

Научная статья  
УДК 658.5+ 338.3 © Л. А.  
Погорелова  
DOI: 10.24412/2225-8264-  
2025-4-1013

**Ключевые слова:** незавершенное производство, энтропийный подход, производственные системы, оптимизация процессов, эффективность производства, управление потоками, Индустрия 5.0

**Keywords:** work-in-progress, entropy approach, production systems, process optimization, production efficiency, flow control, Industry 5.0

## ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ОБЪЕМАМИ НЕЗАВЕРШЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИИ

ПОГОРЕЛОВА Л. А.<sup>1</sup>

**Аннотация.** Современные производственные предприятия функционируют в условиях высокой неопределенности и турбулентности внешней среды, что приводит к усложнению управления материальными и информационными потоками. Одним из наиболее значимых индикаторов эффективности производственной системы выступает уровень незавершенного производства (НЗП), напрямую влияющий на скорость оборачиваемости оборотных средств, длительность производственного цикла и общие издержки. Традиционные методы планирования и контроля, основанные на фиксированных количественных показателях, не всегда позволяют выявить причины накопления избыточного НЗП и учитывать факторы вариативности и хаотичности процессов. В статье обоснована необходимость применения энтропийного подхода к управлению НЗП, позволяющего рассматривать его как проявление структурных дисбалансов и стохастических возмущений в системе. Автором разработана методика оценки энтропии производственных потоков, включающая показатели статической и динамической энтропии, а также интегральный энтропийный индекс. Предложенный подход обеспечивает возможность прогнозирования динамики НЗП, выявления скрытых резервов эффективности и формирования сбалансированных управленческих решений. Практическая значимость работы заключается в интеграции энтропийного анализа с цифровыми технологиями, что открывает перспективы построения адаптивных моделей управления производственными процессами в условиях Индустрии 4.0 и 5.0.

<sup>1</sup>Погорелова Людмила Александровна — кандидат экономических наук, доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, (Россия, Ростовская область, г.Новочеркасск, ул.Просвещения, д. 132) E-mail: pogorelova\_la@npi-tu.ru ORCID: 0000-0002-2099-9419

Поступила в редакцию:  
21.08.2025

## AN ENTROPIC APPROACH TO MANAGING THE VOLUME OF WORK-IN-PROGRESS IN AN ENTERPRISE

LIUDMILA A. HJLJRELOVA

CANDIDATE OF ECONOMIC SCIENCES, M. I. PLATOV SOUTH-RUSSIAN STATE POLYTECHNIC UNIVERSITY (NPI)

**Abstract.** Modern manufacturing enterprises operate in conditions of high uncertainty and turbulence of the external environment, which leads to more complex management of material and information flows. One of the most significant indicators of the efficiency of the production system is the level of work in progress (WIP), which directly affects the turnover rate of working capital, the duration of the production cycle and total costs. Traditional methods of planning and control based on fixed quantitative indicators do not always make it possible to identify the causes of the accumulation of excessive WIP and take into account the factors of variability and randomness of processes. The article substantiates the need to apply an entropy approach to the management of NP, which makes it possible to consider it as a manifestation of structural imbalances and stochastic disturbances in the system. The author has developed a methodology for estimating the entropy of production flows, including indicators of static and dynamic entropy, as well as an integral entropy index. The proposed approach provides an opportunity to predict the dynamics of NPV, identify hidden reserves of efficiency and form balanced management decisions. The practical significance of the work lies in the integration of entropy analysis with digital technologies, which opens up prospects for building adaptive models of production process management in the context of Industry 4.0 and 5.0.

## Введение

**С**овременные производственные системы функционируют в условиях высокой турбулентности внешней среды, что выражается в усложнении материальных и информационных потоков, росте требований к оперативности принятия решений и необходимости обеспечения гибкости производственных процессов. Одним из наиболее чувствительных индикаторов эффективности производственной системы является уровень незавершенного производства (НЗП) [1]. Его избыточные объемы ведут к замедлению оборачиваемости оборотных средств, увеличению времени производственного цикла, снижению управляемости потоков и росту совокупных издержек. В условиях цифровизации и внедрения концепций «Индустрии 4.0» и «Индустрии 5.0» задача оптимизации НЗП приобретает особое значение, так как напрямую связана с повышением конкурентоспособности предприятий, устойчивостью бизнес-процессов и эффективностью ресурсопользования [2].

