

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ ФРЕЗЕРНОГО ТРАНШЕЕКОПАТЕЛЯ, МИНИМИЗИРУЮЩИХ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ НАГРУЖЕНИЯ ПРИВОДА РАБОЧЕГО ОРГАНА (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ)

Из теории и практики машин для земляных работ известно [1], что для фрезерного траншеекопателя, работающего в установленном основном режиме управления (т.е. при постоянно настроенных оператором заглублении рабочего органа (РО), частоте его вращения, скорости перемещения ходовой базы), колебания реактивных сопротивлений на его РО однозначно трактуется как негативное явление, следствием чего являются:

- неравномерность нагружения привода;
- появление вибраций;
- снижение срока службы из-за усталостного характера повреждений и др.

Аналогично этот аспект рассматривается разработчиками прочих фрезерных машин и оборудования, используемых в дорожном строительстве, горном деле, металлообработке, и других областях промышленности.

В связи с этим актуально справедливо считается синтез такой конструкции, в данном случае - траншеекопателя, который при работе в основном режиме обеспечил бы минимальную неравномерность нагружения привода фрезерного РО (цепного, дискового, комбинированного и др.) [2, 3]. Такая задача относится к разряду оптимизационных, а практика ее постановки и решения подразумевает комплексный учет в целевой функции группы факторов, отражающих закономерности формирования нагрузки на РО в связи с конструктивными особенностями машины и условиями ее эксплуатации.

Несмотря на объектно ориентированный подход в исследованиях, различными учеными, в числе которых Абезгауз В.Д., Владимиров В.М., Беляков Ю.И., Захаров В.А., Дубровский Б.Ц. и др., в совокупности идентифицированы общие для фрезерных машин первопричины, вызывающие рассматриваемое негативное явление:

- рельеф местности;
- податливость элементов машины (в большей степени - ходовой базы);
- неравномерность физико-механических характеристик разрушаемой среды в забое;
- стохастический характер суммирования пространственно ориентированных реакций на резцах РО;
- расположение резцов на РО;
- копание траншей различной глубины (реализуемое оператором за счет навески), следствием чего является сравнительное отличие самой картины нагружения РО.

Тем не менее, их анализ позволяет отметить, что первые две причины являются более частными, т.к. для гладкого рельефа и гусеничного хода они не существенны, а для колесного – хорошо известны эффективные средства их минимизации, как то: предварительное планирование трассы, выбор базового трактора с большим диаметром колес, повышение их жесткости, демпфирование и др.

Следуя этой логике, задачу синтеза параметров траншеекопателя по критерию минимума неравномерности нагружения привода РО следует разбить на два этапа, учитывающих соответственно:

- последние четыре фактора, что само по себе приемлемо для машин с гусеничной ходовой базой, работающих в условиях “гладкого” рельефа, близкого к плоскому;
- позиционные поправки, связанные с рельефом местности и податливостью ходовой базы, в виде коррекции решения, полученного по первому этапу.



Данная статья посвящена первому этапу синтеза траншеекопателя-кабелеукладчика с пальцефрезерным РО, предназначенного для разработки как мерзлых, так и не мерзлых грунтов.

Рассмотрим с этой точки зрения, пожалуй, единственную известную задачу, попадающую в рамки первого этапа, - синтез РО с траекторным смещением резцов. Учитывая общеметодические рекомендации по выбору критерия качества для решения задач статистической динамики [4], а так же интерпретируя исследования [3, 5], в том числе - автора [6], можно обоснованно считать, что в существующих постановках задача о траекторном смещении резцов с целью снижения неравномерности нагружения привода фрезерного РО, так или иначе, сводится к виду:

$$\min \{k(D) = \frac{\sigma_M}{\bar{M}_R} \mid D \in R^n, t = (\overline{0; T})\}, \quad (1)$$

$$R^n = \{D = D_{PO} = (z_p, \Delta\varphi, \Delta L, n_{зах} \dots) \mid \{C\}, V\}, \quad (2)$$

