

УДК 004.045

К ВОПРОСАМ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ SMART DESIGN ПРИ УПРАВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Сулюкова Л.Ф.¹, Якубжанова Д.К.², Джумаев С.Н.²

¹ Национальный исследовательский университет «ТИИМСХ»,
Ташкент, Узбекистан

² Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми, Самарканд, Узбекистан
slf72@yandex.com, dilya55575@mail.ru; sindordjumayev@gmail.com

Аннотация. Данная статья носит обзорный характер и посвящена проблемам исследований и разработки научно-методических основ цифрового проектирования, включающим технологии, обеспечивающие реализацию концепции передового цифрового «smart» проектирования в машиностроении. Драйвером этого процесса выступает технология разработки цифрового двойника (Digital Twin). Выполненный анализ по проектированию и внедрению цифровых двойников на предприятиях показал, что методика 3D-моделирования цифрового производства, создание виртуальных моделей, методы имитационного моделирования цифрового производства позволяет обосновать как внедрение цифровых технологий, так и проектов цифрового проектирования технологических процессов и производства в целом. Разработка цифровых двойников осуществляется на основе анализа данных о фактическом технологическом процессе с использованием современных методов машинного обучения (Machine Learning) и технологий больших данных (Big Data).

Ключевые слова: Smart Design, цифровой двойник, режущий инструмент, нейросетевые модели, цифровое производство, машиностроение, методы проектирования и оптимизации.

I. ВВЕДЕНИЕ

В Республике Узбекистан большое внимание уделяется проведению исследований в целях дальнейшего расширения производства отечественной сельскохозяйственной техники, удовлетворения потребностей сельхозпроизводителей в современной высокопроизводительной технике, а также увеличения экспортного потенциала отрасли машиностроения.

Одной из актуальных тенденций в современном машиностроении является активное внедрение цифровых технологий на производстве. Развитие и внедрение достижений цифровых

технологий в совершенствовании систем управления и проектирования технологических процессов является одной из важнейших задач повышения технического уровня производств и качества выпускаемой продукции современного машиностроения. Решение данной задачи неразрывно связано с рассмотрением вопросов обеспечения требуемой точности форм и геометрических размеров обрабатываемых деталей, а также стремлением к снижению металлоемкости машин и оборудования, что обусловило необходимость широкого применения класса так называемых деталей высокой точности.

Цифровое проектирование, математическое моделирование и управление жизненным циклом изделия или продукции (Smart Design): включает технологии, обеспечивающие реализацию концепции передового цифрового «умного» проектирования; драйвером этого процесса выступает технология разработки цифрового двойника (Digital Twin) на основе создания и применения многоуровневой матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений, математических моделей разных классов, уровней сложности и адекватности (в самых общих случаях описываемых нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных), проведения виртуальных испытаний и применения виртуальных стендов.

Литературный обзор проводился по материалам научных трудов за последние 20 лет. В данном исследовании были проанализированы статьи, содержащие доказательную и экспериментальную базу по наиболее актуальным вопросам, касающимся применения технологий Smart Design при управлении технологическими процессами производства.

Цель работы: обобщить имеющиеся литературные данные о современных концепциях применения технологий Smart Design, в частности цифровых двойников (Digital Twin) технологических систем.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Решение задач цифрового проектирования технологических систем механической обработки, обеспечивающего требуемые точность и качество поверхности, затрудняются тем, что в процессе обработки сама деталь, инстру-

мент и узлы станка, находясь в относительном движении, представляют собой сложную динамическую систему, поведение которой заранее определить без целевых и теоретических исследований практически невозможно. Наиболее целесообразным направлением решения задачи является создание цифровых двойников технологических систем механической обработки деталей на основе научно обоснованных технологических методов воздействия на заготовку.

Цифровой двойник (ЦД) - одна из наиболее перспективных технологий современности. ЦД представляет собой ансамбль математических моделей, отражающих различные аспекты процесса обработки и состояния элементов технологической системы, включая заготовку, и обменивающихся данными между собой и с физическим объектом-прототипом в режиме реального времени.

