

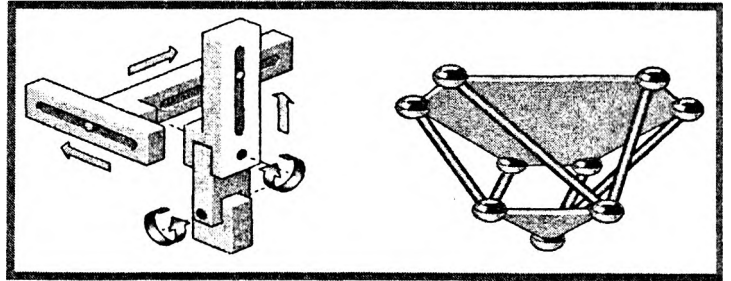
## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

### Введение

Многокоординатная (3-х — 6-ти осевая) обработка деталей традиционно выполняется на станках типа «обрабатывающий центр» (многоцелевых многокоординатных станках). В таких машинах используются ортогональные или вращательные движения. Каждое из них обеспечивает рабочему органу станка одну степень свободы. Все степени свободы достигаются последовательным соединением приводов по каждой координате. Взаимное воздействие последовательно добавляемых координат приводит к снижению жесткости станка и ухудшению его динамических характеристик.

Альтернативой многоцелевым станкам является создание нетрадиционных технологических машин на базе параллельных кинематических структур. Такие структуры отличаются тем, что выходное звено связано с основанием несколькими кинематическими цепями, каждая из которых содержит привод, либо налагает некоторое число связей на движение выходного звена [1]. Для ориентации выходного звена необходима одновременная (параллельная) работа всех кинематических цепей. Каждая цепь содержит стойку (штангу) переменной длины (рис. 1).



а

б

Рисунок 1 – Механизмы многокоординатных станков с последовательно (а) и параллельно (б) соединенными кинематическими цепями

Для любого набора длин стоек имеется единственная фиксированная позиция для механизма. Одновременное (параллельное) управление всеми стойками позволяет ориентировать рабочий орган станка определенным образом. При этом каждый из линейных приводов передает усилие только вдоль своей оси, не влияя на другие приводы. Такие механизмы, в отличие от традиционных, имеют замкнутые кинематические цепи и воспринимают нагрузку как пространственные фермы, что ведет к повышенной жесткости, точности и грузоподъемности, хотя возможно уменьшение рабочей зоны. Все это привело к большому интересу разработчиков и производителей станков к машинам на базе параллельных кинематических структур.

Механизмы параллельной структуры появились в 40-е годы прошлого столетия. В 1947г. Эрик Гауф (Gough), выдающийся английский инженер, изобрел новый параллельный механизм – гексапод (рис. 2) [2]. Новизна «платформы Гауфа» была во взаимном симметричном расположении шести стоек. В 1965 году появилась широко известная работа Стюарта [3]. В ней описан параллельный механизм (платформа), принципиально не отличающийся от механизма Эрика Гауфа. Однако, с этого времени платформу начали называть «платформой Стюарта».

Наиболее важными компонентами станков с параллельной кинематикой, определяющими надежность и точность их работы являются:

- распорки (штанги);
- шарниры и шарнирно-силовая система;
- приводы распорок;
- шпиндельные узлы и шарнирные шпиндельные головки;
- столы, платформы и несущая система;
- система управления, позиционирования и измерения координат.

Конструктивно механизм с параллельной кинематикой представляет собой некое твердое тело (платформу), соединенное с неподвижным основанием стойками или тягами переменной длины – поступательными парами (П) (рис. 3).

К платформе стойки присоединены посредством сферических пар (С), а к основанию посредством сферических пар с пальцем (Сп). На основании могут быть установлены и С пары. В этом случае опора имеет одну лишнюю степень свободы – вращение вокруг своей оси.

