

НОВЫЙ ПОДХОД К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Н.П. Савенкова

В.С. Лапонин

А.Ю. Мокин

Л.А. Артемьева

А.А. Дряженков

lap@cs.msu.su

mknandrew@mail.ru

artemieva.luda@gmail.com

andrja@yandex.ru

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Построена модель управления промышленным предприятием и разработан календарный план на ее основе. Рассмотрена управляемая модель потоков продукции на промышленном предприятии, описывающая взаимодействие между различными объектами на предприятии: производственными установками, манифольдами, эстакадами, пирсами, транспортом. Кроме того, в модели заданы рецептура производства в виде состава и пропорций компонентов сырья и добавок по каждому виду выпускаемой продукции, а также физические ограничения на участвующие в процессе производства объекты. Это приводит к появлению в математической формулировке модели функционала качества и ограничений типа равенств и неравенств. После построения модели исходная задача управления разбивается на две задачи: прямую и обратную, численное решение которых происходит в тесной взаимосвязи друг с другом. При исследовании использованы результаты из теории математического моделирования, линейной алгебры и теории оптимизации. Разработаны техника построения моделей календарного планирования на предприятии и численные методы решения соответствующих задач управления. Результаты исследования имеют большую практическую значимость и могут быть использованы при эффективном управлении производственным процессом во многих отраслях промышленности

Ключевые слова

Математическое моделирование, календарное планирование, сведение материальных балансов, задача управления, численное решение

Поступила 20.03.2020

Принята 25.04.2020

© Автор(ы), 2021

Введение. В большинстве современных систем управления непрерывным производством (MES) применяется математический аппарат (МА), имеющий ряд ограничений, которые обусловлены наличием нерешенных либо неэффективно решенных проблем [1–3].

Проблема овражности целевой функции. Такая ситуация характерна, когда входящие в нелинейную целевую функцию значения измерений имеют весовые коэффициенты. Чем сложнее номенклатура и рецептура выпускаемой продукции и, как следствие, разброс стоимости и объемов используемого сырья, тем выше вероятность проявления эффекта овражности.

Проблема локальных оптимумов для невыпуклой целевой функции, которая характерна для практикуемых подходов планирования на основе стандартных методов линейного программирования, включая теорию расписаний.

Проблема отсутствия единого системного решения по использованию МА для взаимосвязанного комплекса задач сведения материального баланса (СМБ), расчета плана факта (РПФ), построения оптимального плана производства (ОПП) для заданного вида целевой функции и набора ограничений.

Данные проблемы обуславливают:

- невозможность повышения оптимальности планирования;
- отсутствие математически обоснованных оценок точности вычислений и предельно достижимого уровня оптимальности;
- наличие значительных ограничений на возможность расчетов в условиях недостаточности состава и качества данных, обусловленных низкой оснащенностью предприятий измерительным оборудованием, что особенно характерно для России (менее 50 % точек измерений), отсутствием требуемого уровня автоматизации отдельных участков управления, интеграции со взаимосвязанными системами;
- необходимость использования набора различных методов, которые только для частных случаев позволяют получить дополнительные эффекты по оптимизации;
- необходимость значительного привлечения высокоуровневых экспертов для использования набора сложных методов и настроек;
- значительные трудозатраты персонала экономических и производственных подразделений по выполнению задач планирования и управления производством;
- низкую оперативность внесения изменений оптимальных корректировок производственного плана и обеспечения корректного расчета материального баланса при изменении требований по объему выпуска

продукции, составу поставляемого сырья, рецептуры, производственных мощностей и т. д.;

- высокое влияние человеческого фактора на эффективность решения расчетных задач управления производством.

