

*В. В. Плохих<sup>1</sup>✉, Б. Б. Данилов<sup>1</sup>, Д. О. Чешчин<sup>1</sup>*

## **Обоснование структуры системы управления для реализации адаптивной технологии проходки скважин пневматической ударной машиной**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются системы управления рабочим процессом, используемые при прокладке подземных коммуникаций пневмоударной машиной с изменяемыми энергетическими характеристиками. Основным недостатком приведенных систем является возможность регулирования энергии и частоты ударов машины только за счет изменения параметров энергоносителя. В этом случае происходит снижение ударной мощности и производительности проходки скважины в целом. На основе анализа принципа работы таких систем для пневмоударной машины с изменяемыми энергетическими характеристиками предложена структура системы управления, включающая в себя датчики и электрический привод перемещения центрального патрубка ударной машины для изменения энергетических характеристик в автоматическом режиме, а также блок управления, пневмоклапан, монитор оператора и блок питания.

**Ключевые слова:** система управления, проходка скважин, адаптивные технологии, пневмоударная машина, энергия удара, частота удара, рабочий ход

*V. V. Plokhikh<sup>1</sup>✉, B. B. Danilov<sup>1</sup>, D. O. Cheshchin<sup>1</sup>*

## **Substantiation of control system structure for implementation of adaptive technology of well drilling with pneumatic percussion machine**

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

**Abstract.** The article discusses the working process control systems used when laying underground utilities with a pneumatic shock machine with variable energy characteristics. The main disadvantage of these systems is the ability to control the energy and frequency of machine impacts only by changing the parameters of the energy carrier. In this case, there is a decrease in the impact power and productivity of the well as a whole. Based on the analysis of the principle of operation of such systems for a pneumatic impact machine with variable energy characteristics, a control system structure is proposed, which includes sensors and an electric drive for changing the energy characteristics of the central branch pipe of the shock machine in automatic mode, as well as a control unit, a pneumatic valve, an operator-torus monitor and a power supply unit.

**Keywords:** control system, well drilling, adaptive technologies, pneumatic hammer machine, impact energy, impact frequency, working stroke

### ***Введение***

Сооружение подземных каналов является неотъемлемой частью технологических процессов в строительстве, при бестраншейной прокладке подземных

коммуникаций, и в горной промышленности. Чаще всего для сооружения таких каналов применяются пневматические ударные машины, которые характеризуются конструктивной простотой, низкой стоимостью и достаточной надежностью работы.

Общим трендом развития горного производства и бестраншейных технологий строительства в настоящее время является внедрение автоматических систем управления и так называемых «адаптивных технологий». Под адаптивными технологиями подразумевается возможность изменения энергетических характеристик (энергии и частоты ударов) устройства в зависимости от свойств обрабатываемого грунтового массива непосредственно в процессе проходки скважины. Применение адаптивных технологий позволяет уменьшить энергоемкость разрушения горной породы, улучшить технико-экономические показатели буровых процессов и минимизировать присутствие персонала в месте проведения работ.

В существующих пневмоударных машинах регулирование энергии ударных импульсов возможно только за счет изменения давления энергоносителя или ограничения его расхода. Такое регулирование осуществляется в ручном режиме в процессе проходки скважины, что приводит к уменьшению не только энергии, но и частоты ударов. Это в свою очередь снижает производительность работ. Кроме того, такое регулирование требует непосредственного участия оператора в процессе настройки параметров энергоносителя в процессе бурения. Таким образом, необходим иной способ регулирования энергетических характеристик, лишенный указанных недостатков.

В ИГД СО РАН разработана и запатентована конструктивная схема пневмоударной машины с комбинированной системой воздухораспределения. Основными элементами конструкции схемы являются эластичный клапан, установленный неподвижно на наковальне и позволяющий обеспечить полное опорожнение камеры холостого хода во всем диапазоне регулировок, а так же центральный патрубок, перемещение которого вдоль корпуса позволяет изменять рабочий ход ударника и, соответственно, энергию и частоту ударов. При этом изменение энергии и частоты ударов происходит разнонаправленно. То есть, при уменьшении энергии увеличивается частота ударов и наоборот. Производительность проходки скважины при таком регулировании может практически не изменяться [1].