Суть цифрового двойника состоит в том, чтобы принимать решения на основе различных предположений. Тесты проводят на виртуальном аналоге без необходимости вмешиваться в работу реальных, зачастую дорогих, объектов.

Применение цифрового двойника позволяет прогнозировать с существенно более высокой степенью достоверности состояние объекта, возможные нештатные ситуации, оперативно на них реагировать, снижая угрозы безопасности, здоровью людей и окружающей среде, увеличить глубину понимания процессов, происходящих в объекте и продукте, за счет наработки расширенной статистики «виртуальной» эксплуатации объектов, более точно рассчитывать экономику проекта и управлять ею, сократить время внедрения необходимых изменений.

Современная концепция применения цифровых двойников технологических систем предполагает интеграцию для комплексного моделирования элементов и процессов различных программ, в том числе основанных на использовании метода конечных элементов, интеграции различных моделей (механических, электромеханических, гидро- и пневматических) из разных математических пакетов. Этот подход отличается сложностью объединения различных по форматам выходных данных виртуальных моделей, различающихся временем выполнения расчетов, сложностью их подготовки, включая идентификацию параметров моделей. В условиях единичного, мелко- и среднесерийного производства подготовка и проведение сложных аналитических расчетов нецелесообразны и не для всякого производства возможны. Использование сложных аналитических моделей требует идентификации большого количества трудно определяемых конструктивных и технологических параметров.

В статье [1] авторами предлагается новый подход к построению цифровых двойников реальных объектов. Авторы опираются на свой унифицированный процесс построения приближенных решений краевых задач для уравнений математической физики и накопленный опыт решения большого числа конкретных задач такого типа. В работе представляется пять подходов к построению цифровых моделей-двойников, опирающиеся на разработанные и протестированные эволюционные алгоритмы. Особенностью предлагаемого подхода к эволюционным алгоритмам является использование генетических процедур для построения структуры модели и алгоритмов нелинейной оптимизации для подстройки

ее параметров. Кроме того, предлагаемый подход к построению многослойных моделей по дифференциальным уравнениям, позволяющий обойтись без трудоёмкой процедуры обучения нейронных сетей. Предложенные авторами подходы позволяют существенно упростить и унифицировать создание и адаптацию цифровых двойников реальных объектов разного рода.

В работе [2] предложен численный алгоритм геометрического моделирования, основанный на технологии Z-буфера с авторскими модификациями. Разработанная математическая модель динамики пространственного фрезерования позволяет вычислять усилия резания, погрешности обработанной поверхности и амплитуды вибраций при обработке различными типами фрез деталей со сложным профилем поверхности. При этом учитывается изменение динамических характеристик детали по мере снятия материала за счет поэтапной модификации ее конечно-элементной динамической модели. Полученная в результате расчета информация может быть использована для оценки качества фрезерования и выбора рациональных режимов обработки.

В работе [3] предложена цифровая модель (двойник) режущего инструмента на основе нейросетевого моделирования. Показано, что разработанная виртуальная модель еще до реализации реального процесса изготовления режущего инструмента путем варьирования входными данными искусственной нейронной сети дает возможность оптимизировать состав и структуру износостойкого покрытия и определять режимы обработки, обеспечивающие максимальную износостойкость режущего инструмента. Цифровой паспорт режущего инструмента позволит потребителю избежать покупки контрафактного изделия. Рассмотрение ЦД не

конкретного изделия, а всего производства, позволяет симулировать в виртуальной среде все процессы и определять необходимое количество и оптимальное расположение оборудования в зависимости от объема и номенклатуры выпускаемых изделий. При этом если ЦД разрабатывают для вновь создаваемого производства, то путем симуляции его работы можно выявить риски и недочеты, скорректировать проект. ЦД существующего производства дает возможность прорабатывать внедрение или изменение технологических процессов без вмешательства в работу реального процесса.