Дополнительные проблемы связаны с непрозрачностью МА, используемого в широко распространенных в России зарубежных решениях, и со связанным с ним практическим отсутствием по данному направлению актуальных работ зарубежных авторов. По факту данный МА является «черным ящиком» с незафиксированными в требуемом объеме ограничениями, точностью и достоверностью расчетов. Работа с данными продуктами происходит на эвристическом понимании экспертами того, как функционирует система в каждом конкретном случае на основе сопоставления ее результатов с собственными знаниями их допустимости. Это формирует дополнительные неопределенности в достоверности результатов, эффективности принимаемых на основе их решений, трудоемкости и оперативности. Следствием ограничений и разрозненности МА производственного управления является отсутствие оптимальной технологической архитектуры используемого программного обеспечения, которая проявляется при отсутствии единой модели производства (МП), нормативно-справочной информации, сбора данных из различных источников и т. д. В результате в большинстве случаев задачи СМБ, РПФ, ОПП решаются в рамках самостоятельных технологических контуров с последующим «ручным» объединением для решения конечной целевой задачи. Такая «кусочная» автоматизация порождает дополнительные эксплуатационные затраты, риски возникновения ошибок и временных задержек, негативное влияние человеческого фактора. Многие предприятия имеют технологическую специфику организации производства и разный уровень автоматизации, что требует кастомизации «коробочных» промышленных решений по MES. Существующие ограничения МА и архитектуры MES делают затраты на кастомизацию значительными при внедрении и сопровождении.

Содержание подхода. Разработка эффективного МА ориентирована на:

- построение высокоадекватной математической модели, учитывающей все основные характеристики и ограничения для технологических компонентов, потоков, измерительного оборудования;
- возможность описания потока в виде произвольных функций времени;
- проверку модели на противоречивость;
- проверку наличия МА и возможных корректировок модели и входных данных для получения решения;

- поиск оптимальных решений для заданных сложных целевых функций;
- выявление и определение способов преодоления эффекта овражности в задаче условной минимизации целевого функционала;
- разработку методов ускорения сходимости вычислительных алгоритмов поиска ОПП;
- совместное решение прямой и обратной задач;
- управление точностью и скоростью вычислений.

В итоге это обеспечивает эффективное решение задачи календарного планирования (КП), которое до текущего момента базировалось на теории расписаний и ограниченных по возможностям методах линейного программирования.

Входной информацией являются:

- список всех производственных объектов предприятия и транспортно-логистической инфраструктуры: производственные установки, трубопроводы (магистральные, межрезервуарные, межцеховые), манифольды, резервуары (сырьевые, компонентные, товарные), эстакады, пирсы, виды транспорта; типичный пример участка предприятия приведен на рис. 1;
- данные о фактических запасах на производстве;
- данные о фактической работе производства за балансовый период;
- ограничения по запасам и потокам;
- данные об измерительном оборудовании.

Выходная информация подсистемы — это:

- представление всей производственной системы предприятия в терминах МП;
- действующие значения ограничений;
- представление производственной системы предприятия в рамках конкретного балансового периода в терминах подсистем СМБ и КП;
- уточненные характеристики технологических объектов;
- привязка измерений к балансовым единицам, дополнительные характеристики измерений;
- протокол проверки моделей;
- согласованные количественные данные о фактической работе производства за балансовый период;
- оценка качества баланса в целом и по каждому потоку и запасу.

При построении МП все объекты модели делятся на два типа: элементы модели (установки, резервуарные парки, резервуары и т. д.) и потоки, связывающие элементы модели.