По этой конструктивной схеме был изготовлен экспериментальный образец пневмоударной машины и проведены его лабораторные испытания при внедрении стального трубчатого кожуха в грунтовой канал. Изменение положения центрального патрубка в процессе испытаний происходило в ручном режиме. Полученные результаты подтвердили перспективность применения такой системы регулирования при забивании труб в грунт [2]. Однако, для реализации адаптивных технологий необходима автоматическая система регулирования, позволяющая изменять положение центрального патрубка в автоматическом режиме в зависимости от технологических условий и свойств грунтового массива.

### ***Методы и материалы***

Для решения приведенной задачи необходимо рассмотреть существующие системы управления для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций.

Чаще всего для такой технологии используются системы управления, обеспечивающие точность проходки скважин, автономность и безопасность ведения работ.

Для обеспечения точности и корректировки траектории движения трубы используется гироскопическая система управления. Кроме гироскопа в такие системы устанавливают акселерометр. Примером такой системы является Vermeer NAV-X, которая предназначена для горизонтально-направленного бурения. В состав системы входит акселерометр и гироскоп для точного определения местоположения и пространственной ориентации буровой головки [3].

Схема работы адаптированной системы управления Vermeer NAV-X для пневматической ударной машины при забивании труб в грунтовый массив представлена на рис. 1.

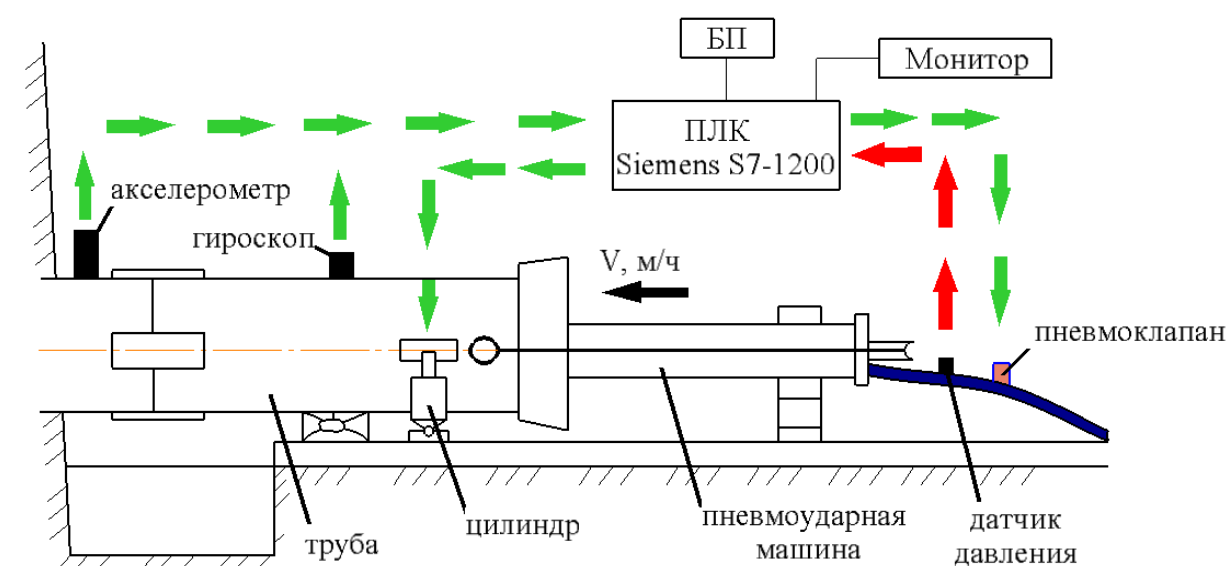


**Рис. 1.** Схема реализации адаптивной технологии Vermeer NAV-X

Система работает следующим образом. Гироскоп и акселерометр непрерывно передают сигнал о положении и динамике движения трубы на программируемый логический контроллер (ПЛК) Siemens S7-1200. Акселерометр позволяет выявлять нештатные ситуации в процессе проходки скважины. ПЛК анализирует угол отклонения по горизонтали и вертикали по данным гироскопа и ускорение по сигналам акселерометра. Если ПЛК фиксирует отклонение от проектных параметров проходки скважины, то формируется сигнал подачи давления в силовой управляющий цилиндр. Тем самым осуществляется корректировка положения трубы в процессе работы. ПЛК так же анализирует данные, получаемые от акселерометра, и преобразует их в значение силы удара и вибрации. В зависимости от этого осуществляется подача сигнала на пневмоклапан, изменяющий давление энергоносителя. Дополнительными функциями ПЛК являются диагностика целостности системы управления и вывод данных на экран

монитора оператору. Питание всей системы осуществляется от блока питания БП [4,5].