$$(H_{TP}(t) = const) \in \{C\}. \quad (3)$$

В этих формулах, обобщающих, по мнению автора, известные исследования, приняты следующие обозначения: k - критерий оптимизации (сформулированный как коэффициент вариации); D - вектор искомых параметров (в данном случае - только РО, т.е. - D_{PO}); σ_M , \bar{M}_R - среднеквадратичное отклонение и матожидание реактивного момента на РО (соответственно); R^n - n -мерное пространство оптимизации, определяемое по размерности вектора D ; t - мгновенное значение времени; T - общая продолжительность наблюдения за поведением нагрузки на РО, которое моделируется в задаче синтеза; z_p , $\Delta\varphi$, ΔL - количество резцов, их угловое или линейное смещение относительно друг друга (соответственно); $n_{зах}$ - количество заходов фрезы; $\{C\}$ - множество ограничений, накладываемых на R^n ; V - внешние возмущения, отражающие неравномерность в забое физико-механических характеристик грунта анизотропного (например - мерзлого) по сравнению с изотропным; H_{TP} - глубина разработки грунта РО.

Рассмотрим особенности такой постановки.

Внешние возмущения переведены в разряд ограничений задачи и отражают, как правило, принципиально только одни грунтовые условия из множества возможных. В постановке одних авторов из-за недостатков матмодели считается, что $V = 0$ [5, 6], других - $V = const$ [3]. Последний случай может быть оправдан, пожалуй только тогда, когда характеристики забоя близки к неизменным за все время эксплуатации машины (как, например, для роторных комплексов, работающих в конкретном карьере).

Выражение (3), выступающее в роли функционального ограничения равенства, необходимо вводится в задачу из-за:

- критерия качества, который может быть определен только для одной конкретной реализации условия (3) (в первую очередь);
- рассмотрения основного режима копания (без управления навеской);
- принятых ограничений на позиционные поправки в связи с рельефом местности и податливостью ходовой базы.

В связи с этим задача снижения неравномерности нагружения привода РО траншеекопателя, предназначенного для работы в мерзлых грунтах, которая ограничена синтезом РО с траекторным смещением резцов (в форме (1)..(3)), в традиционном представлении не затрагивает и не может затронуть два естественных для траншеекопателя фактора:

- вариативность внешних возмущений, связанных с неодинаковыми грунтовыми условиями на различных участках трассы, а именно - типов грунта в забое, их температурных и влажностных полей в различное время года;
- необходимость копания траншей различной глубины.

Для траншеекопателей-кабелеукладчиков с последним фактором связаны следующие аспекты:

- глубина траншеи, образуемая машиной в основном режиме, как правило, за один проход, принадлежит нормированному диапазону, границы которого регламентированы государственными и отраслевыми документами на прокладку линий коммуникаций различного назначения (магистральные - большая глубина, локальные - меньшая), что может рассматриваться как ограничение задачи синтеза;
- у пальцевфрезерных траншеекопателей-кабелеукладчиков ввиду конструктивного многообразия их навесок достижение той или иной глубины копания РО (т.е. результат его управления) осуществляется по разному - за счет тех или иных исполнительных механизмов - ресурсов управления (см. рис. 1), следствием чего является различное позиционирование РО в забое [7, 8]. Вопрос о том, в какой мере это влияет на неравномерность его нагружения не получил освящения в литературе.