Несмотря на широкое использование различных инструментов планирования и диспетчеризации (MRP, ERP, MES-системы), традиционные методы управления НЗП зачастую опираются на линейные показатели учета и контроля, которые фиксируют лишь фактический объем заделов. При этом они не позволяют выявить глубинные причины их образования, связанные с неравномерностью загрузки оборудования, вариативностью времени обработки, асимметрией материальных потоков и случайными возмущениями внешней среды. Такой подход ограничивает возможности прогнозирования динамики НЗП и формирования проактивных решений. Таким образом, в науке и практике сохраняется противоречие: с одной стороны, накапливаются данные о производственных процессах, а с другой — отсутствует универсальная методология, позволяющая интегрировать показатели вариативности и хаотичности в систему управления незавершенным производством.

Целью настоящей работы является обоснование и разработка энтропийного подхода к управлению незавершенным производством, позволяющего количественно оценивать уровень неупорядоченности производственных процессов и на основе этого оптимизировать избыточные заделы в незавершенном производстве.

Новизна исследования заключается в переносе понятийного аппарата теории информации и термодинамики в область управления производственными системами. Предлагается использовать энтропийные показатели как интегральную характеристику уровня неопределенности и сложности в производственных потоках. В отличие от традиционных методов, которые фиксируют НЗП лишь как количественный параметр, энтропийный подход позволяет рассматривать его как проявление структурных дисбалансов и стохастических отклонений в системе. Это открывает новые возможности для:

- выявления скрытых источников накопления незавершенного производства;
- прогнозирования динамики НЗП с учетом вариативности процессов;
- формирования инструментов балансировки ритмов и мощностей;
- разработки цифровых моделей управления производственными потоками на основе энтропийных индикаторов.

Для достижения поставленной цели в статье решаются следующие задачи:

1. Проанализированы существующие теоретические и практические подходы к управлению незавершенным производством и выявить их ограничения.
2. Сформулированы методологические основы применения энтропийных показателей для анализа производственных процессов.
3. Разработана система показателей, отражающих уровень энтропии в управлении НЗП, и предложена методика их расчета.
4. Обоснованы практические рекомендации по использованию энтропийного подхода для повышения эффективности и устойчивости производственных систем.

## Методология исследования

В рамках исследования автором проведен обзор ключевых теоретических и практических подходов к управлению незавершенным производством (НЗП) и их ограничений (табл. 1) [3–5].

Сравнительный анализ существующих подходов, базирующихся главным образом на основе закона Литтла и аппроксимации Кингмана, показывает, что они дают полезные количественные ориентиры для управления незавершенным производством, однако имеют

Таблица 1

### Сравнительный анализ подходов к управлению НЗП

Подход	Контекст применения	Преимущества	Недостатки
MRP/ERP (push)	Многономенклатурное, дискретное производство с потребностью в глобальном планировании материалов и сроков	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Хорошо работает при высокой сложности спецификаций (BOM)</li> <li>— Удобен для долгосрочного планирования</li> <li>— Интеграция с закупками и снабжением</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Не ограничивает WIP (накопление НЗП)</li> <li>— Чувствителен к неточностям данных и прогнозов</li> <li>— Эффект «хлыста» при изменении спроса</li> </ul>
Kanban	Массовое/серийное производство с повторямыми операциями, стабильным тактом и короткими маршрутами	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Жесткое ограничение WIP</li> <li>— Простая визуальная система</li> <li>— Сокращение времени цикла</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Неэффективен при высоком разнообразии изделий и частых переналадках</li> <li>— Требует стабильного спроса и процесса</li> </ul>

