

**ФРАГМЕНТ ГЛАВЫ 3 ДИССЕРТАЦИИ: ЭМПИРИЧЕСКАЯ,
КАУЗАЛЬНАЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ**

Тема диссертационного исследования: «Повышение операционной эффективности механосборочных цехов машиностроительных предприятий на основе проактивной цифровой диспетчеризации (MES-контур)».

Шифр научной специальности: 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

3.3. Результаты опытно-промышленной апробации и их содержательная интерпретация

Опытно-промышленная верификация разработанного алгоритма проактивного резервирования комплектующих и динамической перемаршрутизации партий деталей проводилась в течение 24 календарных недель (I–II полугодие 2025 г.) на базе двух механосборочных участков АО «Уралгидромаш». В контрольную группу (Участок № 1, $n_1 = 60$ рабочих смен) вошли технологические линии с традиционным сменно-суточным планированием в ERP-системе; в экспериментальную группу (Участок № 2, $n_2 = 60$ рабочих смен) — линии, переведенные на управление подсистемой динамической MES-диспетчеризации. Сводные результаты замеров производственных индикаторов до и после внедрения представлены в таблице 3.1.

Исследуемый производственный показатель	Контрольная группа ($n_1 = 60$), $M \pm SD$	Эксперимента льная группа ($n_2 = 60$), $M \pm SD$	Относит. сдвиг, Δ %	t-критерий Стьюдента (p-value)	Размер эффекта (d Коэна)
1. Внутрисменные межоперационные простои, мин/смену	44,8 $\pm$ 6,4	26,9 $\pm$ 4,8	–40,0 %	t = 17,34 (p = 0,0001)	d = 3,16 (очень сильный)
2. Коэффициент общей эффективности оборудования (ОЕЕ), %	64,2 $\pm$ 4,1	78,6 $\pm$ 3,5	+14,4 п.п.	t = 20,69 (p = 0,0001)	d = 3,78 (очень сильный)
3. Длительность производственного цикла партии (Lead Time), ч	118,5 $\pm$ 11,2	89,4 $\pm$ 8,7	–24,6 %	t = 15,89 (p = 0,0001)	d = 2,90 (очень сильный)
4. Уровень операционного технологического брака, %	2,84 $\pm$ 0,62	2,69 $\pm$ 0,58	–5,3 %	t = 1,37 (p = 0,1734)	d = 0,25 (незначимый)
5. Объем незавершенного производства (НЗП) на цеховом складе, млн руб.	38,4 $\pm$ 3,9	27,1 $\pm$ 2,8	–29,4 %	t = 18,22 (p = 0,0001)	d = 3,33 (очень сильный)

Эмпирическая и каузальная интерпретация данных таблицы 3.1.

Содержательная интерпретация полученных статистических оценок позволяет установить, что перевод участка на проактивное резервирование узлов за 90 минут до запуска технологической операции обеспечивает статистически высокосignificant сокращение внутрисменных межоперационных простоев с 44,8 до 26,9 мин за смену (снижение на 40,0 %; $t = 17,34$ при $p < 0,0001$; размер эффекта по Коэну $d = 3,16$). Столь выраженный каузальный эффект обусловлен действием двух взаимосвязанных организационно-технических механизмов: во-первых, ликвидацией информационной асимметрии между инструментально-раздаточной кладовой и станочными модулями с ЧПУ за счет автоматических RFID-триггеров; во-вторых, автоматическим пересчетом очереди сменных заданий при внеплановой остановке любого обрабатывающего центра в течение 45 секунд вместо регламентных 35–40 минут ручного согласования мастером цеха.

Теоретическая интерпретация и сопоставление с данными литературы.

Полученные эмпирические оценки согласуются с базовыми положениями теории ограничений Голдратта и выводами работ И. В. Соколова [14, с. 88] и М. К. Шмидта [27, р. 412], однако существенно уточняют их для условий многономенклатурного мелкосерийного машиностроения (размер партии 5–15 изделий). В отличие от результатов И. В. Соколова (2023), зафиксировавшего прирост ОЕЕ при внедрении MES-систем в пределах 6,5–8,0 п.п. из-за потерь времени на переналадку, в настоящем исследовании достигнут прирост ОЕЕ на 14,4 п.п. (с 64,2 % до 78,6 %, $p < 0,0001$). Это превышение объясняется включением в целевую функцию разработанного диспетчерского алгоритма матрицы групповой технологической близости оснастки (коэффициент конструктивно-технологического подобия КТП $\geq 0,72$), что позволило объединять однотипные операции без смены кулачков и режущего инструмента.

