. **Аркин П.А., Соловейчик К.А., Аркина К.Г.** Реализация методологии оптимизационных подходов при разработке алгоритма модуля планирования производства на машиностроительном предприятии // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2017. № 3(105). С. 63–71.
5. **Аркин П.А., Соловейчик К.А., Аркина К.Г.** Реализация методологии оптимизационных подходов при разработке системы бизнес анализа и прогнозирования для машиностроительного

предприятия // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2017. № 6(108). С. 57–67.

6. **Аркин П.А., Муханова Н.В., Овчар Б.А.** Решение задачи оперативно-производственного планирования машиностроительного предприятия с помощью «жадного» и генетического алгоритмов // Организатор производства. 2018. № 26–2. С. 17–29. DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-2-17-29

7. **Бабкин А.В., Пестова А.Ю., Ли Д.В., Туктушев Д.** Методы принятия решений в задачах обоснования развития цифровой экономики и промышленности // Цифровые технологии в экономике и промышленности (ЭКОПРОМ-2019). Сборник трудов национальной научно-практической конференции с международным участием / Под ред. А.В. Бабкина. СПб.: Политех-Пресс, 2019. С. 732–738. DOI: 10.18720/IEP/2019.5/96

8. **Бондаренко С.П.** Математические модели и алгоритмы MES-системы // Материалы III Международной конференции Белгосуниверситета. Ч.2. Информационные системы и технологии. Минск: БГУ, 2006. С. 108–113.

9. **Глухов В.В., Сюняева Д.А.** Организационно-производственный инжиниринг как инструмент промышленной политики на предприятии // Инновации и импортозамещение в промышленности: экономика, теория и практика / Под ред. А.В. Бабкина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. С. 347–374.

10. **Ильина Т.В., Левенцов В.А.** Планирование загрузки оборудования с учетом дефицита производственных ресурсов // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием, 14–19 нояб. 2016. Ч. 1. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 21–23.

11. **Левенцов А.Н., Левенцов В.А., Ходырев В.В.** Организационные сопротивления изменениям в условиях цифровой трансформации промышленного предприятия // Промышленная политика в цифровой экономике: проблемы и перспективы. Труды научно-практической конференции с международным участием / Под ред. А.В. Бабкина. СПб: СПбПУ, 2017. С. 420–427.

12. **Мауэргауз Ю.Е.** Динамическое групповое планирование для многостадийного производства // Машиностроитель. 2014. № 4. С. 13–24.

13. **Овчар Б.А., Левенцов В.А.** Особенности применения теории ограничений Голдратта при реализации схем планирования на промышленном предприятии // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады / Отв. ред. В.Э. Гасумянц, Д.Д. Каров. СПб.: СПбПУ, 2016. С. 259–263.

14. **Овчар Б.А., Левенцов В.А.** Реализация схемы планирования на промышленном предприятии в соответствии с теорией ограничений Голдратта // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием, 14–19 нояб. 2016. Ч. 1. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 39–42.

15. **Радаев А.Е., Левенцов В.А.** Системы поэтапного имитационного моделирования производственных процессов // Организатор производства. 2011. № 3(50). С. 30–33.

16. **Соловейчик К.А., Аркин П.А.** Методические вопросы стимулирования роста глубины передела промышленной продукции субъектами Российской Федерации // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2015. № 4(94). С. 25–30.

17. **Соловейчик К.А., Левенцов В.А., Фарбер Э.М.** Модель выбора оборудования при техническом перевооружении предприятия // Организатор производства. 2018. № 26–2. С. 84–94. DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-2-84-94

18. **Соловейчик К.А., Левенцов В.А., Фарбер Э.М.** Модель выбора поставщика при техническом перевооружении предприятия // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2018. № 11–1. С. 199–210. DOI: 10.18721/JE.11118

19. **Соловейчик К.А.** Разработка системы интеграции подсистемы диспетчирования с основной учетной системой машиностроительного предприятия // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2017. № 4(106). С. 36–45.