CONWIP (Constant WIP)	Линейные или квазилинейные производственные потоки; подходит для сборочных линий и полунепрерывного производства	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Контроль совокупного уровня WIP</li> <li>— Стабилизирует цикл и поток</li> <li>— Гибче Kanban в условиях разнообразия изделий</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Менее эффективен в разветвленных маршрутах</li> <li>— Требует подбора оптимального уровня WIP</li> <li>— Возможны очереди на узком месте</li> </ul>
DBR (Drum-Buffer-Rope, теория ограничений)	Производство с явно выраженным «бутылочным горлышком» (ограничивающим ресурсом)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Синхронизация системы по узкому месту</li> <li>— Снижение НЗП без потери пропускной способности</li> <li>— Хорош для нестабильной среды</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Требует точной идентификации узкого места</li> <li>— При множественных/скользящих ограничениях эффективность снижается</li> </ul>
WLC (Workload Control)	Мелкосерийное, заказное производство (ETO/MTO), высокая вариативность заказов	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Сдерживание НЗП через ограничение загрузки</li> <li>— Улучшает надежность сроков исполнения</li> <li>— Подходит для HMLV (High-Mix Low-Volume)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Сложная настройка параметров</li> <li>— Небольшое количество внедрений в промышленности</li> <li>— Требует развитого учета и данных</li> </ul>
POLCA (Paired-cell Overlapping Loops of Cards, часть QRM)	High-Mix/Low-Volume, клеточные производственные системы, длинные маршруты	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Снижает НЗП между ячейками</li> <li>— Подходит для кастомизированных заказов</li> <li>— Повышает прозрачность межцеховых потоков</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Требует перестройки структуры производства в клетки</li> <li>— Сложность внедрения и масштабирования</li> <li>— Высокие требования к дисциплине исполнения</li> </ul>

принципиальные ограничения. Закон Литтла описывает статическую взаимосвязь НЗП → пропускная способность → цикл, но не учитывает вариативность процессов, случайные колебания спроса и ресурсоемкость [6]. Аппроксимация Кингмана позволяет учитывать влияние неопределенности и загрузки, но ее точность ограничена предположениями о распределениях и агрегированным характером модели. В условиях сложных производственных систем с высокой динамичностью, стохастическими возмущениями и множеством взаимосвязанных потоков этих инструментов недостаточно: они не дают целостной картины энтропийных потерь, возникающих из-за неравномерности и неупорядоченности процессов. Именно поэтому необходим энтропийный подход, позволяющий измерять уровень хаотичности производственных потоков, выявлять скрытые резервы снижения НЗП и формировать управление решения, направленные на минимизацию неэффективности за счет управления структурой и степенью упорядоченности системы.

Проведем анализ публикаций по теме энтропийного подхода в управлении производственными процессами — в частности, с акцентом на связку энтропии и незавершенного производства (НЗП), сложности, качества планирования и оптимизации.

В работе «Manufacturing complexity and its measurement based on en-tropy models» [7] автор вводит два ключевых понятия:

1. Статическая энтропия — характеризует уровень структурной сложности производственной системы, учитывая количество и распределение состояний (например, возможных маршрутов, конфигураций загрузки, распределения оборудования и т.п.).

2. Динамическая энтропия — отражает изменчивость и неопределенность во времени, связанную с оперативными событиями: отклонениями в расписании, сбоями, случайными задержками в потоке производства.

Также вводятся понятия максимального горизонта планирования и дисциплина выполнения расписания как количественные индикаторы, с помощью которых можно оценить эффективность планирования с точкой зрения энтропийной модели.

Через конкретный пример автор демонстрирует практическую применимость предложенной методологии: используя рассчитанные значения статической и динамической энтропии, он показывает, как изменяется сложность планов и насколько они устойчивы к отклонениям — именно таким образом можно измерить и контролировать производственный порядок.

Влияние энтропийного подхода в публикации заключается в том, что он:

- раскрывает новую перспективу оценки производственных систем через призму информационной неопределенности;
- позволяет количественно анализировать сложность не только по объему и конфигурации, но и по устойчивости к нарушениям;
- создает инструменты (метрики энтропии), которые можно использовать для объективного сравнения и улучшения планов.

Таким образом, этот подход вносит научно-методологическую новизну в сферу управления производством, расширяя существующие методы планирования — от лишь количественного (количество элементов, маршрутов и заделов) к энтропийному, учитывающему структурную и динамическую неопределенность. Такой подход особенно актуален для современных гибких, многомодульных и динамичных систем, где традиционные методы контроля и планирования не учитывают внутреннюю комплексность и нестабильность.