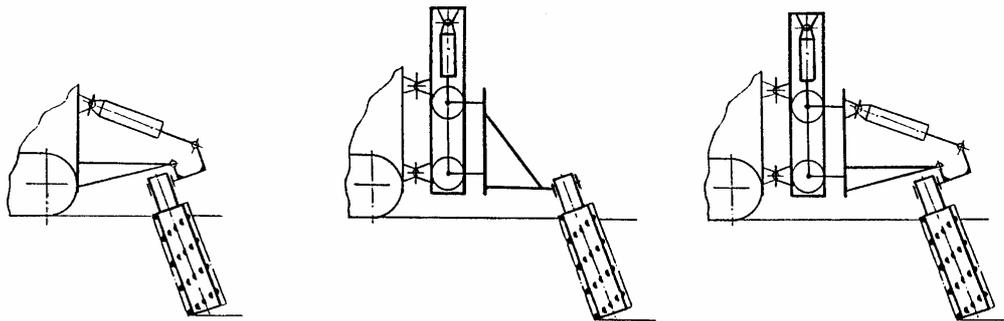


Рис. 1. Принципиальное отличие навесок по ресурсам управления, используемых для настройки глубины копания

Проведенный анализ позволяет сформулировать основную идею синтеза первого этапа в форме оптимизации. Необходимо создать такую конструкцию навески и РО траншеекопателя, чтобы был минимизирован некоторый интегральный критерий, оценивающий неравномерность нагружения привода РО при копании траншеи различной глубины в пределах нормированного диапазона на различных грунтовых массивах, характеризующих назначение машины.

С учетом сказанного задача синтеза 1-го этапа приобретает следующий вид:

$$\min \left\{ K_j(D) = \sum_{q=1}^{\lambda} \left(\sum_{i=1}^m \frac{\sigma_M}{M_R} \right) \mid D \in R^n, t = (\overline{0; T}) \right\}, \quad (4)$$

$$R^n = \{D = (D_{PO}, U_H, D_H) \mid \{C\}, \{V_q\}\}, \quad (5)$$

$$\left([H_{TP}^{\min}] \leq H_{TPi} \leq [H_{TP}^{\max}] \right) \in \{C\}, i = (\overline{1; m}), \quad (6)$$

$$U_H = (U_{Hj}). \quad (7)$$

В этих формулах приняты следующие обозначения: K - критерий оценки, идентифицируемый как накопленный коэффициент вариации; D_{PO}, U_H, D_M - суть матрицы параметров РО, ресурсов управления и параметров навески (соответственно), определяющих вектор искомым параметров; $\{V\}$ - конечное множество внешних возмущений - суть полигон грунтов в забое (в общем случае - анизотропных); $[H_{TP}^{\min}], [H_{TP}^{\max}]$ - нижняя и верхняя границы (соответственно) нормированного диапазона глубины отрываемой траншеи по условиям прокладки коммуникаций; i, m - порядковый номер итерации, изменяющей глубину траншеи, и их общее количество (соответственно); q, λ - порядковый номер возмущения и их общее количество (соответственно); j - порядковый номер навески, отличающейся комбинацией ресурсов управления.

Процедуру изменения отрываемой траншеи в (6) определим как итеративную в виде:



$$H_{TP} = [H_{TP}^{\min}] + i \cdot \Delta H, \quad i = (\overline{1; m}), \quad (8)$$

$$m = \frac{[H_{TP}^{\max}] - [H_{TP}^{\min}]}{\Delta H}, \quad (9)$$

где ΔH - шаг квантования глубины.

Анализируя поставленную задачу легко определить, что ее решение затруднено из-за:

- самой целевой функции, подразумевающей необходимость получения в каждой итерации графика или функции изменения во времени реактивного момента на РО (тем или иным способом) и последующей обработки полученной информации средствами матстатистики;
- большого количества итераций, что связано, как минимум, с необходимостью различных комбинаций грунтов в забое, значений глубины отрываемой траншеи и конструкций навесок, принципиально отличных по ресурсам управления;
- размерности вектора оптимизации, который включает как параметры самого РО, так и навесок.

В связи с этим решение поставленной задачи практически невозможно:

- графоаналитическим методом, как в [3], из-за большого объема построений, необходимых для получения графика изменения реактивного момента на РО в координате угла его поворота (в каждой итерации) и последующей обработки информации методами матстатистики;
- чисто аналитическими методами, т.к. сама функция реактивного момента на РО является изначально неаналитической (недифференцируемой) из-за дискретности расположения резцов на фрезе, кусочно-непрерывного характера изменения сопротивлений резанию на резцах, иначе говоря - из-за разрывов первого рода.

