

УДК 621.10

**Е.В. Мишура, доцент, канд. техн. наук***Донбасская государственная машиностроительная академия**ул. Шкадинова, 72, г. Краматорск, Украина, 84300**E-mail: evm@krm.net.ua***СТРУКТУРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНООБРАБОТКИ  
ВАЛКОВ ХОЛОДНОГО ПРОКАТА**

*Рассмотрены вопросы выбора и обоснования комплексного критерия оптимальности технологической операции механической обработки, учитывающего влияние на эффективность технологической операции детерминированных и стохастических факторов. Предложена форма комплексного критерия оптимальности, представляющего собой аддитивную свертку частных критериев снабженных весовыми коэффициентами. Обоснованы требования, предъявляемые к выбору комплексного критерия.*

**Ключевые слова:** технологическая операция, оптимизация, аддитивная свертка, критерий, детерминированный, стохастический.

В современных условиях дефицита ресурсов и требований обеспечения конкурентоспособности (условия рыночной экономики) для условий конкретного машиностроительного предприятия, конкурентным можно считать тот техпроцесс, от реализации которого предприятие сможет получить максимальный эффект – прибыль, сниженную себестоимость, повышенную производительность, обеспечение качества. Другими словами, определенный набор требований [1]. Обеспечение конкурентоспособности продукции диктует свои требования при проектировании техпроцесса, а не наоборот.

Заводы тяжелого машиностроения выпускают крупногабаритные машины большой массы, состоящие, как правило, из многих тысяч деталей. Изготовление отдельных машин длится несколько месяцев. Трудоемкость механической обработки крупных и сложных деталей велика и достигает 600 станко-часов на одну деталь. Оснащенность процесса механической обработки сравнительно невысокая [2].

Краткость сроков, обычно устанавливаемых на технологическую подготовку крупных деталей, приводит к тому, что разработку технологических процессов выполняют параллельно несколько технологов. В результате получается большое разнообразие в построении технологических процессов на изготовление сходных деталей, появляется потребность в большой номенклатуре станочного оборудования, инструментов и приспособлений.

**Целью** работы является выбор и обоснование метода структуризации технологических процессов механической обработки, учитывающего влияние на эффективность технологической операции факторов, сопровождающих производственную деятельность.

Разработка типовых технологических процессов изготовления изделий тяжелого машиностроения имеет существенное влияние на технологические процессы производства крупногабаритных деталей и может обеспечить уменьшение трудоемкости изготовления; высокий технологический уровень типового технологического процесса, эффективно использующего современные достижения в области технологии машиностроения.

Преимуществами такого подхода являются существенные ограничения количества технологических процессов для одинаковых или подобных деталей и сокращение затрат как материальных так и интеллектуальных благодаря многократному применению разработанных технологических процессов.

Предлагаемый метод структуризации проектирования производственных процессов (рисунок 1) основывается на закономерностях возникновения и развития потребностей, стадийного развития техники, эволюции технических систем, соответствия между функциями и структурой технических систем. Теория последовательного принятия решений в процессе проектирования и оптимизации производственных процессов в машиностроительном производстве в общем виде может быть представлена шестью основными этапами. К первому этапу относится выбор и обоснование объекта, цели и задач исследования. Ко второму – выбор и обоснование оптимальных критериев качества оптимизируемой технологической системы. К третьему – выбор наиболее рациональной функциональной структуры, описывающей оптимизируемую технологическую систему. К четвертому – выбор наиболее эффективного принципа действия для реализации функциональной структуры, обоснование выбора метода оптимизации. К пятому этапу – выбор наилучшего технического решения, реализующего принцип действия, обоснование программного аппарата исследования. Шестой этап – определение оптимальных параметров выбранного технического (технологического) решения.

На каждом этапе для выбора решения целесообразно использовать автоматизацию поискового проектирования и конструирования, банки технологических знаний и банки данных. Эффективность решения задач возрастает от 6-го к 1-му уровням. Таким образом, главным отличием применяемого метода является системно-методическая основа разработки и создания конкурентоспособных изделий тяжелого машиностроения.