Интерпретация неподтвердившейся частной подгипотезы (строка 4 таблицы 3.1). Вместе с тем проверка показателя операционного технологического брака выявила снижение лишь с 2,84 % до 2,69 % ($t = 1,37$; $p = 0,1734 > 0,05$), что является статистически незначимым колебанием и опровергает выдвинутую во второй главе частную подгипотезу $H_{1.2}$ о прямом влиянии цифровой диспетчеризации на геометрическую точность обработки деталей. Причина отсутствия статистически значимого эффекта заключается в том, что параметры шероховатости и допусков определяются физическим износом шпиндельных узлов и термдеформацией инструмента, которые не зависят от логистического расписания подач заготовок.

Для количественной оценки вклада каждого изолированного фактора в результирующий прирост коэффициента ОЕЕ построена множественная линейная регрессионная модель методом наименьших квадратов ($n = 120$ смен). Параметры регрессионной модели представлены в таблице 3.2.

Факторный признак (предиктор модели)	Нестандарт. коэф. В (ст. ошибка SE)	Стандарт. коэф. β	t-статисти ка	Уровень значимости р	Коэф. VIF (коллинеарн ость)
Свободный член (Intercept β_0)	52,140 (1,820)	—	28,65	$p < 0,0001$	—
X ₁ — Доля партий, сгруппированных по матрице подобию оснастки (%)	+0,218 (0,021)	+0,542	10,38	$p < 0,0001$	1,34
X ₂ — Опережение комплектации рабочего места по RFID-триггеру (мин)	+0,164 (0,019)	+0,418	8,63	$p < 0,0001$	1,28
X ₃ — Средний квалификационный разряд операторов ЧПУ в смене (разряд)	+1,850 (0,490)	+0,176	3,78	$p = 0,0003$	1,12
X ₄ — Размер обрабатываемой партии деталей (шт.)	+0,092 (0,068)	+0,061	1,35	$p = 0,1796$	1,41
Итоговые параметры качества модели:	$R^2 = 0,842$; Скорр. $R^2 = 0,836$	$F(4, 115) = 153,2$	$p < 0,0001$	Критерий Дарбина–Уотсона DW = 1,94	Норма VIF < 5,0

Статистическая интерпретация регрессионной модели (таблица 3.2).

Коэффициент множественной детерминации $R^2 = 0,842$ (скорректированный $R^2 = 0,836$ при $F = 153,2$; $p < 0,0001$) доказывает, что 83,6 % дисперсии общей эффективности оборудования в механосборочном цехе объясняется включенными в модель организационно-техническими предикторами. Сопоставление стандартизированных коэффициентов эластичности β показывает, что доминирующий вклад в рост ОЕЕ вносит группировка партий по матрице конструктивно-технологического подобию оснастки ($\beta_1 = +0,542$, $p < 0,0001$) и опережающее RFID-комплектование рабочего места ($\beta_2 = +0,418$, $p < 0,0001$). При этом фактор физического размера партии в диапазоне от 5 до 25 деталей утрачивает статистическую значимость ($\beta_4 = +0,061$, $p = 0,1796$), что подтверждает адаптивность разработанного алгоритма к условиям единичного и мелкосерийного производства. Значения VIF по всем переменным не превышают 1,41 (при пороговом критерии $VIF < 5,0$), что свидетельствует об отсутствии мультиколлинеарности.

Выводы по главе 3 (сформулированные по правилу зеркального соответствия задачам исследования)

1. **Доказано** на выборке 120 рабочих смен (АО «Уралгидромаш»), что внедрение разработанного алгоритма проактивной цифровой диспетчеризации снижает внутрисменные межоперационные простои на 40,0 % (с 44,8 до 26,9 мин/смену при $p = 0,0001$) и сокращает длительность производственного цикла партии на 24,6 % за счет устранения задержек комплектации.
2. **Установлено** посредством множественного регрессионного анализа ($R^2 = 0,842$, $F = 153,2$, $p < 0,0001$), что ключевыми детерминантами прироста коэффициента общей эффективности оборудования (ОЕЕ) на 14,4 п.п. выступают пакетная группировка операций по коэффициенту подобия оснастки ($\beta = +0,542$) и предварительное RFID-резервирование инструмента за 90 минут до старта операции ($\beta = +0,418$).
3. **Выявлено** ограничение применимости предложенного метода: логистическая диспетчеризация не оказывает статистически значимого влияния на уровень технологического брака механической обработки ($\Delta = -5,3$ %, $p = 0,1734$), для снижения которого требуется интеграция контура виброакустического мониторинга износа режущего инструмента.
4. **Определен** подтвержденный годовой экономический эффект от высвобождения оборотных средств в незавершенном производстве (снижение НЗП на 29,4 %, или на 11,3 млн руб.) и роста пропускной способности цеха, составивший 16,85 млн руб. в ценах 2025 года.

Образец подготовлен экспертами академического портала <https://dissertop.ru/> в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11–2011.