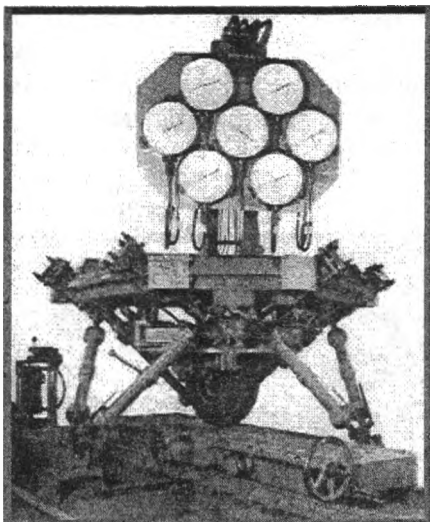


Рисунок 2 – Первый гексапод («платформа Гауфа») [2]

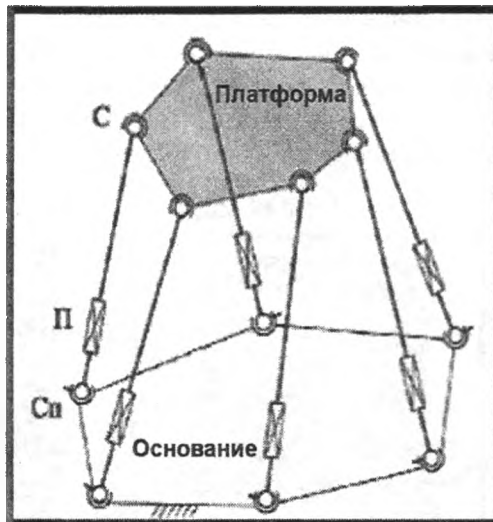


Рисунок 3 – Платформа Стюарта [3]

Число соединительных цепей и число степеней свободы может изменяться от 2 до 6. Число, вид и порядок расположения кинематических пар в цепях может быть различным. Каждая кинематическая цепь может содержать один или несколько приводов. Возможны структуры, в которых не все кинематические цепи содержат привод [4]. Отсюда следует, что механизмы параллельной структуры образуют очень обширный класс.

#### Классификация станков с параллельной кинематической структурой

Существует множество вариантов структурных исполнений механизмов с параллельной кинематикой, а также ряд параметров, характеризующих их. Наиболее простым и самым распространенным параметром, по которому можно классифицировать все параллельные механизмы, независимо от области их применения, является число степеней свободы. Поэтому технологическое оборудование можно разделить на следующие группы: биподы (выходное звено механизма имеет две степени свободы), триподы (три степени свободы), четырехподы (четыре степени свободы), пятиподы (пять степеней свободы), гексаподы (выходное звено имеет шесть степеней свободы).

#### Биподы

Являются простейшими представителями технологического оборудования, выполненного на основе механизма с параллельной кинематикой. Биподы представляют собой плоские механизмы с двумя параллельными кинематическими цепями. Выходное звено у таких механизмов имеет две степени свободы и, как правило, два перемещения. Схема станка на основе бипода показана на рис. 4.

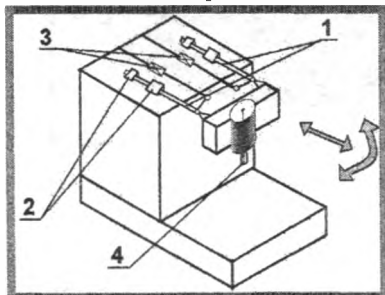


Рисунок 4 - Схема станка на основе бипода

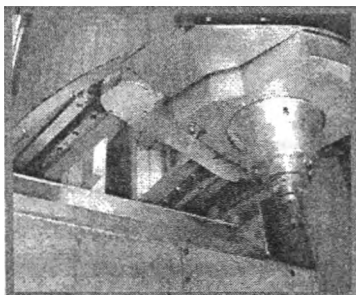


Рисунок 5 - Рабочая зона станка — бипода [1]

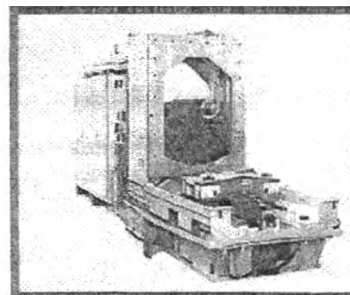


Рисунок 6 - Общий вид станка — бипода [1]

Несущие штанги 1 перемещаются в каретках 2 в продольном направлении. Штанги приводятся в движение приводами 3 продольного перемещения (линейные двигатели). Перемещение шпинделя по третьей координате осуществляется отдельным приводом.

На рис. 5 показана вертикальная шпиндельная бабка станка на основе бипода [1]. По аналогичной схеме, но с горизонтальным расположением шпинделя, выполнен станок Speht Xperimental [1] (рис. 6).