В работе [8], рассматривается интегральная методология количественной оценки сложности производственных систем через призму информационной энтропии. Авторы предлагают комплексный подход, включающий последовательные этапы: изучение кей-

са, формулировка гипотез, моделирование методом дискретно-событийной симуляции, вычисление энтропийных показателей (по теории Шенна), последующий анализ энтропии и статистическую проверку результатов с помощью ANOVA (дисперсионный анализ). В данном исследовании основное внимание уделяется тому, как производственный порядок и параметры планирования — такие как последовательность выпуска и объемы продукции — влияют на структурную сложность рабочих участков. При этом, высокая энтропия отражает значительную неопределенность и вариативность в процессах, обусловленную разнообразием маршрутов, изменчивостью производственных требований и таймингов.

Предложенный энтропийный подход позволяет не только количественно измерять степень сложности и неопределенности, но и демонстрирует, что оптимизация планирования — в частности, корректировка порядка операций — способна снизить уровень энтропии, тем самым снимая «узкие места» и повышая эффективность системы производства. Это обеспечивает промышленным предприятиям мощный инструмент для проактивного управления сложностью: возможность прогнозировать, какие изменения в планировании наиболее эффективны для упорядочения потоков и снижения незавершенного производства.

Таким образом, энтропийный подход обоснован как количественно строгий метод анализа производственной неопределенности, позволяющий объединять симуляцию, информационную теорию и статистику. Это ведет к более точному диагностированию и управлению комплексностью процессов, чем традиционные метрики (например, только время, загрузка или запасы). Такой подход особенно актуален для гибких, многономнекратурных и динамически изменяющихся производственных сред, характерных при становлении Индустрии 5.0, где контроль сложности напрямую связан с повышением эффективности, устойчивости и конкурентоспособности.

В публикации «*Revealing the benefits of entropy weights method for multi-objective optimization in machining operations: A critical review*» [9] рассматривается обзор применения метода энтропийных весов (далее EWM) для многокритериальной оптимизации (далее MOO) в современных обрабатывающих операциях. Авторы систематизируют результаты 65 исследований с 2009 года, охватывающих как традиционные, так и нетрадиционные методы обработки, что позволяет проследить эволюцию и нишу применения EWM в индустрии. Основная новизна работы состоит в глубокой классификации публикаций, где исследования разделены по типу процессов обработки — от электроэррозионной обработки до лазерной резки и ультразвукового сверления — и по применяемым методам многокритериальной оптимизации. При этом, EWM выделяется как объективный способ определения весов в многокритериальных задачах, основанный на количественной оценке «информационной значимости» каждого критерия без влияния субъективного мнения пользователя. Это делает метод особенно ценным при принятии решений, где важно минимизировать чело-

веческий фактор и максимально опираться на данные.

Кроме того, EWM демонстрирует высокую адаптивность: он хорошо применяется как в традиционных, так и в инновационных производственных сценариях. Работа включает последовательную процедуру применения метода: нормализация данных, расчет энтропий, определение степеней расходности и вычисление коэффициентов критерииев. Данная методика может быть адаптирована при формировании алгоритма анализа объемов незавершенного производства на предприятии и принятии управленческих решений. Таким образом, статья делает важный вклад в область инженерной оптимизации, демонстрируя, что метод энтропийных весов является мощным инструментом для объективного, адаптивного и масштабируемого принятия решений в сложных МОО-задачах.

Новизна данных публикаций может быть полезна для разработки методологии оптимизации незавершенного производства (НЗП) тем, что они раскрывают практическое применение энтропийного подхода к анализу неопределенности и вариабельности в производственных системах. Работы демонстрируют, что энтропийные модели позволяют объективно оценивать состояние процессов без субъективного влияния экспертов, что критично при определении оптимального уровня НЗП. Применение энтропийных весов (EWM) в многокритериальной оптимизации может помочь учитывать сразу несколько факторов: время цикла, загрузку оборудования, уровень брака и устойчивость системы. Также, исследования подтверждают, что энтропийные методы эффективны в условиях динамически меняющейся производственной среды, где традиционные подходы (Lean, TOC) оказываются ограниченными. Наконец, публикации подчеркивают интеграцию энтропийного анализа с методами прогнозирования и цифровыми инструментами, что позволяет построить адаптивную модель управления НЗП и сделать производственный процесс более устойчивым к перегрузкам и вариациям спроса.

