

УДК 62 1.9.-52

Оптимизация маршрута многопереходной обработки поверхности

Кравченко И. И.^{1,*}

[*kriig@yandex.ru](mailto:kriig@yandex.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

При механической обработке поверхности за несколько переходов в силу технологической наследственности состояние каждого предшествующего перехода существенно влияет на ожидаемое состояние последующего. Поэтому различные варианты выполнения последующего перехода могут рассматриваться только после того, как выбраны определенные параметры предшествующего. Для нахождения оптимального количества переходов и их параметров разработана математическая модель на основе метода динамического программирования и принципа Беллмана. Модель позволяет уменьшить штучное время выполнения операции уменьшить себестоимость обработки и повысить производительность оборудования.

Ключевые слова: металлорежущие станки, технологическая система, переходы обработки поверхности, математическая модель, принцип Беллмана, оптимизация, штучное время

Технологические процессы характеризуются большим количеством элементов, сложными и разнообразными связями между ними. Традиционные методы анализа таких объектов не позволяют строить модели и описывать такие важные их характеристики, как функция, многоуровневая организация и структура общих свойств объектов и процессов. Это приводит к необоснованному увеличению временных и материальных затрат на технологическую подготовку производства и, соответственно, к снижению эффективности технологического проектирования [1]. В работе, в составе одной операции, рассматривается распределение припуска при лезвийной обработке поверхности на определенное количество переходов. При заданном минимальном табличном припуске, необходимо установить сколько переходов и с какими режимами необходимо их выполнять, чтобы обеспечить заданную точность и качество поверхности. В справочной литературе и статьях по распределению припуска при многопереходной обработке поверхности имеется достаточно рекомендаций и табличных данных на выполняемый переход, но в основном это нормативные материалы, которые не учитывают конкретное состояние технологической системы [2]. В частности, в работе [3] рассматривается задача построения планов обработки элементарных поверхностей заданного качества на основе применения методов дискретной математики, теории нечетких множеств и имитационного моделирования, где в качестве целевой функции предложена вероятностная оценка «надежности» плана обработки,

базирующейся на «дискретно-событийной имитационной модели процесса формирования точности и качества». В целом работа посвящена вопросам совершенствования информационных и математических средств проектирующей подсистемы САПР ТП. Применение таких «мощных» математических средств затруднительно в силу существенной неоднозначности и определенной неполноты информационных массивов, применяемых в технологическом проектировании. В работе не ясно как формируется план обработки поверхности, и тем более оптимальный, без расчёта режимов резания.

Целью представляемой работы является прогнозирование заданной точности и качества поверхности при оптимальном количестве выполняемых переходов обработки и их режимов. В основу работы положен расчетно-аналитический метод ожидаемой точности обработки [4]. На этапе проектирования маршрута обработки поверхностей *априори* известны: 1) параметры точности и шероховатости поверхностей детали, 2) допуски и размеры заготовки, 3) припуск на обработку поверхности, 4) конкретное оборудование и его технические характеристики, 5) определен метод обработки, 6) режущий инструмент, 7) схема базирования заготовки и др. (т.е. известно ожидаемое «состояние» технологической системы и пределы достижимых возможностей метода обработки), 8) технолог – программист располагает: аналитическими зависимостями расчета достижимой точности на каждом выполняемом переходе, алгоритмом и программой решения задачи [6].

При механической обработке поверхности за несколько переходов в силу технологической наследственности состояние каждого предшествующего перехода существенно влияет на ожидаемое состояние последующего. Поэтому различные варианты выполнения последующего перехода могут рассматриваться только после того, как выбраны определенные параметры предшествующего.

На каждый выполняемый переход при известном материале режущей части инструмента назначаются скорости резания по стойкостным зависимостям $V-T$ (T – стойкость режущего инструмента), а подачи S из массива $A^{(s)} = \{s_{max}, \dots, s_k, \dots, s_{min}\}$, который представляет собой дискретный ряд чисел, характеризующий кинематику механизма подачи станка. Задачу можно сформулировать следующим образом: при известном состоянии технологической системы, скоростей резания и массива подач рассчитать оптимальное количество переходов обработки поверхности, их параметры с наименьшими затратами выполнения операции при обеспечении параметров точности и качества.