### Триподы и трицепты

В отличие от биподов триподы более полно позволяют использовать все преимущества, которые дают механизмы с параллельной кинематикой. Так, например, отпадает необходимость в обязательном использовании элементов станков традиционного исполнения (отдельных приводов по некоторым координатам). Все требуемые движения (в данном случае не более трех) реализуются триподом.



Рисунок 7 – 3-х осевой вертикальный обрабатывающий центр (трипод) [5]

3-х осевой станок на основе трипода показан на рис. 7 [5]. Выходное звено 1, на котором установлен мотор-шпиндель, связано со станиной тремя кинематическими цепями, которые включают в себя сдвоенные штанги постоянной длины 3 и приводы штанг 2 на основе линейных двигателей. Штанги соединены с приводами и выходным звеном при помощи карданных шарниров 4. Применение сдвоенных штанг позволяет повысить жесткость механизма, но наличие дополнительных связей уменьшат число степеней подвижности выходного звена до 3-х.

Технологические возможности данного оборудования могут быть расширены установкой дополнительно привода стола станка.

В группу станков с тремя степенями подвижности выходного звена кроме триподов входят также трицепты. Конструктивно отличие от трипода заключается в наличии у трицепта кинематической цепи, не содержащей привода.

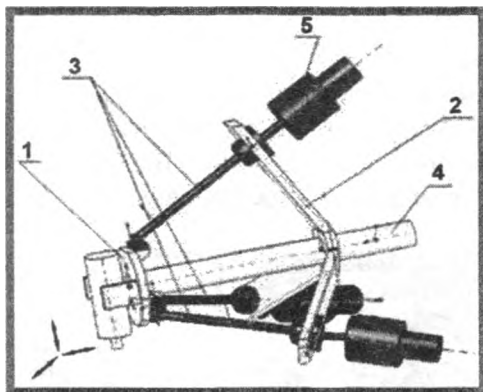


Рисунок 8 - Схема трицепта

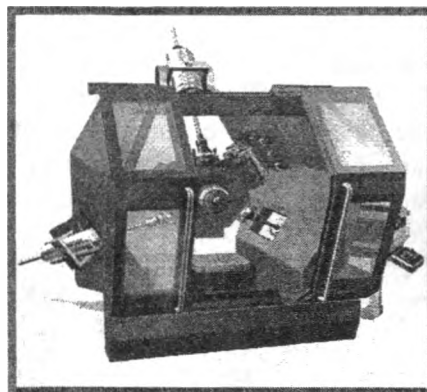


Рисунок 9 – Общий вид станка-трицепта

Схема трицепта показана на рис. 8. Выходное звено 1 связано с основанием 2 четырьмя кинематическими цепями. Три цепи 3 выполнены в виде штанг переменной длины с приводами 5. Четвертая кинематическая цепь 4 – пассивная, т.е. не содержит привода. Она выполнена в виде трубы и служит для повышения жесткости механизма параллельной кинематики, а также для раз-

мещения внутри нее подвода к рабочему органу (в данном случае к мотор-шпинделю) электричества и СОЖ. Труба проходит через сферический шарнир, закрепленный в основании, и крепится к выходному звену. Пассивная цепь 4 ограничивает число степеней подвижности механизма до 3-х.

Общий вид станка-трицепта показан на рис. 9.

#### Четырехподы

Применение в машиностроении таких механизмов весьма ограничено, а примеров технологического оборудования на основе четырехподов мало.