Сомнительно, что такую задачу можно оперативно решить (по крайней мере - силами одного исследователя) экспериментально-теоретическими методами статистической динамики из-за необходимости использования корреляционного анализа для учета в реактивной нагрузке РО неоднородности разрушаемого грунта, большого количества прочих опытных данных в виде поправочных коэффициентов [9] и др. недостатков. Фактически эти методы требуют предварительного создания натуральных образцов и их испытаний.

Альтернативной, по мнению автора, является имитационное моделирование, преимущества которого изложены в [7].

Анализируя (4)...(7) легко понять, что для получения значения критерия качества необходимо:

- имитационную модель траншекопателя с одним из альтернативных вариантов РО и навески “прогнать” на ЭВМ по полигону при различной глубине траншеи;
- в отдельном программном блоке накопить информацию о нагруженности РО и обработать ее стандартными методами матстатистики.

Процедура обращения к компьютерной модели и получение из нее значения критерия качества (в терминах программирования - возврат значения функции) является характерной чертой прямых методов поиска оптимального решения, которые отличаются простотой алгоритма и наглядностью. Как показывает практика [3], вычислительные возможности современных ЭВМ позволяют использовать принципиально любой из них (случайного поиска, Бокса, покоординатного спуска, комбинированные) для оптимизационных задач большой размерности со сложной целевой функцией, как в настоящей.

Тем не менее, решение поставленной задачи с методической точки зрения осложняется, по крайней мере, тем фактором, что в традиционном понимании первоначально необходимо создать имитационные модели для каждой навески,

принципиально отличающейся от других ресурсами управления глубиной погружения РО. Такая методика, как минимум, лишает исследователя оперативности.

В качестве альтернативы предлагается предварительно выполнить следующие этапы:

- произвести обзор известных конструкций траншекопателей и с учетом решаемой задачи систематизировать технические решения по отличительным (принципиальным) особенностям;
- идентифицировать признаки новизны;
- выбрать из существующих или синтезировать конструкцию, включающую все идентификационные признаки (в работе автора [7] она названа “эталон”, т.к. остальные альтернативные варианты, как с конструктивной, так и с математической точки зрения, являются ее упрощениями – “прототипами”);
- создать обобщенную имитационную модель “эталона” и на ее основе связать критерий качества с параметрами конструктивных элементов.

Применительно к пальцефрезерным траншекопателям, указанные этапы раскрыты автором в [7, 8, 10].

Из содержания поставленной задачи, сформулированной в виде (4)...(7), логически вытекают последующие этапы методики ее решения:

- определить вектор параметров оптимизации;
- исходя из специфики решаемой задачи, анализа литературы и существующих конструкций траншекопателей, сформулировать и аналитически описать совокупность ограничений, накладываемых на вектор параметров оптимизации;
- определить геометрические параметры навески, фрезы и соотношение между ними, удовлетворяющие ограничениям без учета критерия качества (задача безкритериального синтеза);
- выделить из бесконечного множества возможных анизотропных грунтов в забое представительный полигон, характерный для работы траншекопателя-кабелеукладчика с пальцефрезерным РО;
- аналитически описать форму учета анизотропности грунта в реактивной нагрузке на РО;
- на основе результатов безкритериального синтеза определить оптимальные параметры навески и фрезы, минимизирующие неравномерность нагружения привода РО (задача критериального синтеза).

Здесь следует отметить, что принципиальная двухэтапность синтеза позволяет привлекать и соответствующие этапам ограничения.

В целом новизна формулировки задачи снижения неравномерности нагружения привода РО определяется совокупностью следующих факторов:

- наличием в векторе оптимизации параметров как самого РО, так и навески;
- системной постановкой в плане учета множества принципиально отличных по ресурсам управления навесок и полигона анизотропных грунтов, на котором отыскивается решение;
- новым критерием оптимизации поставленной задачи, формализованным через накопление информации о динамичности нагружения привода РО, связанной с изменением глубины копания траншеи, конструкций РО и навески, грунтовых условий.