В работе [4] рассматриваются вопросы создания математических моделей процессов механической обработки с использованием системы сенсоров и промышленного интернета вещей. Оценены методы машинного обучения, подходящие для реализации названных задач. Предложена нейросетевая модель динамической устойчивости процесса резания, позволяющая оптимизировать процесс механической обработки на этапе технологической подготовки производства. На основе подходов нелинейной динамики реконструированы аттракторы динамической системы резания и определены их фрактальные размерности. Выбраны оптимальные характеристики оборудования по входным параметрам и отладке планируемого технологического процесса на основе цифровых двойников. Использование методов машинного обучения позволило создать и исследовать нейросетевые модели технологических систем обработки резанием и программное обеспечение для их реализации. Показана возможность применения деревьев решений для задачи диагностики и классификации неисправностей станков с ЧПУ.

В работы [5] разработана стохастическая модель, позволяющая исследовать динамику процесса плоского шлифования при заданных режимах обработки. Предложена методика оценки качества обработки с учетом деформируемости технологической системы, на основе моделирования динамики инструмента и детали при шлифовании и путем моделирования установлено, что учет деформируемости системы позволяет определить параметры обработки, при которых возбуждаются автоколебания за счет механизма регенеративного возбуждения.

В работе [6] рассматривается пример формирования нескольких взаимосвязанных прогнозирующих модулей, входящих в структуру цифрового двойника процесса точения и предназначенных для прогнозирования качества обработки, характера стружкообразования, силы резания. Проведен трехфакторный эксперимент по твердому точению стали ХВГ, закаленной до твердости 55 HRC. На примере проведенного эксперимента описан процесс разработки диагностического модуля цифрового двойника на основе искусственных нейронных сетей. Выявлены более высокие точность, адаптивность и универсальность искусственных нейронных сетей при разработке математической модели для прогнозирования и диагностики процесса резания. Разработанная математическая модель онлайн-диагностики процесса резания для определения качества поверхности и типа стружки при обработке использует фактическое значение снимаемого припуска, определяемого косвенно по силовой нагрузке на приводе. При этом модель использует только сигналы датчиков, входящих в диагностическую подсистему на станке с ЧПУ. В качестве информативного признака, отражающего силовую нагрузку на приводе

главного движения станка, выбрано значение энергии сигнала силы тока в моторе привода шпинделя. Установлено, что развитие цифрового двойника возможно за счет разработки дополнительных модулей, прогнозирующих точность размеров, геометрический профиль, износ инструмента.

В работе [7] отмечается, что создание цифровых производств на предприятиях машино- и приборостроения на основе разработки и внедрения новых критических и высоких технологий и инновационных проектов обеспечивает:

- увеличение объемов производства и производственных мощностей;
- сокращение сроков разработки и постановки на производство инновационной продукции, техники новых поколений;
- рост их конкурентоспособности на внешних рынках; – повышение гибкости производства при изменениях в продуктовой линейке, номенклатуре и производственной программе выпуска инновационной продукции путем создания сектора (кластера) предприятий цифровых производств.

В работе [8] рассмотрены вопросы построения диагностических экспертных систем на основе нейронных сетей с латеральным торможением. Предложены методы обучения таких сетей. Проанализированы вопросы получения диагностической информации в гетерогенной вычислительной сети и использования априорной информации о значимости диагностических признаков. Результаты работы могут быть использованы при построении нейросетевых диагностических систем. Использование нейронной сети Кохонена в качестве кластеризатора технического состояния вычислительной сети при соответствующем выборе метрики при-

знакового пространства позволяет достичь приемлемых результатов диагностирования даже для небольших обучающих выборок. В этом основное преимущество предлагаемого метода при решении задач диагностирования вычислительных сетей над эвристическими алгоритмами, лежащими в основе традиционных ДЭС и требующими большого объема статистических данных. Описанный метод кластеризации позволяет рекомендовать предложенные модели и алгоритмы для использования в диагностических экспертных системах, для гетерогенных вычислительных сетей нового поколения. Однако следует отметить, что результаты работы таких кластеризаторов критичны к степени близости используемой метрики к реальному разделению диагностических параметров на кластеры, а выбор наилучшей метрики может быть достаточно долгим и трудоемким.