Таким образом, структуризация типового технологического процесса изготовления валков при установленном маршруте обработки сводится к оптимизации выбора заготовки, куда входит оптимизация выбора материала заготовки, метода получения исходного металла заготовки (двойной переплав с микролегированием или электрошлаковый переплав), способа получения самой заготовки; и оптимизации предварительных (до термической обработки) и окончательных технологических операций (рисунок 2).

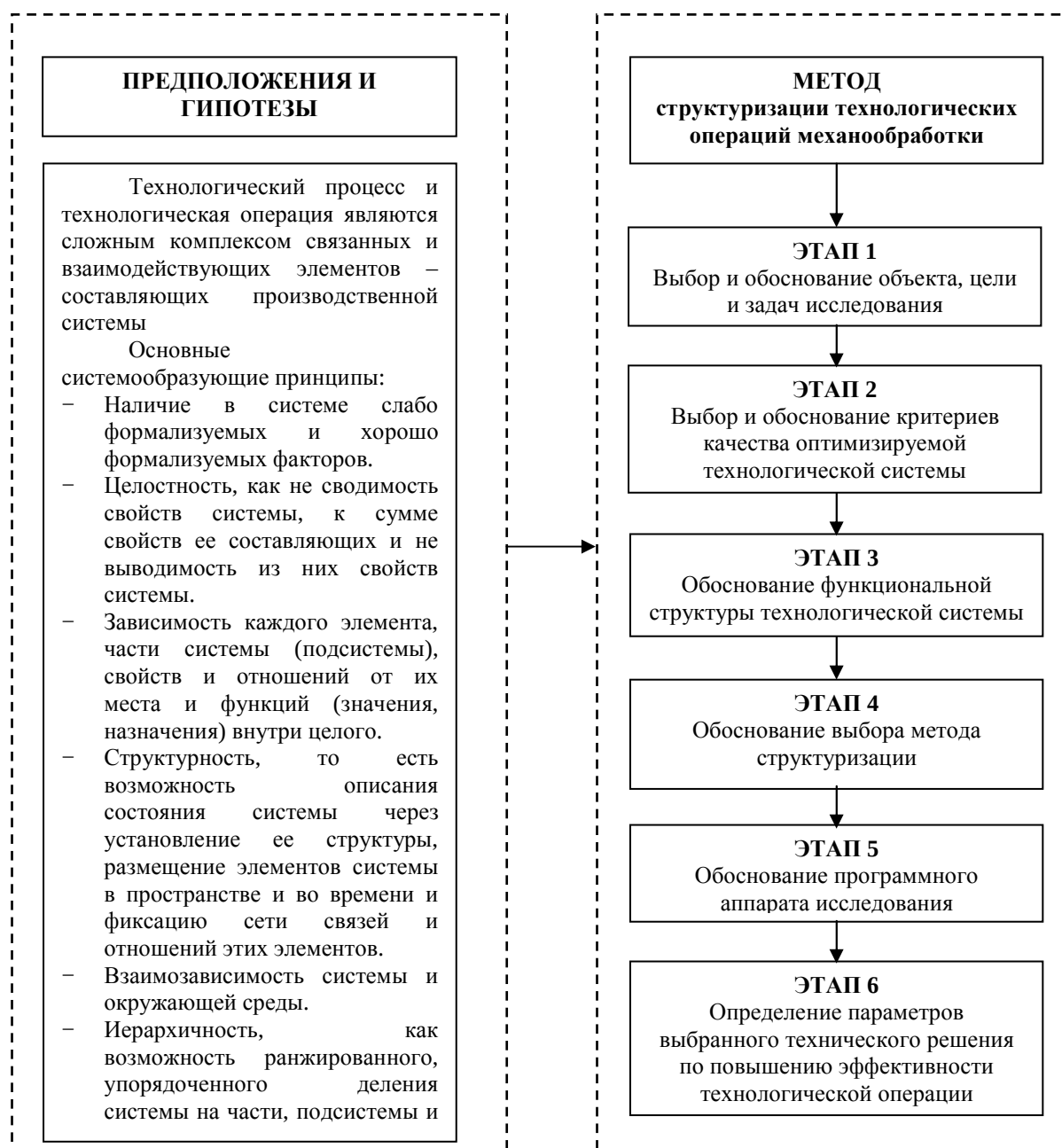


Рисунок 1 – Метод структуризации технологических операций механической обработки деталей

Опыт разработки технологических процессов показал, что не во всех производственных условиях они одинаково эффективны. Факторы внешней среды оказывают влияние на различные критерии, в том

числе на критерии стоимости и производительности механообрабатывающих операций. В частности, невысокий уровень мотивации труда и организации рабочего места могут значительно исказить ожидаемый результат.