Как уже было отмечено, современные производственные системы характеризуются высокой степенью сложности, динамичностью протекания процессов и значительной вариабельностью параметров. Традиционные подходы к управлению, такие как методы «бережливого производства», теория ограничений или классические модели массового обслуживания, дают полезные результаты, однако они не всегда позволяют учитывать скрытые факторы неопределенности и случайности, определяющие поведение системы в условиях неполной информации. В этих условиях особое значение приобретает использование энтропийных показателей, которые обеспечивают возможность формализованной оценки хаотичности, структурной неопределенности и избыточности данных, влияющих на протекание производственных процессов.

Применение энтропийного подхода базируется на использовании понятий теории информации, в частности энтропии Шенна, которая трактуется как мера неопределенности состояния системы [10]. В производственных условиях энтропия позволяет количественно описывать неравномерность распределения

ресурсов, непредсказуемость поступления заказов, вариабельность загрузки оборудования и изменение структуры незавершенного производства (НЗП). Такой подход обеспечивает возможность объективной диагностики производственных процессов, в отличие от экспертных или нормативных методов, которые часто страдают субъективизмом или устаревшими допущениями.

Методологические основы применения энтропийных показателей включают несколько ключевых положений. Во-первых, необходимо четко определить объект анализа, которым выступает производственный процесс как открытая система, находящаяся в постоянном обмене ресурсами, информацией и энергией с внешней средой. Во-вторых, следует идентифицировать параметры, подверженные наибольшей вариабельности и влияющие на эффективность функционирования системы: объем НЗП, продолжительность производственного цикла, уровень дефектности продукции, коэффициенты загрузки оборудования. Эти параметры формируют базу данных для расчета энтропийных показателей.

Далее производится количественная оценка энтропии системы. Например, распределение объемов незавершенного производства по стадиям технологического цикла может быть интерпретировано как вероятностное множество, где каждая стадия имеет свою вероятность нахождения единицы продукции. Чем более равномерным является распределение, тем выше уровень энтропии, что свидетельствует о повышенной неопределенности и потенциальных потерях. В обратной ситуации, когда значительная часть изделий концентрируется на одном этапе, система характеризуется низкой энтропией, но возникает риск возникновения «узкого места». Таким образом, энтропия выступает универсальным индикатором баланса между равномерностью и перегрузкой производственных стадий.

На основе проведенного исследования была разработана система показателей, отражающих уровень энтропии в управлении НЗП, а также сформулирована методика их расчета:

1. Определить границы системы и набор следующих данных:

этапы  $k=1, \dots, K$ ; окна наблюдения  $t = 1, \dots, T$ .

По каждому окну наблюдения собираются эмпирические данные:

$WIP_k(t)$  — НЗП на стадии  $k$ ;

$TH(t)$  — фактическая пропускная способность (ед./время);

$CT(t)$  — средний цикл;

$\lambda(t)$  — интенсивность прихода;

$S(t)$  — время обслуживания/обработки (или его оценка);

коэффициенты вариации  $c_a^2(t)$  (межприходные интервалы),  $c_s^2(t)$  (время обслуживания).

2. Нормировать распределение НЗП и вычислить «статическую» энтропию.

Данный этап позволяет понять, насколько равномерно «распылен» НЗП по стадиям (высокая равномерность → высокая энтропия = большая неопределенность в локализации заделов).

Построить вероятностное распределение НЗП по стадиям:

$$p_k(t) = \frac{WIP_k(t)}{\sum_{j=1}^K WIP_j(t)}$$

где  $WIP_k(t)$  — размер незавершенного производства на  $k$ -ом этапе наблюдения t.

Расчет статической энтропии Шеннона:

$$H_{stat}(t) = - \sum_{k=1}^K p_k(t) \ln p_k(t)$$

Нормированная статическая энтропия (удобна для сравнения во времени):

$$H_{stat}^*(t) = \frac{H_{stat}(t)}{\ln K} \in [0,1]$$

Интерпретация: рост  $H_{stat}^*(t)$  = более равномерное «распыление» НЗП по стадиям (больше неопределенности в локализации заделов). Падение — концентрация НЗП (риск «узких мест»).