В статье [9] экспериментах предложена 3 + 2-осевая стратегия для обработки общей сложной поверхности произвольной формы несферическим инструментом. Поскольку для 3+2-осевой обработки требуется лишь конечное небольшое число различных ориентаций инструмента, индексированный трехосевой станок достаточно, что устраняет необходимость в дорогом пятиосевом станке. Кроме того, значительно увеличилось жесткость трех линейных осей станка значительно улучшит кинематику и динамику станка и таким образом, повысить точность обработки. Проводятся эксперименты, как по компьютерному моделированию, так и по физической обработке, результаты которых подтверждают, что по сравнению с использованием обычной сферической фрезы, используя несферическую фрезу и адап-

тивно регулируя положения инструмента и направления подачи можно добиться значительного повышения эффективности обработки, например, более чем 50%.

III. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ИТ-ЛАНДШАФТЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

Развитие в стране ИКТ, в том числе доступного скоростного интернета, должно заинтересовать бизнес внедрять цифровые технологии в различные производственные процессы для повышения производительности труда, снижения издержек, а также увеличения производства и прибыли. Согласно исследованиям, к настоящему моменту шесть из десяти промышленных предприятий в мире уже имеют разработанную программу цифровой трансформации. При этом четверть предприятий имеют горизонт программы менее 12 месяцев, в то время как большинство (61%) планируют реализовать имеющуюся программу за один-три года. Однако данные показатели в большей мере отражают уровень развития только крупнейших предприятий — лидеров отрасли.

В целях внедрения достижений цифровых технологий в цифровую трансформацию производства с использованием искусственного интеллекта с целью повышения технического уровня производств и качества выпускаемой продукции современного отечественного машиностроения, необходима разработка цифровых продуктов на основе технологий искусственного интеллекта, а также их моделей, алгоритмов и программного обеспечения.

На основе анализа применения технологий Smart Design можно сделать вывод, что стремительному развитию технологий компьютерного и супер-

компьютерного инжиниринга, компьютерных технологий оптимизации, технологий разработки новых материалов, технологий аддитивного производства, промышленного интернета, машинного обучения, больших данных и облачных вычислений, искусственного интеллекта цифровые двойники стали претендовать на ключевую роль в промышленной революции. Концепция цифрового двойника (рис. 1) предусматривается связь между физическим и цифровым миром с использованием аналитической программы и механизмов. Цифровая модель и физический объект взаимодействуют в реальном времени, обмен информацией характеризуется большими данными, которые генерируются множеством датчиков, а цифровая модель постоянно обновляется, чтобы лучше соответствовать текущему режиму работы физического объекта.

Цифровой двойник основан на технологиях искусственного интеллекта, машинного обучения и аналитического программирования. Цифровой двойник непрерывно обучается и обновляет свои параметры, получая информацию от множества сенсоров, правильно представляет состояние физического объекта. При обучении им используются текущие данные от сенсоров, от устройств управления, от внешней среды, он объединяет фактические данные со знаниями, полученными от инженеров, опытных специалистов в данной области. Цифровой двойник использует исторические данные, накопленные на предыдущих этапах.

Применение цифрового двойника, являющегося точной копией реального актива, помогает быстро найти самые эффективные режимы работы, выявить потенциальные риски, встроить новые

технологии в существующие производственные линии, сократить сроки и стоимость реализации проектов.