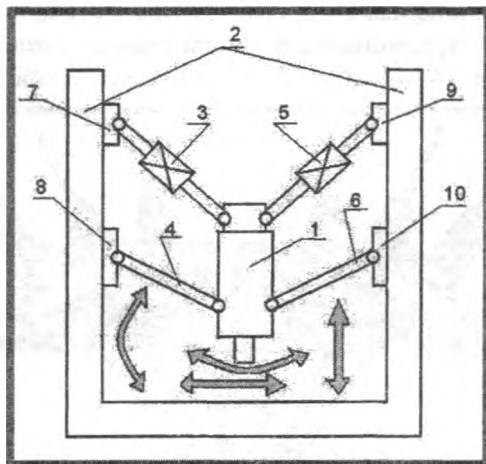


Рисунок 10- Схема станка на основе четырехпода

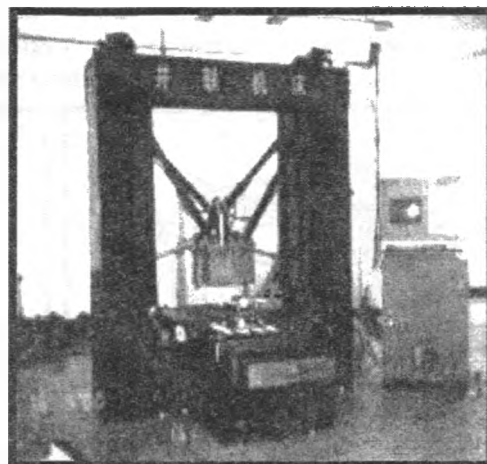


Рисунок 11- Общий вид станка на основе четырехпода [1]

На рис. 10 приведена схема станка на основе четырехпода, а на рис. 11- общий вид станка [1]. Выходное звено 1 связано с двумя направляющими стойки 2 штангами постоянной длины 4 и 6, а также штангами переменной длины с приводами 3 и 5. Штанги 4 и 6 соединены с ползунами 8 и 10, перемещающимися по направляющим стойки. Штанги переменной длины с приводами 3 и 5 соединены со стойкой шарнирами 7 и 9. Таким образом, параллельная кинематическая структура обеспечивает выходному звену четыре степени свободы.

#### Пятиподы

Технологическое оборудование основе пятиподов (пентоподов) получило широкое распространение в машиностроении, так как имеет очень большие технологические возможности. Схема станка-пятипода показана на рис. 12, а общий вид станка - на рис. 13 [1].

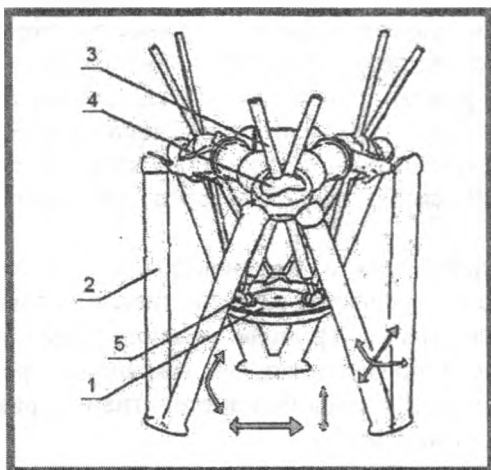


Рисунок 12- Схема станка на основе пятипода

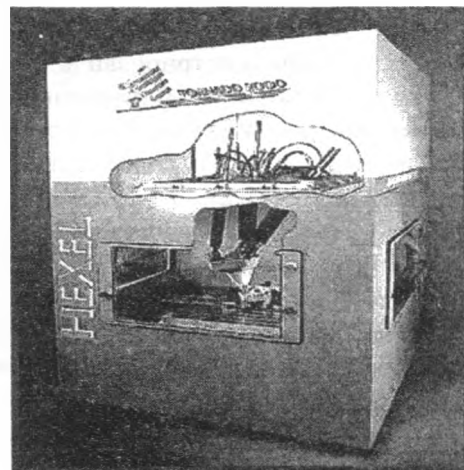


Рисунок 13-Общий вид станка на основе пятипода [1]

Выходное звено 1 связано с основанием 2 станка шестью кинематическими цепями. Каждая из них состоит из штанги переменной длины 3, которая установлена при помощи шарнира 4 на основании 2 станка. Штанга также соединена с выходным звеном 1 при помощи шарнира 5, обеспечивающего три степени подвижности. Данная схема обеспечивает пять степеней подвижности выходного звена: три поступательных движения вдоль осей станка и два

вращательных относительно горизонтальных осей. Шестая степень подвижности (вращение вокруг вертикальной оси) ограничивается конструкцией шарниров 4, в каждом из которых закреплены по две штанги 3.

### Гексаподы

Гексаподы в наибольшей степени реализуют все преимущества механизмов с параллельной кинематикой. При высокой жесткости и относительной простоте конструкции гексапод представляет собой механизм, с помощью которого можно ориентировать выходное звено по шести степеням свободы, что является неоспоримым преимуществом станочных систем такой концепции по сравнению со станками традиционной компоновки. Схема станка, выполненного на основе гексапода, показана на рис. 14 [6], а шпиндельный узел – на рис. 15.