Нахождение наилучшего варианта технологического процесса обработки поверхности можно вести по графу, используя метод направленного поиска [1]. Вершины такого графа соответствуют некоторому показателю качества детали (например, точности размера), а ребра, соединяющие две вершины, – определенным параметрам технологического i -го перехода (например, режимам резания – глубине t_i и подаче s_i).

Среди определенного множества цепей графа, построенного для конкретного случая обработки, необходимо отыскать цепь, удовлетворяющую ограничениям и дающую минимальное значение целевой функции.

При решении задач оптимизации в качестве целевых функций можно использовать заданную производительность процесса, минимальные затраты на изготовление. Критерий производительности обычно охватывает только технологическую производительность

$$Q_{\text{тех}} = \frac{1}{t_o} \rightarrow \min,$$

где t_o – основное время на переход, операцию и т.д.

Минимальные затраты на выполнение перехода, операции, технологического процесса являются, как правило, основным экономическим критерием, который называют стоимостной целевой функцией. Себестоимость выполнения переходов одной поверхности $C = \sum_{i=1}^p C_{\text{пер } i}$, где $C_{\text{пер } i}$ – технологическая себестоимость i -го перехода, p – число переходов.

$$(1) \quad \left. \begin{array}{l} N_{\text{рез}} \leq N_{\text{эл } \Pi} \\ P_z \leq P_{\text{доп.ин}} \\ T \geq T_{\text{зад}} \\ P_y \leq P_{y, \text{доп}} \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} \Delta_{\Sigma i} \leq T_{\text{дет}} \\ \Delta_{\Phi i} \leq \Delta_{\Phi \text{ дет}} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} s_k \leq [s_{R_z}] \\ s_k \leq [s_{R_a}] \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} n_i \in \{n_{\min}, n_{\max}\} \\ s_k \in \{s_{\min}, s_{\max}\} \end{array} \right\}$$

$$C = \sum_{i=1}^p C_{\text{пер } i} \rightarrow \min.$$

Условия (1) используют на черновых переходах, каждое из них должно удовлетворять следующим ограничениям: по мощности, расходуемой на резание $N_{\text{рез}}$ с учетом мощности привода $N_{\text{эл } \Pi}$, допустимой нагрузке на инструмент $P_{\text{доп.ин}}$ при действии тангенциальной силы резания P_z , заданной стойкости инструмента $T_{\text{зад}}$, допустимой радиальной силе резания $P_{y, \text{доп}}$. На завершающем переходе необходимо обеспечить допуск на размер $T_{\text{дет}}$, допускаемое отклонение формы обрабатываемой поверхности $\Delta_{\Phi \text{ дет}}$, высоту микронеровностей профиля R_z или среднее арифметическое отклонение R_a . Последние параметры качества обеспечиваются соответствующей подачей s_k , не превышающей значений подач s_{R_z} и s_{R_a} .

Направленный поиск предусматривает минимизацию числа переходов, что дает возможность сократить число цепей графа. Однако и при этом количество вариантов остается достаточно большим. Такой подход при большом числе обрабатываемых поверхностей приводит к значительному объему вычислений, кроме того, получение глобального экстремума целевой функции не всегда гарантируется [1,7].

Изучение основных положений теории исследования операций показало, что для решения данной задачи целесообразно применить метод динамического программирования. Динамическое программирование в этом случае выступает как некоторый оптимальный метод перебора вариантов. Для решения задачи нами был применен метод динамиче-

ского программирования, который впервые был разработан Р. Беллманом. Содержание принципа оптимальности Р. Беллмана: *«Каково бы ни было состояние S системы в результате какого-либо числа шагов, на ближайшем шаге нужно выбирать управление так, чтобы оно в совокупности с оптимальным управлением на всех последующих шагах приводило к оптимальному выигрышу на всех оставшихся шагах, включая данный»*. Беллманом четко были сформулированы условия, при которых принцип верен. Основное требование – процесс управления должен быть без обратной связи, т.е. управление на данном шаге не должно оказывать влияния на предшествующие шаги. Принцип оптимальности утверждает, что для любого процесса без обратной связи оптимальное управление таково, что оно является оптимальным для любого подпроцесса по отношению к исходному состоянию этого подпроцесса. Поэтому решение на каждом шаге оказывается наилучшим с точки зрения управления в целом [8].