3. Оценить «динамическую» энтропию потока (вариативность во времени). Данный этап позволяет оценить непредсказуемость (вариативность) производственного потока во времени.

3.1. Через вариативность притока/обслуживания: коэффициенты вариации за окно W:

$c_a^2$  - коэффициент вариации межприходных интервалов (интервалы между поступлением заявок/деталей).

$c_s^2$  - коэффициент вариации времени обслуживания (длительность обработки заявок/деталей).

Эти показатели используются в формуле Кингмана (VUT).

3.2. Через энтропию последовательности загрузок (официально):

Пусть  $X_t$  — дискретизированная загрузка/приток по бинам; тогда по скользящему окну:

$$H_{dyn}(t) = - \sum_x P(X=x) \ln P(X=x)$$

$$H_{dyn}^*(t) = \frac{H_{dyn}(t)}{\ln M}$$

где M — число бинов;

$H_{dyn}^*(t)$  — динамическая энтропия.

4. Диагностика ожидаемого ожидания в очереди (VUT-правило Кингмана):

Показывает время ожидания при текущей загрузке. Полезно для гаргетирования снижения вариативности там, где она сильнее всего «раздувает» очередь и НЗП.

$$W_q = \frac{u}{1-u} \times \frac{c_a^2 + c_s^2}{2} \times E[S]$$

где u — показатель загрузки критического ресурса линии производства, то есть того «узкого» места, которое определяет максимальную производительность всей линии;

$E[S]$  — типичное время обработки на критичном ресурсе.

5. Свести ключевые индикаторы в матрицу для энтропийного взвешивания (EWM). Позволяет определить наиболее значимый критерий.

Формируем панель метрик по окнам  $i=1, \dots, n$  и критериям  $j=1, \dots, m$ , напр.:

$$X = [H_{stat}^* H_{dyn}^* c_a^2 c_s^2 W_q CT TH]$$

Нормируем каждый критерий в столбце (например, min-max или доли  $p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_i x_{ij}}$  для «меньше — лучше» инвертируем).

Энтропия критерия j:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, k = \frac{1}{\ln n}$$

Степень диверсификации, которая показывает вклад каждого фактора в снижение неопределенности:

$$d_j = 1 - e_j$$

Вес критерия (объективный):

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{l=1}^m d_l}$$

6. Построить интегральный энтропийный индекс «энтропийного риска WIP». Определяем направленность критерии (где «больше — хуже» и «меньше — хуже») и рассчитываем:

$$EIR(t) = \sum_{j=1}^m w_j z_j(t)$$

где  $z_j(t)$  — нормированное значение критерия с учетом направления. Высокий EIR сигнализирует о повышенном «энтропийном риске» накопления НЗП.

7. Задать целевые уровни по Литтлу и связать их с лимитом НЗП.

Для целевых  $TH^{tar}$  и  $CT^{tar}$

$$WIP^{tar} = TH^{tar} \times CT^{tar}$$

Это — исходная «коренная» точка для лимита WIP (НЗП) (системы с ограничениями Kanban/CONWIP/DBR). Далее ее корректируем с учетом EIR (интегрального энтропийного индекса) и теории очередей VUT.

8. Оптимизация лимита WIP с учетом энтропии и VUT.

Постановка задачи (дискретный поиск по допустимым WIP (перебор) или непрерывная оптимизация).

$$\text{WIP} = \underbrace{WIP_{min} \dots WIP_{max}}_{\text{Энтропийный риск}} \alpha \times EIR(WIP) + \beta \times CT(WIP) + \gamma \times WIP$$

При ограничениях:

$$TH(WIP) \geq TH^{tar}, CT(WIP) \approx \frac{WIP}{TH(WIP)}, WIP \text{ по VUT}$$

Практически: моделируем TH(WIP) и CT(WIP) (либо симуляцией, либо регрессией по историке), а  $W_q$  — через VUT. Параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  задают приоритеты (сервис/капитал/устойчивость). Результат — рекомендуемый лимит WIP\*.