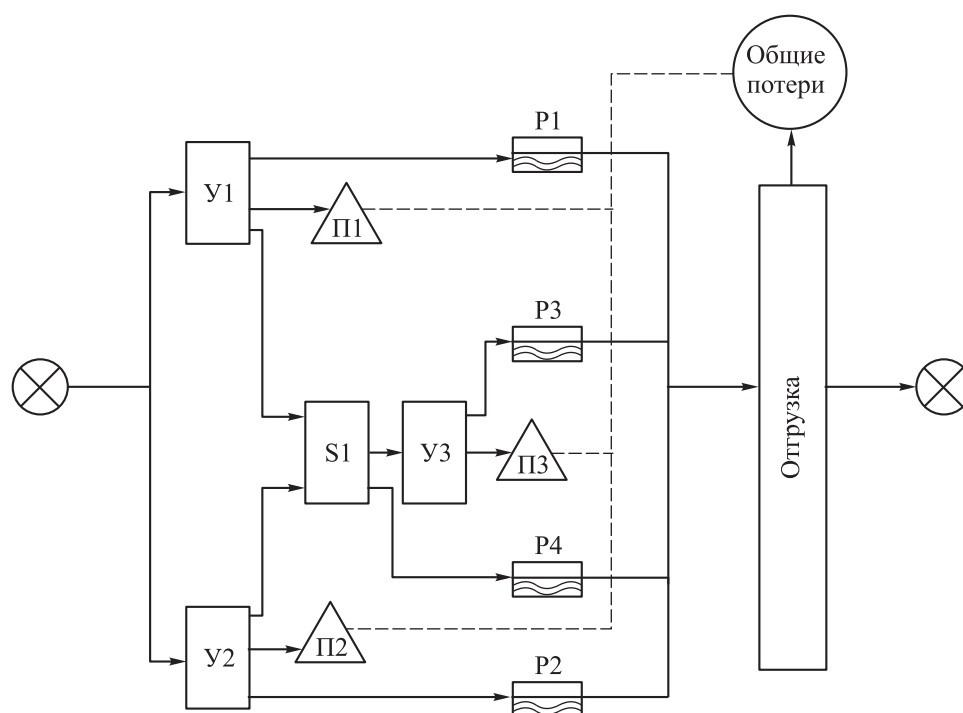


Рис. 1. Типичный пример производственного участка (У1–У3 — участки 1–3; П1–П3 — потоки; Р1–Р4 — резервуары; S1 — запас продукции)

Для измеримых запасов при формировании МП необходимо определить измеритель, который должен использоваться при расчете значения запаса. Если измеритель не определен, он может быть либо указан вручную, либо рассчитан в ходе согласования. Измеримый запас с указанными измерителями можно определить как «фиксированный», в этом случае в процессе согласования материального баланса его значение не будет меняться. Для каждого измеримого нефиксированного запаса в рамках формирования модели необходимо определить минимально и максимально допустимые значения массы.

Начальное формирование описательной МП предусматривает внесение информации в ориентированный граф производства о составе, характеристиках, ограничениях, взаимосвязи технологических объектов (вершины) и потоков сырья, полуфабрикатов, продукции (ребра), участвующих в производстве. По каждому виду выпускаемой продукции рецептура производства задается в виде состава и пропорций компонентов сырья, добавок и т. д. Характеристики потоков задаются в виде функции времени или фиксированных параметров. Характеристики и ограничения технологических компонентов отражают специфику их назначения.

Например, для производственных установок — это данные по мощности, техническим условиям, для резервуаров — минимальные и максимальные объемы и т. д. В модель вносится информация по составу, характеристикам и топологии размещения измерительного оборудования.

Поставленные задачи КП решаются следующим образом: запускается итерационный процесс решения обратной задачи, на каждом шаге которого решается прямая задача согласования потоков продукции на предприятии (рис. 2).



Рис. 2. Схема решения задачи планирования

Решение прямой задачи — это в первую очередь итерационный процесс экстраградиентного типа [4], затем решение задачи условной минимизации вида

$$\|Bx - d\|^2 \rightarrow \min$$

при наличии линейного ограничения $Ax = f$ и ограничения вида параллелепипеда $x_0 \leq x \leq x_1$. При этом матрица $B = (B_1, B_2)^T$ составляется из матрицы B_1 , отвечающей за измерения на некоторых потоках, и матрицы B_2 , содержащей производственные рецепты. Вектор d содержит измеренные значения и неоднородности рецептов. Уравнение $Ax = f$ описывает уравнения материального баланса на каждом производственном узле, а появление ограничения $x_0 \leq x \leq x_1$ связано с пропускными ограничениями путей перемещения продукции на предприятии.

Особенностью обработки полученного решения обратной задачи [5–15] является необходимость его приведения к физически осмысленной форме, которой затем можно пользоваться при реальном управлении производством. Для этого разработан специальный модуль перехода от непрерывного управления, получаемого с помощью обратной задачи, к дискретному, имеющему ясный смысл для специалистов. Такой переход выполняется последовательным решением прямых задач, на вход подается приближение к непрерывному управлению, которое на каждом шаге работы модуля пре-

терпевает изменения, оставаясь дискретным. В отличие от подходов, связанных с жестким моделированием систем, предлагаемый подход не предполагает единственности решения задачи управления, наличие которой в некоторых случаях помогает избавиться от ограничений типа неравенств. В то же время использование предлагаемого метода не налагает обременительных ограничений на структуру рассматриваемого производства, что делает его более универсальным, чем, например, метод из работы [16].