При оптимальном управлении математической моделью по критерию суммарная технологическая себестоимость $\sum C_{i \min}$, обеспечивая при этом заданные точность и качество поверхности, получим функцию аддитивного типа (сумма простых сумм $C_{i \min}$), т.е., многошаговый процесс строится таким образом, чтобы при планировании каждого шага учитывался выигрыш, получаемый не только на данном этапе, а весь выигрыш, получаемый по окончании всего процесса [6,8].

Представим условия решения поставленной задачи: для конкретного метода обработки генерируется множество вариантов, образующее область допустимых решений, в которой необходимо найти наилучшее из всех возможных.

Методика поиска наилучшего варианта технологического процесса обработки поверхности предусматривает дифференциацию заданного общего минимального припуска $Z_{o \min}$ на N уровней. Величина припуска на первом уровне (нумерация уровней устанавливается от поверхности детали) равна $l_1^Z = t_{\min}$, где $t_{\min}$ — наименьшая глубина резания, допускаемая процессом обработки. Величина второго уровня равна $l_2^Z = t_{\min} + \gamma$, третьего — $l_3^Z = t_{\min} + 2\gamma$ и т.д. Величина уровня с номером m равна $l_m^Z = t_{\min} + (m - 1)\gamma$. Шаг γ определяется кинематической возможностью станка перемещать режущий инструмент или заготовку на заданный настроечный размер.

Предположим, что заготовка в процессе обработки может иметь ряд значений промежуточных технологических допусков $T_{\text{заг}}, \dots, T_i, \dots, T_{\text{дет}}$. Выбор оптимального варианта проводится от первого уровня в порядке возрастания его номера. Первый уровень соответствует заключительному переходу обработки поверхности, и при его назначении необходимо знать параметры предыдущего перехода. Располагая зависимостью суммарной погрешности обработки от технологических факторов $\Delta_{\Sigma i} = f(t, s, v)$ для конкретного метода механической обработки резанием и зная параметры планируемого перехода, можно рассчитать ожидаемую погрешность [4]. Не имея данных о предшествующем переходе, делают различные предположения о том, какая погрешность обработки может иметь место после его выполнения. Следуя принципу оптимальности динамического программирования, для каждого из этих предположений (т. е. для каждого возможного начального

допуска на первом уровне) необходимо выбрать такие переменные, чтобы на заключительном переходе получить оптимальное решение и этот принцип сохраняется при выборе оптимального варианта на каждом уровне. Основные шаги, необходимые для просчета варианта обработки каждого уровня, представлены в виде графа и блок – схемы алгоритма на рис. 1, 2.



Рис. 1. Граф нахождения оптимального маршрута многопереходной обработки поверхности

Просчет вариантов первого и любого уровня при однопереходной обработке отличается от общей схемы некоторыми особенностями, хотя последовательность выполнения шагов и вид рекуррентных формул остаются одинаковыми. Так, на уровне с номером m при однопереходной обработке фактическая глубина резания $t_{\text{факт}} = \alpha t_m$. Коэффициент α зависит от параметров технологической системы и от $T_{m,i}$, где $T_{m,i}$ – один из возможных начальных допусков (на поверхность) уровня m . Подача в этом случае должна удовлетворять ограничению, связанному с шероховатостью поверхности детали:

$$s_{m,k} \leq [S_{Rz}(Ra)].$$

Если суммарная погрешность обработки Δ_Σ при выбранных параметрах меньше (равна) $T_{\text{дет}}$, то для этого варианта вычисляется значение целевой функции $g_m(t_m; T_{m,i}; s_{m,k})$. Найдя $C_m(T_{m,i}) = \min\{g_m(t_m; T_{m,i}; s_{m,k})\}$, где минимум берется по всем подачам из массива $A^{(s)}$, не превосходящим $[S_{Rz}(Ra)]$, определяют оптимальный вариант обработки уровня с номером m при начальном допуске $T_{m,i}$.