#### 9. Политика управления и внедрение лимита:

Pull-механика:

Kanban: количество карточек  $K_{kanban}$   $\approx \frac{WIP^*}{\text{размер контейнера}}$

CONWIP: общий лимит WIP на контур =  $WIP^*$

DBR: целевой буфер времени/запаса на ограничении под целевой  $W_q$

10. Мониторинг, границы управления и эскалация

Установить контрольные пределы по =  $[H_{stat}^* H_{dyn}^* c_a^2 c_s^2 W_q CT TH]$

10.1 Если:

$H_{stat}^* > H_{thr}$   $\Rightarrow$  проверка баланса линии.

Если:

$W_q > W_{q,thr}$   $\Rightarrow$  снижение вариативности/перенастройка мощностей.

10.2 Визуализировать SPC-карты для СТ, TH, EIR (скользящие окна).

10.3 Триггеры действий: превышение порога  $\Rightarrow$  пересмотр WIP\* (шаг 8) и/или корректировки в графике, мощности, размерах партий, политике приоритетов.

При реализации настоящей методики в многообъемном кратчайшем производстве, расчет производится по семействам изделий и агрегируется EIR взвешенно по доле спроса.

Методика дается управляемый цикл: измерить энтропию — оценить вариативность и ожидание — взвесить показатели — найти WIP\* - внедрить pull-лимит — проводить мониторинг и адаптацию.

Таким образом, энтропийный подход позволяет интегрировать управление НЗП с задачами прогнозирования. На основе анализа энтропии динамики загрузки оборудования и времени цикла можно строить предiktивные модели, способные предсказать накопление избыточного НЗП или возникновение перегрузок в узких местах производственной линии. Методология энтропийного анализа выступает инструментом не только диагностики, но и стратегического управления.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Еще одним методологическим аспектом является возможность использования энтропийных показателей для анализа устойчивости производственных процессов. При росте энтропии в системе фиксируется снижение управляемости, что может проявляться в увеличении числа дефектов, росте времени просто-

ев или снижении пропускной способности. Соответственно, снижение энтропии до оптимального уровня свидетельствует о повышении предсказуемости и стабильности работы предприятия. В этом контексте энтропия становится индикатором «здоровья» производственной системы, позволяя менеджменту принимать обоснованные решения по оптимизации загрузки, изменению графика работы и перераспределению ресурсов.

С методологической точки зрения особое значение имеет интеграция энтропийного подхода с цифровыми технологиями. Современные системы сбора данных, промышленные IoT-решения и системы управления производственными ресурсами (ERP, MES) обеспечивают поток информации в реальном времени, который может служить базой для расчета энтропийных показателей. Это позволяет создать цифровой двойник производственного процесса, в котором уровень энтропии используется как индикатор эффективности и основывается на объективных данных.

Таким образом, методологические основы применения энтропийных показателей к управлению производственными процессами заключаются в формировании системы количественной оценки неопределенности и вариабельности, интегрируемой с задачами управления НЗП, прогнозирования и обеспечения устойчивости системы. Новизна подхода состоит в том, что он позволяет объединить задачи оценки качества, производительности и сбалансированности производственных процессов в единый аналитический контур. В отличие от традиционных методов, энтропийный анализ опирается на объективные данные и способен адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования предприятия. Это делает его особенно актуальным в условиях цифровизации промышленности и перехода к концепции Индустрии 5.0, где ключевыми факторами успеха становятся гибкость, адаптивность и устойчивость производственных систем.

#### Список источников

- Щербак А. В., Овчинников П. В., Погорелова Л. А. Оценка экономического эффекта за счет снижения объемов незавершенного производства при сокращении длительности производственного цикла изготовления продукции на сборочном производстве // Управление большими системами: труды XX Всероссийской школы-конференции молодых ученых (Новочеркасск, 10–13 сентября 2024 г.). Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 2024. С. 205–211. EDN KPOWTA.
- Погорелова Л. А., Овчинников П. В., Савельчев П. П. Оценка экономического эффекта в результате ускорения оборачиваемости оборотных средств при балансировке сборочного производства // Дружковский вестник. 2024. № 4 (60). С. 182–189. DOI 10.17213/2312-6469-2024-4-182-189. EDN RFOPQA.
- Гибсон Р., Руньковский В. Незавершенное производство. М.: Лаборатория книги, 2010. 47 с. EDN QXWNZR.
- Халиков М. А., Оверченко Д. В. Схема планирования механосборочных производств, минимизирующие незавершенное производство // Экономика и технология. Вып. 7. М.: Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, 1998. С. 142–146. EDN YSFMQO.
- Ижеева Т. С., Кононов В. Н. Проблемы оценки незавершенного производства проектных работ в бухгалтерском учете // Бухгалтерский учет, анализ, аудит и налогообложение: проблемы и перспективы: сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции. Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2015. С. 83–87. EDN TYHGYT.
- Редько С. Г., Селезнева Е. В. Применение системы имитационного моделирования Arena для исследования производственных линий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 4–2 (183). С. 276–283. EDN RXCAUH.