20. **Соловейчик К.А.** Разработка системы интеграции подсистемы диспетчирования со станочным цеховым оборудованием машиностроительного предприятия // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2017. № 5(107). С. 47–57.

REFERENCES

1. **V.A. Abchuk, A.L. Lifshits, A.A. Fedulov**, Avtomatizatsiya upravleniya [Management automation]. Moscow, Radio i svyaz, 1984. 264 p. (rus)
2. **P.A. Arkin, K.A. Soloveychik, K.G. Arkina**, Methodology of optimization of production management in machine-building. *Izvestiâ Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo èkonomiçeskogo universiteta*, 2017, no. 1(103), part. 2, pp. 69–77. (rus)
3. **P.A. Arkin, K.A. Soloveychik, K.G. Arkina**, Implementation of the methodology of optimization approaches while developing the algorithm of the production management modular for a machine-building enterprise. *Izvestiâ Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo èkonomiçeskogo universiteta*, 2017, no. 2(104), pp. 94–100. (rus)
4. **P.A. Arkin, K.A. Soloveychik, K.G. Arkina**, Development of the algorithm of the production planning module on a machine-building enterprise with the use of the methodology of optimization. *Izvestiâ Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo èkonomiçeskogo universiteta*, 2017, no. 3(105), pp. 63–71. (rus)
5. **P.A. Arkin, K.A. Soloveychik, K.G. Arkina**, Implementation of the methodology of optimization approaches in developing the system of business analysis and forecasting for a machine-building enterprise. *Izvestiâ Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo èkonomiçeskogo universiteta*, 2017, no. 6(108), pp. 57–67. (rus)
6. **P.A. Arkin, N.V. Mukhanova, B.A. Ovchar**, Solving the problem of operational-production planning of a machine-building manufacturing company with the help of greedy and genetic algorithms. *Organizer of Production*, 2018, no. 26–2, pp. 17–29. (rus). DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-2-17-29
7. **A.V. Babkin, A.Yu. Pestova, D.V. Li, D. Tuktushev**, Decision making methods in problems of cluster development of digital economy and the industry. Babkin A.V. (Ed.). *Tsifrovye tekhnologii v ekonomike i promyshlennosti (ECOPROM-2019)* [Digital technologies in economics and industry (ECOPROM-2019)]. Proceedings of the national scientific-practical conference with international participation. St. Petersburg, Politekh-Press, 2019, pp. 732–738. (rus). DOI: 10.18720/IEP/2019.5/96
8. **S.P. Bondarenko**, Matematicheskie modeli i algoritmy MES-sistemy [Mathematical models and algorithms of the MES system]. Proceedings of III International conference of BGU, part. 2. Minsk, BGU, 2006, pp. 108–113. (rus)
9. **V.V. Glukhov, D.A. Syunyayeva**, Organizatsionno-proizvodstvennyy inzhiniring kak instrument promyshlennoy politiki na predpriyatii [Organizational and production engineering as an instrument of industrial policy at the enterprise]. Babkin A.V. (Ed.). *Innovatsii i importozameshcheniye v promyshlennosti: ekonomika, teoriya i praktika* [Innovation and import substitution in industry: economics, theory and practice]. St. Petersburg, Polytechnic University, 2015, pp. 347–374. (rus)
10. **T.V. Ilina, V.A. Leventsov**, Planirovanie zagruzki oborudovaniya s uchetom defitsita proizvodstvennykh resursov [Planning for equipment load taking into account the shortage of production resources]. Science week of SPbPU. Proceedings of scientific conference with international participation, Nov. 14–19, 2016, vol. 1. St. Petersburg, Polytechnic University, 2016, pp. C. 21–23. (rus)
11. **A.N. Leventsov, V.A. Leventsov, V.V. Khodyrev**, Organizatsionnye soprotivleniya izmeneniyam v usloviyakh tsifrovoy transformatsii promyshlennogo predpriyatiya [Organizational resistance to change under the digital transformation of an industrial enterprise]. Babkin A.V. (Ed.). *Promyshlennaya politika v tsifrovoy ekonomike: problemy i perspektivy* [Industrial policy in the digital economy: problems and prospects]. Proceedings of the scientific-practical conference with international participation. St. Petersburg, SPbPU, 2017, pp. 420–427. (rus)
12. **Mauergauz Yu.E.** Dinamicheskoye gruppovoye planirovaniye dlya mnogostadiynogo proizvodstva [Dynamic batch planning for multi-stage production]. *Mashinostroitel*, 2014, no. 4, pp. 13–24. (rus)
13. **B.A. Ovchar, V.A. Leventsov**, Osobennosti primeneniya teorii ogranicheniy Goldratta pri realizatsii skhem planirovaniya na promyshlennom predpriyatii [Features of the application of Goldratt's theory of constraints in the implementation of planning schemes at an industrial enterprise]. Gasumyants V.E., Karov D.D. (Eds.). Science week of SPbPU. Proceedings of scientific conference with international participation. Best presentations. St. Petersburg, SPbPU, 2016, pp. 259–263. (rus)
14. **B.A. Ovchar, V.A. Leventsov**, Realizatsiya skhemy planirovaniya na promyshlennom predpriyatii v sootvetstvii s teoriey ogranicheniy Goldratta [Implementation of a planning scheme at an industrial enterprise in accordance with Goldratt's theory of constraints]. Science week of SPbPU. Proceedings