Рассматривая технологический процесс и технологическую операций как открытую систему, на которую оказывают влияние внешние факторы необходимо создание перспективного подхода к повышению эффективности технологических операций механообработки, позволяющего системно повысить их качество. Для этого необходимо обосновать критерий оптимальности, учитывающий влияние на эффективность технологической операции факторов, сопровождающих производственную деятельность. По нашему мнению основой такого подхода может являться применение нового, комплексного критерия оптимальности технологической операции механообработки.

Актуальность такого подхода определяется, прежде всего, тем, что сама технологическая операция является системой связанных и взаимодействующих элементов – составляющих производственной системы.

В качестве основных, системообразующих, принципов, учитываемых при моделировании оптимальной технологической операции, можно выделить следующие:

1) целостность, то есть не сводимость свойств системы, к сумме свойств ее составляющих и не выводимость из них свойств системы.

2) зависимость каждого элемента, части системы (подсистемы), свойств и отношений от их места и функций (значения, назначения) внутри целого.

3) структурность, как возможность описания статического состояния системы через установление ее структуры, размещение элементов системы в пространстве и во времени и фиксацию сети связей и отношений этих элементов.

4) взаимозависимость системы и окружающей среды, как возможность отграничить систему от окружающей ее среды, "выделить" систему из окружающей среды путем определения ее границ.

5) иерархичность, как возможность ранжированного, упорядоченного деления системы на части, подсистемы и элементы.

Используя системообразующие принципы, обозначим общий или комплексный критерий, являющийся основным при оптимизации технологических операций.

Предлагаемый комплексный критерий  $F$  оптимальности представляет собой аддитивную свертку частных критериев  $K_i$  снабженных весовыми коэффициентами  $f_i$ :

$$F = \sum_{i=1}^n f_i K_i ,$$

где  $n$  – количество учитываемых частных критериев

В аддитивной схеме используется взвешенная сумма рейтингов, в которой взвешивающий коэффициент определяет вес слагаемого в сумме. При этом

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1 .$$

Аддитивная схема объединения (агрегирования) применяется для оценки групповых рейтингов, в которой агрегируются микрореიტинги признаков [3].

Поскольку понятие композиции критериев не может априорно задаваться либо их суммой, либо другими зависимостями, то ее выявление следует производить на основе вычислительной математической конструкции, способной отражать системные свойства технологической операции выражающиеся в совокупности детерминированных и стохастических факторов.

Для отбора комплексного критерия предъявляются следующие требования:

1) полнота – использование дополнительных критериев не меняет результаты, а отбрасывание хотя бы одного приводит к изменению результатов;

2) минимальность – набор должен содержать минимально необходимое число критериев;

3) операциональность – каждый критерий должен иметь понятную формулировку, ясный и однозначный смысл;

4) измеримость – каждый критерий должен допускать возможность адекватной оценки;

5) экономичность – связь с экономическими показателями;

6) экологичность – связь с показателями экологической безопасности механообработки.

Для  $i$ -ого перехода технологической операции величина комплексного критерия  $F$  совокупности показателей технологической операции определяется зависимостью:

$$F_i = f_1 k_1^* + f_2 k_2^* + \dots + f_n k_n^* ,$$

где  $k_i^*$  – нормализованные значения критериев на  $i$ -ом переходе операции;  $f_1, f_n$  – положительные числа, характеризующие относительную важность критериев сумма которых определяется как:

$$f_1 + f_2 + \dots + f_n = 1.$$

Нормализация критериев, т.е. приведение их к безразмерному виду, осуществляют по формуле [4].

$$K_i^* = \frac{K_i - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}},$$

где  $K_{\min}$  и  $K_{\max}$  – минимальное и максимальное значения критерия  $K$  на множестве решений;  $K_i$  и  $K_i^*$  – текущее и нормализованное значения критерия  $K$  на  $i$ -ом переходе операции.