В случае многопереходной обработки число вариантов для сравнения по технологической себестоимости определяется лишь параметрами первого (от заготовки) перехода. Для этого предусматривают несколько шагов (см. рис.2).

Шаг 1. Глубина резания на первом переходе равна $t_r = \gamma q$, где q выбирается из множества $\{1, 2, \dots, (r-1)\}$, причем перебор начинается с наибольшего значения q . Если в это

множество добавить значение $q = (r-1) + \frac{t_{min}}{\gamma}$, то будет проверяться и вариант однопереходной обработки этапа с номером r .

Шаг 2. Выбрав значение q , находят $t_{фак.r} = \alpha t_r = \alpha(\gamma q)$ и разность $(t_r - t_{фак.r})$, которая показывает величину оставшейся части уровня с номером r после первого. Поскольку $(l_r - t_{фак.r}) < l_r$, то величина $(l_r - t_{фак.r})$ соответствует уровню с меньшим u ($u < r$), для которого оптимальный вариант обработки уже имеется. Значит, известны и глубина резания на первом переходе этапа с номером u и множество $A_u^{(T)}$. Выбранная глубина резания на первом переходе уровня с номером r должна быть больше глубины резания на первом переходе уровня с номером u . Если же $\gamma q < t_u$, то возвращаются к шагу 1 и выбирают значение q .

Шаг 3. Выбор подачи на этапе с номером r проводится так же, как и в случае однопереходной обработки, но если $q = (r-1) + \frac{t_{min}}{\gamma}$, то величина подачи определяется ограничениями по мощности, расходуемой на резание, прочности материала режущей части инструмента и другими ограничениями (1).

Шаг 4. В зависимости от начального допуска $t_{r,i}$ на уровне с номером r , выбранных технологических параметров первого перехода (шаг 1, шаг 3) рассчитывается суммарная погрешность обработки после первого перехода $\Delta_{\Sigma i}$. Если же $\Delta_{\Sigma} \in A_u^{(T)}$, то возвращаются к шагу 3, проверяя все значения подачи из массива A^s , удовлетворяющие ограничениям. Если для всех возможных значений подачи из массива A^s суммарная погрешность $\neq \Delta_{\Sigma i} \in A_u^{(T)}$, то возвращаются к шагу 1.

Шаг 5. Значения целевой функции C_r ($T_{r,i}$) после выбора параметров первого перехода вычисляются по формуле

$$g_r[(1 - T_i)l_r + T_i\gamma q; T_{r,i}; s_r] + T_i C_u(T_{u,i}),$$

где $T_i = \begin{cases} 0, & \text{если } q = u - 1 + \frac{t_{min}}{\gamma}; \\ 1 - & \text{в противном случае;} \end{cases}$

$C_u(T_{u,i})$ – уже имеющееся оптимальное значение целевой функции для этапа с номером u при начальном допуске $T_{u,i} = \Delta_{\Sigma}$.

Шаг 6. Начальный допуск $T_{r,i}$, для которого вычислено значение C_r ($T_{r,i}$) вносится в множество $A_r^{(T)}$.

После этих шагов находят минимум значений целевой функции по всем возможным значениям глубин резания и подач:

$$C_r(T_{r,i}) = \min \{g[(1 - T)l_r + T\gamma q; T_{t,i}, s_{r,k}] + T_i C_u(T_{u,i})\}.$$

Расчет по предложенной схеме повторяется до выполнения условия $T_{r,i} = T_{\text{заг}}$. Из множества сформированных вариантов выбирается один с минимальной суммарной технологической себестоимостью обработки (см. рис. 1) с указанием глубин, подач и скоростей резания по переходам.