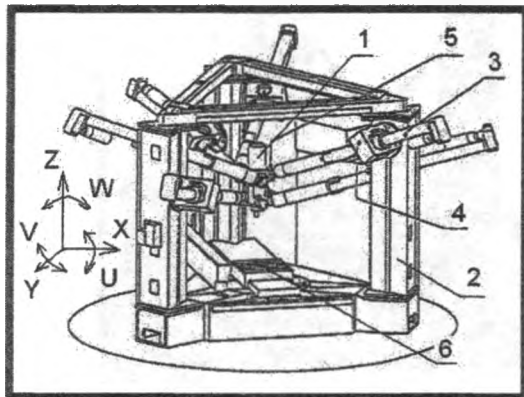


Рисунок 14 - Схема станка – гексапода [6]

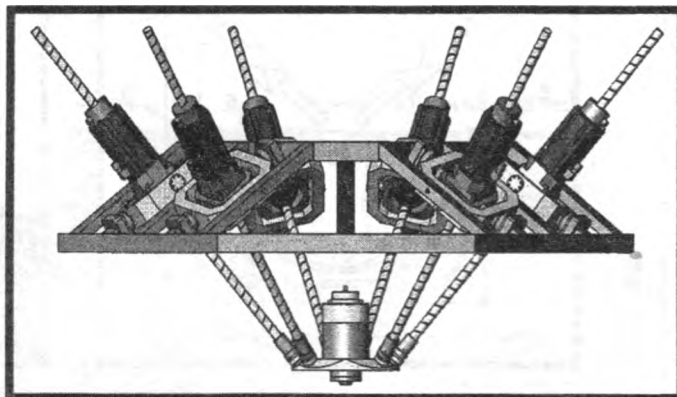


Рисунок 15 – Шпиндельный узел станка - гексапода

Выходное звено 1 связано с основанием 2 шестью кинематическими связями. Кинематическая связь состоит из штанги переменной длины 3 с приводом. Штанги установлены на станине при помощи карданных шарниров 4, имеющих две степени подвижности. Штанги соединены также при помощи сферических шарниров 5 с выходным звеном 1. Данная схема обеспечивает выходному звену шесть степеней подвижности: перемещение по трем осям координат, а также поворот относительно этих осей. Привод для перемещения стола 6 расширяет технологические возможности оборудования.

### Перспективы применения станков с параллельной кинематикой

Станки с параллельной кинематикой (PKM – Parallel Kinematic Machines) довольно быстро входят в состав технологического оборудования, используемого в различных отраслях промышленности. Это стало заметным достижением станкостроения, учитывая то, что впервые станок такого типа продемонстрирован в 1994 г. на выставке IMTS'94 в Чикаго. В настоящее время в мире реализовано более 30 различных компоновок станков с параллельной кинематикой. Сфера их применения расширилась до изготовления пресс-форм и штампов, лопаток турбин и др. Их с успехом используют в кузнечно-прессовом оборудовании, например, в качестве гибочных прессов, а также в качестве измерительных комплексов, манипуляторов для перемещения заготовок, роботов, позиционирующих устройств.

Станки с параллельной кинематикой представлены в настоящее время в основном триподами и гексаподами. Гексаподы рассматриваются в качестве альтернативы нынешним 5-ти координатным станкам, а триподы – 3-х координатным. Триподы имеют более простую конструкцию и их легче приспособить к практическому применению, чем гексаподы, требующие значительно более сложного программного обеспечения. Расходы на конструктивную разработку и изготовление гексапода существенно выше, чем для трипода.

Используя различные комбинации соединений штанг, шарниров и приводов (вращательных и поступательных пар) можно получить широкий набор исполнений кинематических структур параллельной кинематики. Наибольшее распространение получили технологические машины, основанные на стержневой конструкции (платформе Стюарта). Тесное сотрудничество станкостроительных фирм, научных и учебных институтов, а также разработчиков систем ЧПУ позволило в последнее время создать большое количество новых станков этого типа:

- гексапод с нерегулируемыми по длине штангами;
- станок с параллельной кинематикой, оснащенный линейными двигателями;

- горизонтальный гексапод с регулируемыми по длине штангами и др.
- Применение унифицированных узлов (шарниров, штанг, мотор-шпинделей, многокоординатных шпиндельных головок и столов) значительно упрощает производство таких станков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://robotool.ifw.uni-hannover.de>.
2. [www.parallemic.org](http://www.parallemic.org).
3. Stewart D. A. A platform with six degree of freedom//Proc. Inst. Mech. Eng. 1965/1966. Vol. 180, pt 1, N 15. P. 371-386.
4. Афонин В.Л. Предпосылки к проектированию машин нового поколения для обработки сложных поверхностей // Приложение. Справочник. Инженерный журнал. 2005, № 8. - С. 1 - 23.
5. [www.galika.ru](http://www.galika.ru).
6. Rainer Nestler, Jan Konvichka, Frank Wieland. Linear drive: Patent United State of America N0 US 6,285,098 B1. Sep. 4, 2001.