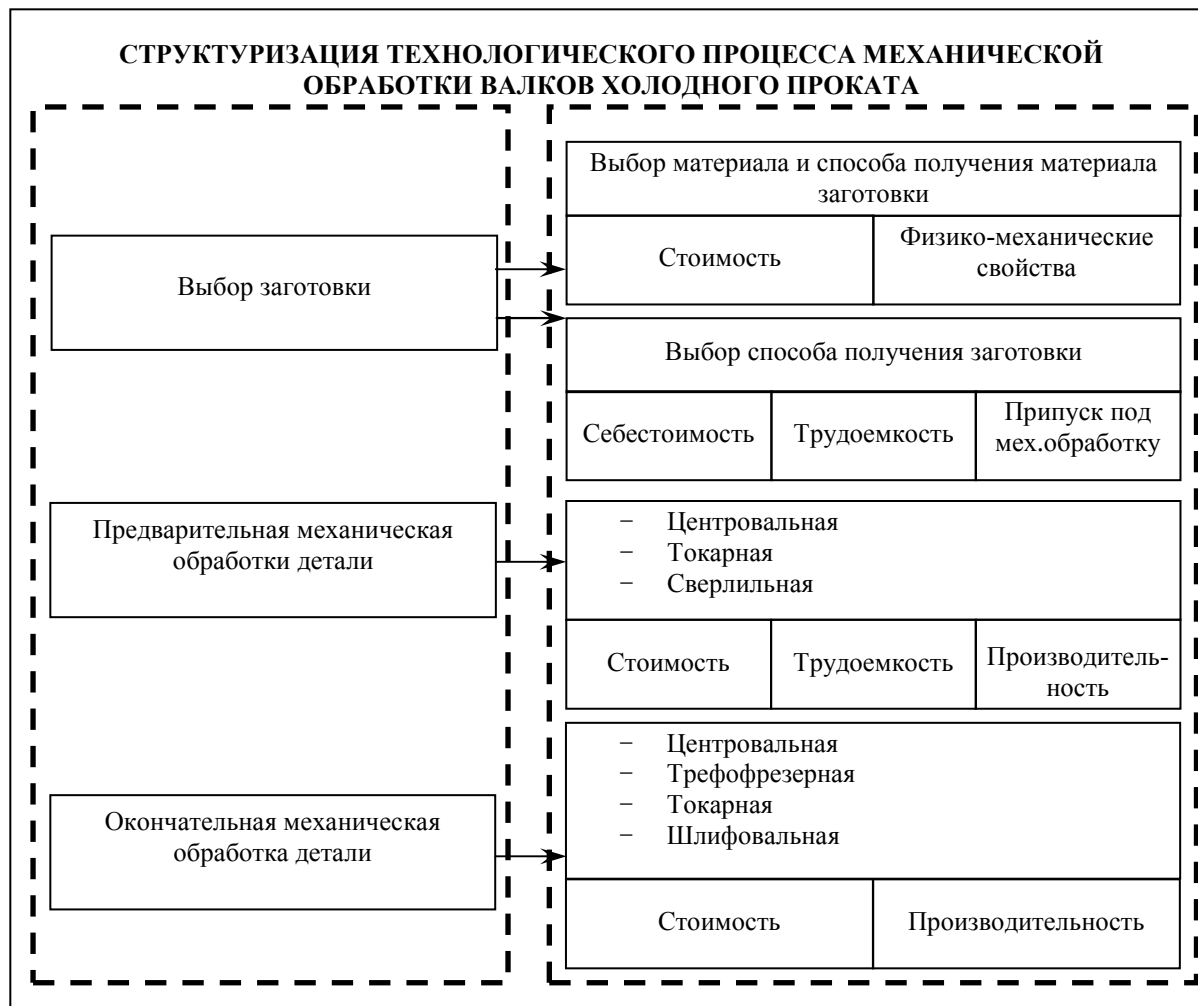


Рисунок 2 – Структуризация типового технологического процесса механической обработки деталей