- 
7. Zhang Z. Manufacturing complexity and its measurement based on entropy models. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012; 62: 867–873. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3872-7>.
  8. Herrera-Vidal G, Coronado-Hernández J. R., Derpich-Contreras I, Paredes B. P. M., Gatica G. Measuring Complexity in Manufacturing: Integrating Entropic Methods. *Programming and Simulation. Entropy*. 2025; 27 (1): 50. <https://doi.org/10.3390/e27010050>.
  9. Kumar R., Singh S., Bilga P. S., Jatin, Singh J., Singh S., Scutaru M.-L., Pruncu C. I. Revealing the benefits of entropy weights method for multi-objective optimization in machining operations: A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 10. Pp. 1471-1492 <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.114>.
  10. Зорич В. А. Энтропия в термодинамике и в теории информации // Проблемы передачи информации. 2022. Т. 58, № 2. С. 3–11. DOI 10.31857/S0555292322020016. EDN DYXSYV.

### References

1. Shcherbak A. V., Ovchinnikov P. V., Pogorelova L. A. Evaluation of the economic effect due to a decrease in the volume of work in progress while shortening the production cycle time for manufacturing products in assembly production // Management of large systems: proceedings of the XX All-Russian school-conference of young scientists (Novocherkassk, September 10-13, 2024). Novocherkassk: South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platov, 2024. Pp. 205-211. EDN KPOWTA.
2. Pogorelova L. A., Ovchinnikov P. V., Savelchev P. P. Evaluation of the economic effect as a result of accelerating the turnover of working assets during balancing of assembly production. *Drukerovskij vestnik = Drucker Bulletin*. 2024; 4 (60): 182-189. (In Russ.). DOI 10.17213/2312-6469-2024-4-182-189. EDN RFOPQA.
3. Gibson R., Runkovsky V. Work in Progress. Moscow: Book Laboratory, 2010. 47 p. EDN QXWNZR.
4. Khalikov M. A., Overchenko D. V. Scheme for planning mechanical assembly production, minimizing work in progress // Economy and Technology. Iss. 7. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics, 1998. Pp. 142–146. EDN YSFMQO.
5. Izheeva T. S., Kononov V. N. Problems of assessing work in progress of design work in accounting // Accounting, analysis, audit and taxation: problems and prospects: collection of articles of the III All-Russian scientific and practical conference. Penza: Penza State Agricultural Academy, 2015. pp. 83–87. EDN TYHGYT.
6. Redko S. G., Selezneva E. V. Application of the Arena Simulation Modeling System for Studying Production Lines. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta = Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnical University*. 2013; 4–2 (183): 276–283. (In Russ.). EDN RXCAUH.
7. Zhang Z. Manufacturing complexity and its measurement based on entropy models. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012; 62: 867–873. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3872-7>.
8. Herrera-Vidal G, Coronado-Hernández J. R., Derpich-Contreras I, Paredes B. P. M., Gatica G. Measuring Complexity in Manufacturing: Integrating Entropic Methods. *Programming and Simulation. Entropy*. 2025; 27 (1): 50. <https://doi.org/10.3390/e27010050>.
9. Kumar R., Singh S., Bilga P. S., Jatin, Singh J., Singh S., Scutaru M.-L., Pruncu C. I. Revealing the benefits of entropy weights method for multi-objective optimization in machining operations: A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 10: 1471-1492. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.114>.
10. Zorich V. A. Entropy in Thermodynamics and Information Theory. *Problemy peredachi informatsii = Problems of Information Transmission*. 2022; 58 (2): 3–11. (In Russ.). DOI 10.31857/S0555292322020016. EDN DYXSYV.