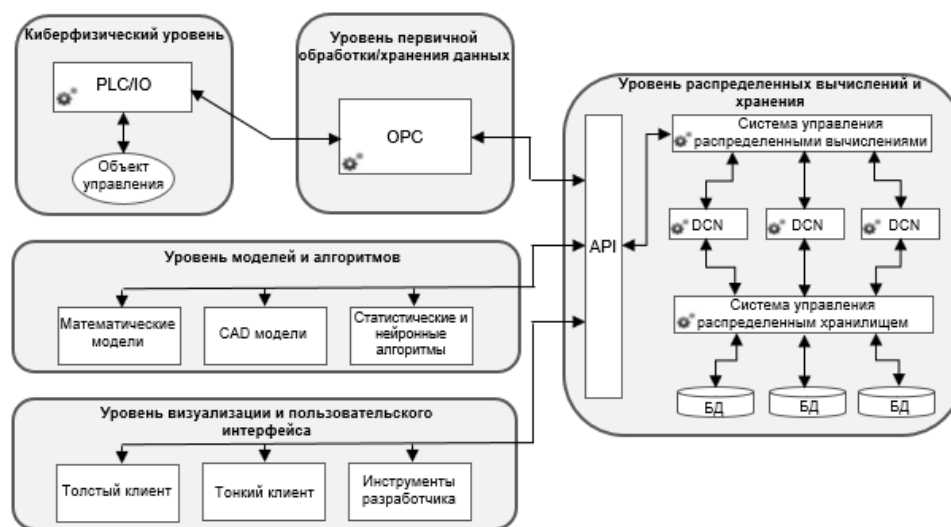


Рис 1. Структура цифрового двойника

Технология цифровых двойников может позиционироваться как самостоятельное программно-аппаратное обеспечение с соответствующим интерфейсом и инфраструктурой, так и в виде встраиваемого решения - фреймворка или набора динамических библиотек. Такой подход позволяет оперативно интегрировать "цифровые двойники" в CAM, MES, SCADA ERP, PLM системы предприятия, обеспечивая мощный эффект и переход к реализации полноценной интеллектуальной платформы управления "Цифровым" производством.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что применение технологий Smart Design при управлении технологическими системами и внедрение цифрового проектирования, в частности, цифровых двойников на предприятиях позволяет прогнозировать точность размеров деталей, геометрический профиль, износ

инструмента. Цифровой двойник предлагается рассматривать как результат объединения технологий компьютерного моделирования, как основного инструмента для разработки новой продукции и виртуального тестирования, устраняющего необходимость строительства большого количества прототипов перед началом производства и промышленного интернета вещей IoT, позволяющего использовать исполнительные устройства (датчики, контроллеры) для получения параметров технологической системы в динамических режимах.

Применение цифровых двойников при управлении технологическими процессами производства позволяет симулировать в виртуальной среде все процессы и определять необходимое количество и оптимальное расположение оборудования в зависимости от объема и номенклатуры выпускаемых изделий. При этом если цифровые двойники разрабатываются для вновь создаваемого производства, то путем

симуляции его работы можно выявить риски и недочеты, скорректировать проект. Цифровые двойники существующего производства дают возможность прорабатывать внедрение или изменение технологических процессов без вмешательства в работу реального процесса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Васильев А.Н., Тархов Д.А., Малихина Г.Ф.* Методы создания цифровых двойников на основе нейросетевого моделирования // Теоретические вопросы информатики, прикладной математики, компьютерных наук и когнитивно-информационных технологий, Том 14, № 3 (2018), стр. 521-532.
- [2] *Воронов С.А., Киселев И.А.* Комплексная математическая модель динамики пространственного фрезерования податливых сложнопрофильных деталей // Проблемы механики современных машин. 2012, Т.2, стр.
- [3] *Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М.* Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2019, №4(709), стр 11-17.
- [4] *Кабалдин Ю.Г., Д. А. Шатагин, М. С. Аносов, Кузьмишина А. М.* Разработка цифрового двойника станка с ЧПУ на основе методов машинного обучения // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 1. С. 45–55.
- [5] *Ма Вэйдун.* Разработка методики выбора рациональных параметров процесса шлифования на основе учета динамических характеристик деформируемой технологической системы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2018.
- [6] *Расторгуев Д.А., Севастьянов А.А.* Разработка цифрового двойника процесса точения на основе машинного обучения. Вектор науки ТГУ. 2021. № 1, стр 32-41.
- [7] *Селиванов С.Г., Поезжалова С.Н., Шайхулова А.Ф., Яхин А.И.* Методы проектирования цифрового производства в машиностроении.
- [8] *Соловьев В. М.* Построение диагностических экспертных систем на основе нейронных сетей // Известия Саратовского университета. 2006. Т. 6. Сер. Математика. Механика. Информатика, вып. ½, стр. 108-120.
- [9] *Jiancheng Hao, Zhaoyu Li, Xiangyu Li, Fubao Xie, Dong He and Kai Tang.* Partition-based 3 + 2-axis tool path generation for freeform surface machining using a non-spherical tool // Journal of Computational Design and Engineering, 2022, 9, 1585–1601.
- [10] *Altintas Y.* Virtual High Performance Machining // Procedia CIRP. 2016. Vol. 46. P. 372–378. DOI:10.1016/j.procir.2016.04.154