Целевая функция  $F$  представленная комплексным критерием оптимизационной задачи определяется по формуле:

$$F_i = f_1 K_1^* + f_2 K_2^* + \dots + f_n K_n^* \rightarrow \max,$$

где  $X$  – совокупность признаков, описывающих оптимизируемую систему;  $K_i^*$  – нормализованное значения частного критерия  $K$ ;  $f_n$  – коэффициенты значимости частных критериев оптимальности.

Ограничениями данной оптимизационной задачи будут являться:

- минимальные и максимальные значения признаков, описывающих оптимизируемую систему, заданных обучающей выборкой;
- условия прохождения полного маршрута обработки;
- условия невозможности последовательного выполнения вариантов переходов в технологической операции, если они не связаны друг с другом.

Все рассматриваемые частные критерии, применимые для оптимизации технологических операций механообработки можно разделить на 3 группы: технические, экономические и социальные (связанные с человеком).

К техническим критериям относятся: точность и качество обработки.

К экономическим критериям отнесем: трудоемкость изготовления детали, производительность обработки, удельную стоимость, себестоимость обработки, продуктивность, приведенные затраты.

К социальным критериям отнесем критерий напряженности труда станочника, уровень организации рабочего места, уровень мотивации труда и подобные им.

Комплексный критерий технологической операции механообработки будет зависеть от востребованности конечной продукции, где продукция уже не просто является оптимальной с позиций системности признаков, а представляет собой результат технологических услуг, позволяющих с минимальными издержками удовлетворить потребности потребителя.

Таким образом, комплексный критерий является системой характеристик технологических операций отражающей способность производства генерировать ценность производимой продукции на всех этапах технологического процесса.

Преимуществами такого подхода будут являться:

1. Структура модели, отражающая особенности формирования комплексного критерия, идентифицируется с исходными данными, то есть с данными идентификационного множества.
2. При определении параметров математической модели комплексного критерия (причем комплексный критерий из-за неопределенности его вида заменяется идентификационной моделью) особо важным будет являться понятие значимости входов.
3. Входы модели комплексного критерия представляют собой частные критерии, построение которых может выполняться известными методами идентификации.
4. Выбор частных критериев осуществляется аналитически или на основе метода экспертных оценок.

Так как вычисление комплексного критерия технологической операции не может производиться по одному критерию, оно представляет собой комплекс мероприятий, направленный на оценку взаимосвязи от проектирования технологических операций до выпуска конкурентоспособной и востребованной продукции.

Таким образом, с применением комплексного подхода к структуризации технологических операций механообработки появляется возможность проектирования и оптимизации технологических операций не только с учетом технических требований, но и с учетом стохастических требований, предъявляемых к выпускаемой и реализуемой продукции.

Особенностями оптимизируемых тяжелых токарных операций окончательной обработки бочки рабочих валков холодной прокатки являются:

- высокая твердость бочек после термообработки (80-90 ед. по Шору);
- разброс твердости обрабатываемой поверхности бочки (2-3 ед.);
- обработка производится резцами, оснащенными сменными непerezатачиваемыми многогранными пластинами из твердого сплава марок Т15К6 и Т14К8 с активным применением СОЖ;
- глубина резания составляет 1-1,5 мм;
- подача  $S$  выбирается в диапазоне 0,2-1,0 мм/об в зависимости от твердости стали;
- скорость резания  $V = 25-30$  м/мин.

При указанных условиях время обработки составляет 30-40 часов.