Пример, на котором отрабатывалась работоспособность предлагаемого алгоритма, приведен на рис. 3.

Рассматривается одна производственная установка с двумя входящими в нее потоками сырья, один из которых фиксирован: $g_1(t) = 20$. Другой входной поток сырья, а также выходной поток продукции предполагаются неизвестными. Система рассматривается на интервале времени $0 \leq t \leq T = 5$. План выпуска продукции установкой $x(T) = 135$.

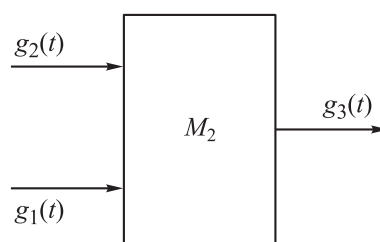


Рис. 3. Простейший пример обратной задачи

Первый рецепт на установке имеет вид

$$g_1(t) = \frac{2}{3} w(t), \quad g_2(t) = \frac{1}{3} w(t), \quad g_3(t) = w(t).$$

Второй рецепт имеет вид

$$g_1(t) = \frac{4}{5} w(t), \quad g_2(t) = \frac{1}{5} w(t), \quad g_3(t) = w(t).$$

Требуется найти момент (M_2) переключения с первого на второй режим работы в целях выполнения плана. В данном примере оптимальное время переключения рецепта $t_* = 2$. К примеру применен изложенный ранее метод. После работы основной части получены функции номера рецепта $s(t) = 1/2$ и производительности $w(t) = y(t) = 27$, после дискретизации управления $s(t)$ получилось время переключения $t_1 = 2,5$. Метод решения задачи СМБ, запущенный с учетом того, что при $t = t_1$ переключается режим установки, дает производительность $w_1 = 30$ в первом режиме и $w_2 = 25$ во втором. Модуль дискретизации решения обратной задачи, запущенный с указанными производительностями в качестве входных данных, приводит к значению момента переключения $t_2 = 2 = t_*$. После этого выполнение метода останавливается.

Отметим, что приведенные вещественные константы получены реализованной программой с абсолютной погрешностью 10^{-5} , при этом время суммарной работы программы составляет меньше секунды.

Заключение. Предложены модель КП на промышленном предприятии и численные методы решения соответствующей задачи управления. Предложенный алгоритм решения прямой задачи СМБ протестирован на реальном промышленном предприятии с числом потоков ~ 3000 . Время работы алгоритма составило 3 с. Открытыми остаются вопросы о возможности оптимизации предлагаемых методов по скорости их работы и используемой машинной памяти.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Артемьев С.Б., Бородин П.Е., Закиев А.Р. и др. Автоматизация процесса согласования материального баланса на нефтеперерабатывающем предприятии — система Production Balance. *Автоматизация в промышленности*, 2014, № 8, с. 22–28.
- [2] Кувыкин В.И., Кувыкина Е.В., Матвеев А.Е. и др. Повышение эффективности производства при использовании системы согласования материального баланса. *Современные наукоемкие технологии*, 2019, № 4, с. 36–40.
URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37488>
- [3] Проказина М.В., Хохлов А.С., Шайдуллин Р.А. Имитационные модели в комплексе календарного планирования производства НПЗ. *Автоматизация в промышленности*, 2012, № 10, с. 15–21.
- [4] Антипин А.С. Экстраполяционные методы вычисления седловой точки функции Лагранжа и их применение к задачам с блочно-сепарабельной структурой. *Журн. вычисл. матем. и матем. физ.*, 1986, т. 26, № 1, с. 150–151.
- [5] Акуленко Л.Д. Асимптотические методы оптимального управления. М., Наука, 1987.
- [6] Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. М., ФИЗМАТЛИТ, 2007.
- [7] Баничук Н.В. Введение в оптимизацию конструкций. М., Наука, 1986.
- [8] Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. М., Наука, 1975.
- [9] Красовский Н.Н., Третьяков В.Е. Задачи управления с гарантированным результатом. Свердловск, Средне-Уральское книжное изд-во, 1986.
- [10] Савенкова Н.П., Артемьева Л.А., Дряженков А.А. и др. Математическая модель распределения производственных потоков. *XXV Междунар. конф. «Математика. Компьютер. Образование»*. Т. 25. Москва, Ижевск, РХЧ, 2018, с. 216.
- [11] Савенкова Н.П., Артемьева Л.А., Лапонин В.С. и др. Математическое моделирование сведения материальных балансов. *Neftegaz.RU*, 2018, № 4, с. 91.