Поступила в редакцию 26.10.2022

Цитирование: Сулюкова Л.Ф., Якубжанова Д.К., Джумаев С.Н. (2022). К вопросам применения технологий Smart Design при управлении технологическими процессами и производствами. *Международный Журнал Теоретических и Прикладных Вопросов Цифровых Технологий*, 2(2), –С. 62-70.

ON THE ISSUES OF APPLICATION OF SMART DESIGN TECHNOLOGIES IN THE MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTION

Sulyukova L.F.¹ Yakubjanova D.K.², Djumaev S.N.²

¹ National Research University "TIIMSH", Tashkent, Uzbekistan

² Samarkand branch of the Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Samarkand, Uzbekistan
slf72@yandex.com, dilya55575@mail.ru; sindordjumayev@gmail.com

Abstract. *This article is of an overview nature and is devoted to the problems of research and development of scientific and methodological foundations of digital design, including technologies that ensure the implementation of the concept of advanced digital "smart" design in mechanical engineering. The driver of this process is the Digital Twin development technology. The analysis performed on the design and implementation of digital twins at enterprises showed that the methodology of 3D modeling of digital production, the creation of virtual models, the methods of simulation of digital production, allows to justify both the introduction of digital technologies and projects of digital design of technological processes and production in general. The development of digital twins is based on the analysis of data on the actual technological process using modern methods of machine learning (Machine Learning) and big data technologies (Big Data).*

Keywords: *Smart Design, digital twin, cutting tool, neural network models, digital manufacturing, mechanical engineering, design and optimization methods.*

SMART DIZAYN TEXNOLOGIYALARINI TEXNOLOGIK JARAYONLARI VA ISHLAB CHIQRISHNI BOSHQARISHDA QO‘LLANISH MASALLARI

Sulyukova L.F.¹, Yakubjanova D.K.², Djumayev S.N.²

¹ "TIIMSH" Milliy tadqiqot universiteti, Toshkent, O‘zbekiston.

² Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti Samarqand filiali, Samarqand, O‘zbekiston
slf72@yandex.com, dilya55575@mail.ru; sindordjumayev@gmail.com

Annotatsiya. *Ushbu maqola tahliliy ko‘rinishga ega bo‘lib, raqamli dizayning ilmiy-metodik asoslarini, jumladan, mashinasozlikda ilg‘or raqamli "aqlli" dizayn konsepsiyasini amalga oshirishni ta‘minlaydigan texnologiyalarni tadqiq etish va rivojlantirish muammolariga bag‘ishlangan. Bu jarayonning drayveri Digital Twin ishlab chiqish texnologiyasidir. Korxonalarda raqamli egizaklarni loyihalash va joriy etish bo‘yicha o‘tkazilgan tahlillar shuni ko‘rsatdiki, raqamli ishlab chiqarishni 3D modellashtirish metodologiyasi, virtual modellarni yaratish, raqamli ishlab chiqarishni simulyatsiya qilish usullari raqamli texnologiyalarni joriy etishni ham, loyihalarni ham asoslash imkonini beradi. Raqamli egizaklarning rivojlanishi mashinali o‘qitishning zamonaviy usullari (Machine Learning) va katta ma‘lumotlar texnologiyalari (Big Data) yordamida haqiqiy texnologik jarayon haqidagi ma‘lumotlarni tahlil qilishga asoslangan.*

Kalit so‘zlar: *Smart Design, raqamli egizak, kesish vositasi, neyron tarmoq modellari, raqamli ishlab chiqarish, mashinasozlik, dizayn va optimallashtirish usullari.*