Примером системы, обеспечивающей автономность ведения работ, является система Toro PipeRam AI. Это инновационная система управления, в которой применяются современные технологии, такие, как алгоритмы машинного обучения, предназначенные для оптимизации технологических процессов горизонтально-направленного бурения. Такая система обеспечивает автоматизацию управления и эффективность взаимодействия с оборудованием в режиме реального времени. Схема работы системы с машинным обучением Toro PipeRam AI представлена на рис. 2.

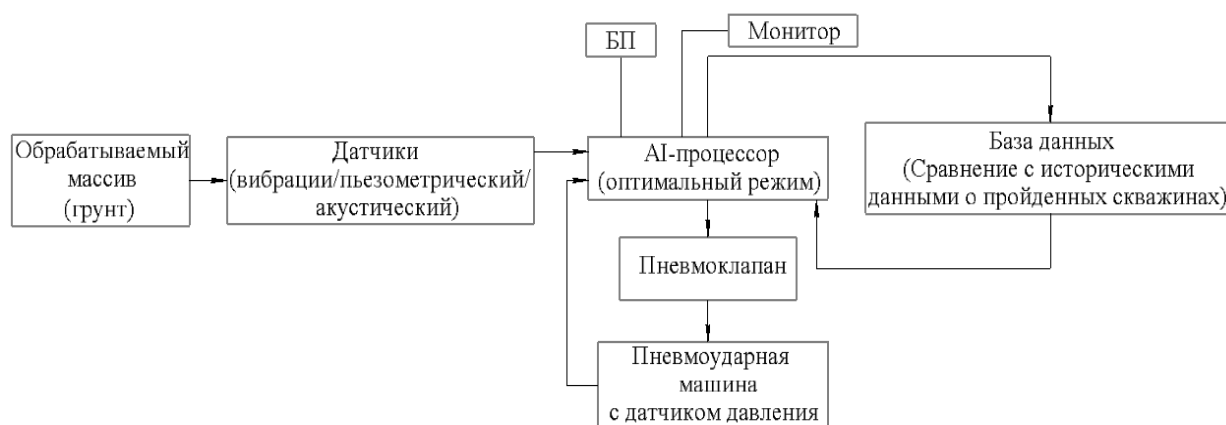


**Рис. 2.** Схема реализации системы Toro PipeRam AI

Суть работы системы Toro PipeRam AI заключается в следующем. При внедрении трубы в грунт происходит фиксация изменения параметров проходки с помощью датчиков уровня вибрации, пьезоэлектрического датчика давления на трубу от грунта. Акустический датчик дает информацию о структуре грунта. Сигналы с датчиков поступают на AI-процессор, в состав которого входит AI-ядро на базе встраиваемого вычислительного модуля NVIDIA Jetson, предназначенного для обучения искусственного интеллекта, машинного обучения и компьютерного зрения на периферийных устройствах. Так же в качестве AI-ядра может использоваться спецпроцессор с алгоритмами Random Forest. Процессор анализирует данные, поступающие с датчиков. На основе базы данных, в которой присутствует архив с данными проектов о пройденных скважинах, процессор подбирает энергию и частоту ударов для обрабатываемого массива. Далее сигнал поступает на пневмоклапан, который установлен в питающей магистрали пневмоударной машины. Происходит изменение давления энергоносителя и соответствующее изменение энергии и частоты ударов устройства. Все решения, принимаемые процессором, отображаются на мониторе оператора. Если возникает необходимость, то в процессе проходки скважины можно внести корректировки. Для этого предусмотрен удобный интерфейс для пользователя. Питание системы управления происходит от блока питания БП [6].