УДК 626.86002.51:62.868.001.4

Балицкий В.А.

### ЗЕМЛЕРОЙНО-МЕЛИОРАТИВНАЯ МАШИНА С ИНЕРЦИОННО-ИМПУЛЬСНЫМ ПРИВОДОМ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Создание отвечающих современным требованиям землеройно-мелиоративных машин предполагает резкое повышение их технико-экономических показателей, в том числе тяговых и мощностных параметров и проходимости на слабых грунтах – обеспечение высоких тяговых усилий (250-300 кН и более) позволяет во многих случаях разрабатывать на основании новых технологических и конструктивных принципов землеройно-мелиоративные машины, характеризующиеся по сравнению с известными машинами аналогичного назначения существенно большей производительностью при меньшей удельной энерго- и металлоемкости. Однако применяемые до сих пор в осушительной мелиорации тракторы, включая их болотные модификации (Т-130Б), не удовлетворяют современным требованиям ни по тяговым усилиям и мощности, ни по проходимости.

Основной причиной, сдерживающей решение задачи повышения тяговых параметров и

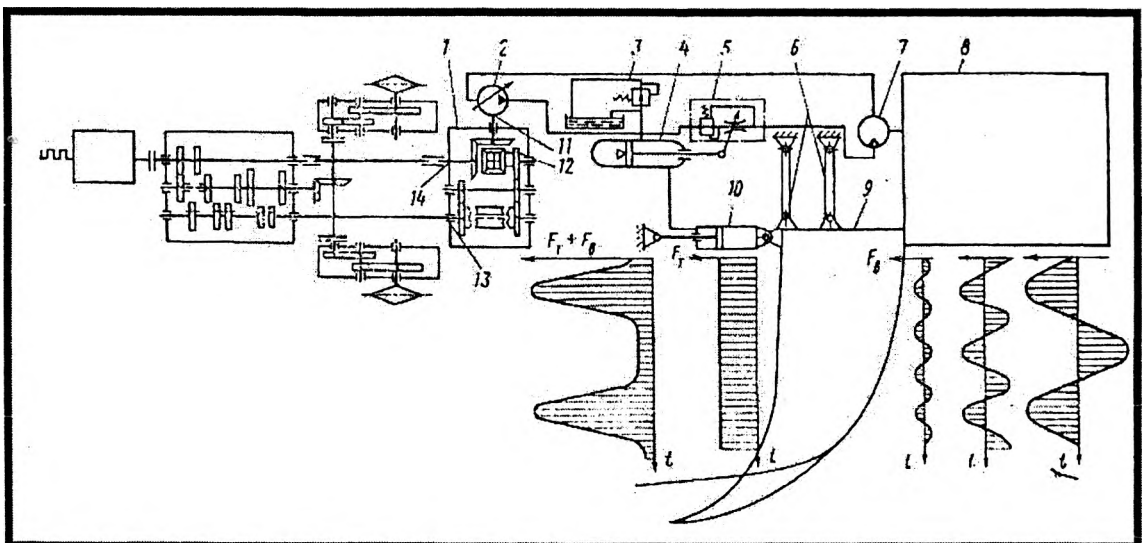


Рис.1 Гидрокинематическая схема землеройно-мелиоративной машины импульсного действия: 1-дифференциальный ходоуменьшитель; 2-насос переменной производительности; 3-предохранительный клапан; 4-гидроаккумулятор; 5-дрозель с регулятором; 6-тяги параллелограммной подвески рабочего органа; 7-гидромотор привода вибратора; 8-асимметричный вибратор; 9-рабочий орган; 10-гидроцилиндр связи рабочего органа с трактором; 11-вал насоса; 12 и 14-полуоси дифференциала; 13-вал привода бортрудукторов