of scientific conference with international participation, Nov. 14–19, 2016, vol. 1. St. Petersburg, Polytechnic University, 2016, pp. С. 39–42. (rus)

15. **A.E. Radaev, V.A. Leventsov**, Sistemy poetapnogo imitatsionnogo modelirovaniya proizvodstvennykh protsessov [Phased simulation systems for production processes]. Organizer of Production, 2011, no. 3(50), pp. 30–33. (rus)

16. **K.A. Soloveychik, P.A. Arkin**, Methodological issues of stimulating the growth of depth of industrial production process stages in subjects of the Russian Federation. Izvestiâ Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo èkonomičeskogo universiteta, 2015, no. 4(94), pp. 25–30. (rus)

17. **K.A. Soloveychik, V.A. Leventsov, E.M. Farber**, Equipment selection model at technical re-equipment of the enterprise. Organizer of Production, 2018, no. 26–2, pp. 84–94. (rus). DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-2-84-94

18. **K.A. Soloveychik, V.A. Leventsov, E.M. Farber**, Model for supplier selection during technical re-equipment of the enterprise. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 2018, no. 11–1, pp. 199–210. (rus). DOI: 10.18721/JE.11118

19. **K.A. Soloveichik**, Development of the integration system of the dispatching subsystem with the main accounting system of the machine-building enterprise. Izvestiâ Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo èkonomičeskogo universiteta, 2017, no. 4(106), pp. 36–45. (rus)

20. **K.A. Soloveichik**, Integration of the dispatched subsystem with equipment (example of machine-building enterprise). Izvestiâ Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo èkonomičeskogo universiteta, 2017, no. 5(107), pp. 47–57. (rus)

Статья поступила в редакцию 13.05.2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ЛЕВЕНЦОВ Александр Николаевич

E-mail: drlev@mail.ru

LEVENTSOV Alexandr N.

E-mail: drlev@mail.ru

ЛАВРОВ Андрей Станиславович

E-mail: andrey@spbcioclub.ru

LAVROV Andrey S.

E-mail: andrey@spbcioclub.ru

МАРКИНА Анастасия Сергеевна

E-mail: anastasiya_klementeva@bk.ru

MARKINA Anastasiya S.

E-mail: anastasiya_klementeva@bk.ru

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2020