Для оптимизации окончательной токарной операции обработки бочки вала холодной проката после термообработки токами промышленной частоты приняты к использованию четыре модели: удельная стоимость технологической операции  $C$  у.е/мин, производительность технологической операции  $Q$  шт/мин, напряженность труда станочника  $HT$ , уровень мотивации труда станочника  $MT$ . Основными ограничениями являются точность и качество обработанной поверхности, характеризуемые показателями качества точности  $IT$  и шероховатостью  $Ra$ , мкм. Форма комплексного критерия будет задана следующим образом:

$$F = -f_1 C(\bar{X}_{xf}; \bar{X}_{cf}) + f_2 Q(\bar{X}_{xf}; \bar{X}_{cf}) + f_3 HT(\bar{X}_{xf}; \bar{X}_{cf}) + f_4 MT(\bar{X}_{xf}; \bar{X}_{cf}),$$

где в качестве хорошо формализуемых факторов исследовано влияние скорости обработки  $V$  м/мин и подачи  $S$  мм/об на комплексный критерий.

Согласно разработанного метода комплексной структуризации, на первом этапе проводилась оптимизация детерминированных факторов, на втором – стохастических, на третьем – непосредственная комплексная структуризация всех факторов при весовых коэффициентах  $f_i$ , устанавливаемых по требованиям производства. Поиск рациональных (оптимизируемых по критерию  $F$ ) режимов обработки резанием на токарной операции и уровней мотивации и напряженности труда осуществляется методом полного перебора указанных факторов. Полученные вербальные описания нейросетевых моделей

позволили выделить из факторов, входящих в модель технологической операции механообработки, наиболее значащие по критерию  $F$  и потому влияющие на процесс механообработки и позволяющие им управлять.

Оптимизация режимов резания тяжелой токарной технологической операции обработки валков холодного проката предполагала исследование зависимости режимной части операции для двух групп инструментального материала Т15К6 и Т14К8 от составляющих комплексного критерия оптимизации  $F$ . Исследуя влияние детерминируемых факторов на составляющие комплексного критерия, получены зависимости технологических режимов от комплексного критерия токарной операции механообработки (рисунок 3).

Поскольку сумма весовых коэффициентов комплексного критерия должна равняться единице, зададим весовые коэффициенты частным критериям, входящим в комплексный:  $f_1 = 0,2$ ,  $f_2 = 0,4$ ,  $f_3 = 0,2$ ,  $f_4 = 0,2$ . Это значит, что приоритетным направлением при оптимизации является рост производительности технологической операции, его коэффициент составит  $f_2 = 0,4$ ; при заданном уровне качества обрабатываемой поверхности ( $f_4 = 0,2$ ), учитывая требования к точности обработки ( $f_3 = 0,2$ ) и снижению стоимости обработки ( $f_1 = 0,2$ ).

Полученные значения позволяют сделать вывод о том, что при следующем уровне значимости: производительности  $Q$  шт/мин = 0,5; удельной стоимости  $C$  грн/мин = 0,2, точности обработки  $IT = 0,2$  и качестве обработки  $Ra$ , мкм = 0,3 целесообразно использовать следующие режимы: скорость резания  $V = 55$  м/мин, подача  $S = 0,42$  мм/об, уровень напряженности труда станочника  $HT = 5,5$  и уровень мотивации труда  $MT = 5$ . Изменяя весомости частных критериев в соответствии со сложившейся на данный момент производственной ситуацией, мы изменяем технологические режимы обработки и требования к  $HT$  и  $MT$ .

Предложенный в статье метод структуризации технологических операций, основанный на принципе целостности систем и учитывающий влияние на выбор рациональных режимов резания совокупности детерминированных (технологические характеристики) и стохастических (организационные характеристики) факторов, позволяет обосновать изменение технологических режимов обработки при изменениях условий их выполнения, обеспечить усовершенствование технологических операций и технологических процессов в целом путем целенаправленного изменения слабо формализуемых факторов и рационально использовать имеющиеся для этого ресурсы предприятия. Метод может быть использован на различных машиностроительных предприятиях, так как универсальность предложенного подхода оставляет возможность адаптации метода для структуризации других параметров процесса механической обработки, а также других этапов технологического процесса производства продукции.