По сравнению с известными работами в совокупности перечисленные факторы существенно расширяют поле поиска оптимального решения и в большей степени отражают реальные условия эксплуатации траншекопателей (в данном случае - пальцефрезерных).

Предложенную методику решения поставленной задачи отличают следующие преимущества:



- позволяет ускорять решение за счет создания и использования не нескольких, а одной обобщенной имитационной модели, которая поглощает принципиальные отличия навесок траншеекопателя по ресурсам управления и выступает, таким образом, как единый аппарат синтеза его элементов с учетом нагруженности РО для всех альтернативных вариантов;
- содержит в себе возможность получения (за счет синтеза) новых технических решений и их анализа в рамках решаемой задачи;
- в идентичном виде может применяться для других фрезерных машин с цепными, дисковыми, комбинированными РО.

Решение задачи о снижении неравномерности нагружения привода пальцефрезерного РО по предложенной методике использовано автором при проектировании на базе тракторов Т-150К и ЛТЗ-60 траншеекопателей-кабелеукладчиков, которые отличаются конструкцией навесок. Научные выкладки, связанные с этим, будут изложены в следующих статьях.

Литература

1. Уткин А.И., Фиалко Ю.И., Ницадин В.М. Статистические методы исследований колебаний нагрузки в системах рабочего органа цепных экскаваторов // Статика и динамика машин: Сб. науч. статей. – К.: КИСИ, 1978. – С. 19 – 22.
2. Толстой М.Н. Оптимизация входной нагрузки на рабочем оборудовании экскавационных машин, с точки зрения обеспечения минимума динамики системы, методом случайного поиска. – Донецк: ДонНИГРИ, 1976.
3. Назаровский А. А. Нагрузки, действующие на рабочий орган ледорезных машин с концевыми фрезами // Труды ГПИ. – Горький, 1970. - т. XXVI. - вып. 1. - С.45–51.
4. Сиразетдинов Т.К. Устойчивость систем с распределенными параметрами. – Казань: КАИ, 1971.
5. Чайковский Э. Г., Горбачев Ю.Г., Шапирштейн А.Б. Исследование формирования нагрузки на шнеко-фрезерном рабочем органе гидрокомбайна // XIV Междунар. научно-техн. конф. "Механизация и автоматизация земляных работ": Сб. докл. - К.: Техника, 1991. - С. 68-70.
6. Зухба А. Г. Визначення параметрів фрезерного робочого органу на основі імітаційної моделі // Гірн., буд., дор. та меліорат. машини: Респ. міжвід. наук.– техн. зб., – К., 1993. - Вип. 48. - С. 88-92.
7. Зухба А.Г. Определение позиционных параметров взаимодействия элементов системы "базовая машина – навеска – пальцевая фреза – грунт" для целей имитационного моделирования // Горн., строит., дор. и мелиорат. машины: Респ. межвед. научно-техн. сб. – К.: Интехнодрук, 1998. - Вып. 52. - С.49-58.
8. Зухба А.Г. Определение кинематических параметров резца как оконечного звена в передаточной цепи "базовая машина – навеска – пальцевая фреза – грунт" для целей имитационного моделирования // Гірн., буд., дор. та меліорат. машини: Респ. міжвід. наук.– техн. зб., – К., 1999. -Вип. 53. - С.73-83.
9. Власов В.В., Пелевин Л.Е. Определение реакций динамической системы цепного траншеекопателя в режиме копания // Горн., строит., дор. и мелиорат. машины: Респ. межвед. научно-техн. сб. – 1992. - Вып. 47. - С.45-53.
10. Зухба А.Г. Определение нагрузок на элементы навесок при проектировании пальцефрезерных траншеекопателей // Гірн., буд., дор. та меліорат. машини: Респ. міжвід. наук.– техн. зб., –2000. - Вип.55. - С. 95 – 101.