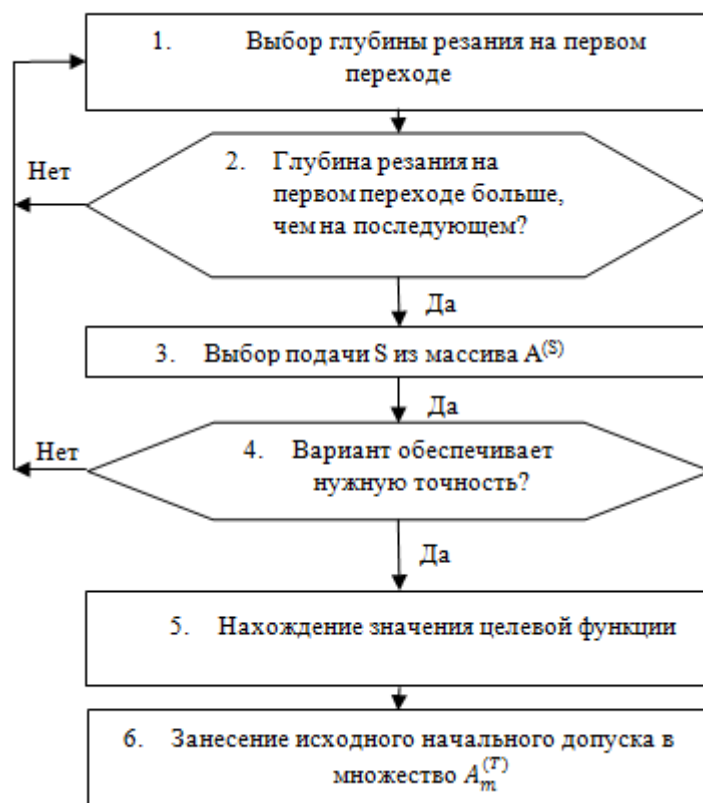


Рис. 2. Увеличенная блок-схема для нахождения оптимального варианта маршрута обработки поверхности

Рассмотренный метод нахождения оптимального маршрута обработки поверхности позволяет сократить объем вычислений по сравнению с методом направленного поиска и гарантировать глобальный экстремум целевой функции. По предложенной методике разработаны рабочий алгоритм и программа на языке Visual Basic. Модель позволяет, варьируя состоянием технологической системы (метод обработки, оборудование, режущий инструмент и др.), выбрать те ее параметры, которые определяют по критериям себестоимости и производительности оптимальный вариант обработки.

Заключение

1. Математическая модель маршрута многопереходной обработки поверхности, построенная на принципе оптимальности Беллмана, на каждом шаге итерации позволяет дифференцированно учитывать параметры технологической системы, которые в зависимости от метода обработки могут быть переменными.
2. Модель позволяет определить оптимальное количество переходов и их параметры (t , s , v) без применения нормативной базы распределения припуска по переходам

обработки, которая назначает завышенные их значения и без указания режимов резания.

3. Метод оптимальности, положенный в основу модели, позволяет уменьшить штучное время выполнения операции и минимизировать себестоимость ее выполнения.
4. Математическая модель может быть интегрирована как в информационно согласованную подсистему, так и представлять отдельный модуль в автоматизированной системе технологической подготовки производства, что позволяет получить законченный и оптимальный результат проектирования [9].

Список литературы

1. Зарубин В.М., Капустин Н.М., Павлов В.В., Старовойтов Г.П., Цветков В.Д. Автоматизированная система проектирования технологических процессов механосборочного производства / под ред. Н.М. Капустина. М.: Машиностроение, 1979. 247 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 944 с.
3. Чигиринский Ю.Л. Обеспечение точности и качества поверхностей при многопереходной механической обработке на основе совершенствования информационных и математических средств проектирующей подсистемы САПР ТП: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Саратов, 2014. 32 с.
4. Бурцев В.М., Васильев А.С., Гемба И.Н. и др. Технология машиностроения: учеб. для вузов. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.И. Кондакова. 3-е изд., испр. и перераб. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 478 с.
5. Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.М., Кондаков А.И. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / под ред. А.И. Кондакова. М.: Машиностроение, 2005. 352 с.
6. Капустин Н.М., Кравченко И.И., Загоруйко Е.А. Оптимизация распределения припуска на обработку поверхности детали // Известия вузов. Машиностроение. 1978. № 6.
7. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций: пер. с англ. М.: Мир, 1971. 540 с.
8. Беллман Р. Применение динамического программирования к задаче о коммивояжере: пер. с англ. // Кибернетический сборник: сб. ст. Т. 9. М.: Мир, 1964. С. 219-228.
9. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 360 с.