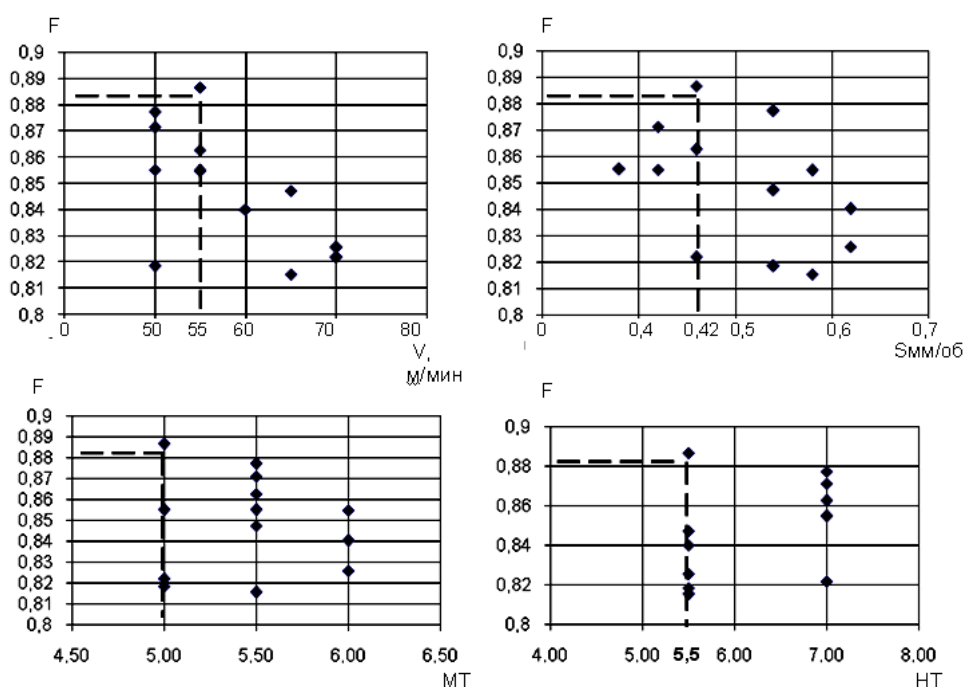


Рисунок 3 – Результаты комплексной оптимизации сильно и слабо формализуемых факторов тяжелой токарной операции обработки валков холодного проката

**Библиографический список использованной литературы**

1. Мишура Е.В. Комплексный подход к оптимизации технологических процессов механообработки изделий тяжелого машиностроения / Е.В. Мишура // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. — Краматорськ – Київ: ДДМА, 2004. — Вип. 15. — С. 201–207.
2. Никифоров А.Д. Процессы управления объектами машиностроения: учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов / А.Д. Никифоров, А.Н. Ковшов, Ю.Ф. Назаров. — М.: Высшая школа, 2001. — 455 с.
3. Математичне моделювання технологічних процесів у машинобудуванні: навч. посібник / А.І. Гордієнко, Л.Г. Полонський, П.П. Мельничук, М.Л. Хейфеці. — Житомир, ЖІТІ, 2001. — 190 с.
4. Якобс Г.Ю. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации / Г.Ю. Якобс, Э. Якоб, Д. Кохан. — М.: Машиностроение, 1981. — 279 с.

*Поступила в редакцию 18.04.2011 г.*

**Мішура Є.В. Структуризація технологічних процесів механічної обробки валків холодного прокату**

Розглянуто питання вибору й обґрунтування комплексного критерію оптимальності технологічної операції механічного оброблення, що враховує вплив на ефективність технологічної операції детермінованих і стохастичних факторів. Запропоновано форму комплексного критерію оптимальності, що представляє собою адитивну згортку окремих критеріїв поставлених ваговими коефіцієнтами. Обґрунтовано вимоги, пропоновані до вибору комплексного критерію.

**Ключові слова:** технологічна операція, оптимізація, адитивна згортка, критерій, детермінований, стохастичний.

**Mishura E.V. Structuring technological processes of machining for rollers of cold rolling**

Considered are the questions of selecting and substantiating the complex criterion of optimization for the technological operation of mechanical processing taking into account the influence of deterministic and stochastic factors on the technological operation efficiency. Offered is the form of complex optimization criterion that represents additive folding of individual criterions, which have weight coefficients. The requirements to the selection of the complex criterion are substantiated.

**Keywords:** process operation, optimization, and additive convolution criterion, deterministic, stochastic.