[12] Савенкова Н.П., Илютко В.П., Артемьева Л.А. и др. О задаче календарного планирования на промышленном производстве. *Международ. науч. конф. «Современные проблемы вычислительной математики и математической физики»*. М., Макс Пресс, 2019, с. 23.

[13] Савенкова Н.П., Лапонин В.С., Мокин А.Ю. и др. Математическое моделирование производственных потоков в технологических процессах с фиксированной рецептурой производства. *Ломоносовские чтения 2018. Тез. докл.* М., Макс Пресс, 2018, с. 106–107.

[14] Савенкова Н.П., Лапонин В.С., Мокин А.Ю. и др. Применение аппарата математического моделирования в промышленном производстве в целях реализации программы импортозамещения. *Тихоновские чтения. Науч. конф. Тез. докл.* М., Макс Пресс, 2019, с. 19.

[15] Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления. М., Наука, 1973.

[16] Смирнов А.Н. Объемное календарное планирование — основа оперативного управления. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*, 2005, № 1-2, с. 161–170.

Савенкова Надежда Петровна — д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник кафедры вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1).

Лапонин Владислав Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник кафедры вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1).

Мокин Андрей Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1).

Артемьева Людмила Анатольевна — канд. физ.-мат. наук, ассистент кафедры оптимального управления факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1).

Дряженков Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник кафедры оптимального управления факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Савенкова Н.П., Лапонин В.С., Мокин А.Ю. и др. Новый подход к математическому моделированию календарного планирования на промышленном предприятии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2021, № 2 (135), с. 103–114. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-2-103-114>

A NEW APPROACH TO MATHEMATICAL SIMULATION OF SCHEDULING AT AN INDUSTRIAL PLANT

N.P. Savenkova

V.S. Laponin

A.Yu. Mokin

L.A. Artemieva

A.A. Dryazhenkov

lap@cs.msu.su

mknandrew@mail.ru

artemieva.luda@gmail.com

andrja@yandex.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of this work was to build a model of industrial plant management and develop a schedule plan based on it. The paper considers a controlled model of product flows at an industrial enterprise. The model describes the interaction between various objects at the enterprise: production plants, manifolds, overpasses, piers, transport. In addition, the model specifies the composition and proportions of the components of raw materials and additives for each type of manufactured product, as well as physical constraints on the objects involved in the production process. This brings us to the model of both the quality functional and equality and inequality constraints in the mathematical formulation. After building the model, the original control problem was reduced to two problems: direct and inverse. The numerical solution of both is provided in a close relationship between them. The study uses the findings from the theory of mathematical modeling, linear algebra and optimization theory, and leads to the development of the technique of building models of scheduling at an enterprise and numerical methods for solving the corresponding management problems. The research results are of great practical importance and can be used for effective management of the production process in many industries

Keywords

Mathematical simulation, scheduling, consolidation of material balances, management problem, numerical solution

Received 20.03.2020

Accepted 25.04.2020

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Artem'yev S.B., Borodin P.E., Zakiev A.R., et al. Automation of material balance agreement process at an oil refinery. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation and Remote Control], 2014, no. 8, pp. 22–28 (in Russ.).
- [2] Kuykin V.I., Kuykina E.V., Matveev A.E., et al. Improving the efficiency of production with mass balance reconciliation system. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2019, no. 4, pp. 36–40 (in Russ.). Available at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37488>