Route Optimization of Multi-staged Surface Treatment

I.I. Kravchenko^{1,*}

^{*}kriig@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: machine tools, technological system, technological transition, surface treatment, mathematical model, Bellman principle, optimization, piece time

Development of mathematical models based on the system approach to production facilities and technological processes becomes of great importance for further development of design theory and methods. Inherently, a process operation is one of the main components of the technological process, and in multi-staged machining a piece-time of its execution is directly related to the number and parameters of transitions to be performed. The optimum number of running transitions of the process (the best route) should be considered from the standpoint of reducing piece-time operation and, consequently, improving machine capacity, with ensuring the accuracy and quality of machined surfaces. When designing an optimal variant of the multi-staged surface treatment the challenge is to define the selection mechanism of different options as well as the rules and the workflow to find the best of them. The set of possible variants forms a feasible region in which the best one for specific conditions should be found. At the design stage of the surface treatment route the state of technological system, implementing machine operation, is a priori known as an element of the technological process and when machining the surface for several cutting passes, following the theory of technological heredity, the state of each preceding cutting pass significantly affects the expected condition of the subsequent one. To solve this problem it is expedient to apply the method of dynamic programming. Dynamic programming in this case is represented as an optimal method of generating variants to start forming from a part to a work-piece. The proposed method of finding the best route of surface treatment allows to reduce the amount of computation in comparison with the guided search method and to guarantee a global extremum of the objective function.

References

1. Zarubin V.M., Kapustin N.M., Pavlov V.V., Starovoitov G.P., Tsvetkov V.D.
Avtomatizirovannaya sistema proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanosborochnogo proizvodstva [Automated system of design technological processes of

- mechanical assembly production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 247 p. (in Russian).
2. Dal'skii A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya. V 2 t. T. 1* [Handbook for Technologist and Machine Engineer. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 944 p. (in Russian).
 3. Chigirinskii Yu.L. *Obespechenie tochnosti i kachestva poverkhnostei pri mnogoperekhodnoi mekhanicheskoi obrabotke na osnove sovershenstvovaniya informatsionnykh i matematicheskikh sredstv proektiruyushchei podsystemy SAPR TP. Avtoreferat dokt. diss.* [Ensuring of accuracy and quality of surfaces during multijunction mechanical processing based on improvement of information and mathematical means projecting subsystem SAPR TP. Abstract of dr. diss.]. Saratov, 2014. 32 p. (in Russian).
 4. Burtsev V.M., Vasil'ev A.S., Gemba I.N., et al. *Tekhnologiya mashinostroeniya: ucheb. dlya vuzov. V 2 t. T. 1* [Mechanical engineering technology: textbook for high schools. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 478 p. (in Russian).
 5. Vasil'ev A.S., Dal'skii A.M., Zolotarevskii Yu.M., Kondakov A.I. *Napravlennoe formirovanie svoystv izdelii mashinostroeniya* [Directed formation properties of engineering products]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 352 p. (in Russian).
 6. Kapustin N.M., Kravchenko I.I., Zagoruiko E.A. Optimization of distribution allowance for processing of detail surface. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1978, no. 6. (in Russian).
 7. Ackoff R.L., Sasieni M.W. *Fundamentals of operations research*. New York, Wiley, 1968. 455 p. (Russ. ed.: Ackoff R.L., Sasieni M.W. *Osnovy issledovaniya operatsii*. Moscow, Mir Publ., 1971. 540 p.).
 8. Bellman R. Dynamic Programming Treatment of the Travelling Salesman Problem. *Journal of the ACM (JACM)*, 1962, vol. 9, iss. 1, pp. 61-63. DOI: [10.1145/321105.321111](https://doi.org/10.1145/321105.321111)
 9. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Fundamentals of CAD]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 360 p. (in Russian).