- [3] Prokazina M.V., Khokhlov A.S., Shaydullin R.A. Simulation models in oil refinery scheduling system. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation and Remote Control], 2012, no. 10, pp. 15–21 (in Russ.).
- [4] Antipin A.S. Extrapolational methods for calculation of a saddle point of Lagrange function and their application to problems with separable block structure. *USSR Comput. Math. Math. Phys.*, 1986, vol. 26, no. 1, p. 96.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(86\)90189-8](https://doi.org/10.1016/0041-5553(86)90189-8)
- [5] Akulenko L.D. Asimptoticheskie metody optimal'nogo upravleniya [Asymptotic methods of optimal control]. Moscow, Nauka Publ., 1987.
- [6] Alekseev V.M., Tikhomirov V.M., Fomin S.V. Optimal'noe upravlenie [Optimum control]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2007.
- [7] Banichuk N.V. Vvedenie v optimizatsiyu konstruksiy [Introduction to optimization of structures]. Moscow, Nauka Publ., 1986.
- [8] Conway R.W., Maxwell W.L., Miller L.W. Theory of Scheduling. Boston, Addison Wesley, 1967.
- [9] Krasovskiy N.N., Tret'yakov V.E. Zadachi upravleniya s garantirovannym rezul'tatom [Management problems with guaranteed results]. Sverdlovsk, Sredne-Ural'skoe knizhnoe izd-vo Publ., 1986.
- [10] Savenkova N.P., Artem'yeva L.A., Dryazhenkov A.A., et al. [Mathematical model of distribution of production flows]. *XXV Mezhdunar. konf. "Matematika. Komp'yuter. Obrazovanie"*. T. 25 [XXV Int. Conf. "Mathematics. Computer. Education". Vol. 25]. Moscow, Izhevsk, RKhCh Publ., 2018, p. 216 (in Russ.).
- [11] Savenkova N.P., Artem'yeva L.A., Laponin V.S., et al. Mathematical modeling of material balance data. *Neftegaz.RU*, 2018, no. 4, p. 91 (in Russ.).
- [12] Savenkova N.P., Ilyutko V.P., Artem'yeva L.A., et al. [On the problem of calendar planning in an industrial plant]. *Mezhdunar. nauch. konf. "Sovremennye problemy vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki"* [Int. Sc. Conf. "Modern Problems of Computational Mathematics and Mathematical Physics"]. Moscow, Maks Press Publ., 2019, p. 23 (in Russ.).
- [13] Savenkova N.P., Laponin V.S., Mokin A.Yu., et al. [Mathematical modeling of production flows in technological processes with a fixed production recipe]. *Lomonosovskie chteniya 2018. Tez. dokl.* [Lomonosov Readings 2018. Abs.]. Moscow, Maks Press Publ., 2018, pp. 106–107 (in Russ.).
- [14] Savenkova N.P., Laponin V.S., Mokin A.Yu., et al. [Application of mathematical modeling apparatus in industrial production in order to implement the import substitution program]. *Tikhonovskie chteniya. Nauch. konf. Tez. dokl.* [Tikhonov Readings. Abs. Sc. Conf.]. Moscow, Maks Press Publ., 2019, p. 19 (in Russ.).
- [15] Chernous'ko F.L., Banichuk N.V. Variatsionnye zadachi mekhaniki i upravleniya [Variational problems of mechanics and control]. Moscow, Nauka Publ., 1973.

[16] Smirnov A. Volumetric scheduling — a basis of operational planning. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya* [Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes], 2005, no. 1-2, pp. 161–170 (in Russ.).

Savenkova N.P. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Lead Research Fellow, Department of Computational Methods, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Laponin V.S. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Junior Research Fellow, Department of Computational Methods, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Mokin A.Yu. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Computational Methods, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Artemieva L.A. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assistant, Department of Optimal Control, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Dryazhenkov A.A. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Junior Research Fellow, Department of Optimal Control, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Savenkova N.P., Laponin V.S., Mokin A.Yu., et al. A new approach to mathematical simulation of scheduling at an industrial plant. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2021, no. 2 (135), pp. 103–114 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-2-103-114>