Другим примером системы, обеспечивающей безопасность ведения работ, является дистанционный мониторинг Vermeer NAV-X. Vermeer NAV-X является интеллектуальной системой мониторинга для бестраншейной прокладки труб и горизонтально-направленного бурения. Такая система позволяет обеспечить точное позиционирование рабочего органа, контроль параметров работы и удаленное управление процессом проходки скважины через облачную платформу обмена данными. Основными функциями системы являются точное отслеживание траектории, удаленный доступ, запись всех параметров работы, оповещения об авариях. Схема работы системы дистанционного мониторинга Vermeer NAV-X представлена на рис. 2.

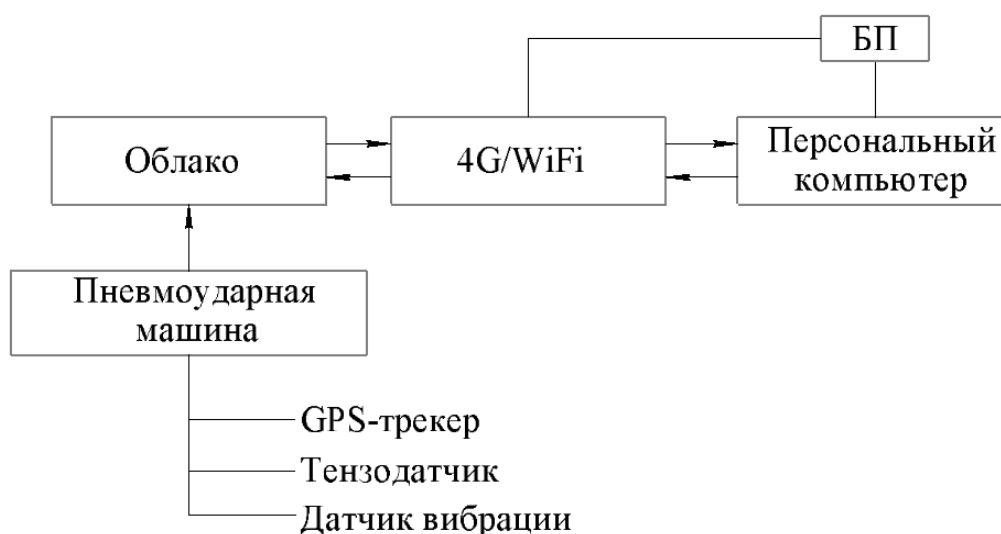


**Рис. 3.** Схема реализации дистанционного мониторинга Vermeer NAV-X

Работа дистанционного мониторинга Vermeer NAV-X заключается в следующем. Сигнал с датчиков (GPS-трекер, тензодатчик, датчик вибрации), установленных на пневмоударной машине, поступает в облачную платформу обмена данными. Далее посредством 4G или WiFi происходит передача данных на персональный компьютер. Расстояние передачи зависит от зоны покрытия и параметров связи. Так же возможно внесение изменений параметров проходки скважины непосредственно в процессе работы. Внесенные данные архивируются в облаке и могут быть использованы для дальнейших работ. Кроме того, облачная платформа может быть связана с другими системами и приложениями [7-9].

### ***Результаты***

Рассмотренные системы управления не позволяют в полной мере реализовать преимущества технологии адаптивного бурения. Их общим недостатком является возможность регулирования энергетических характеристик устройства только за счет изменения давления энергоносителя или ограничения его расхода. При уменьшении давления энергоносителя происходит одновременное снижение как энергии, так и частоты ударов, и соответственно, ударной мощности и производительности

процесса проходки скважины [10]. Кроме того, отсутствует датчик измерения скорости перемещения, который позволит изменять энергетические характеристики устройства в зависимости от скорости погружения трубы непосредственно в процессе проходки. Следовательно, отсутствует возможность оценки эффективности действия ударных импульсов. Вдобавок, для автоматического перемещения центрального патрубка и изменения характеристик машины необходим электрический, или какой-то иной привод, соединенный с блоком управления. При этом необходим канал управления приводом и канал его обратной связи с блоком управления.

На основе рассмотренных систем управления, с учетом выявленных недостатков, разработана схема системы управления для адаптивной технологии проходки скважин пневмударной машиной с изменяемыми энергетическими характеристиками [1] (рис. 4).

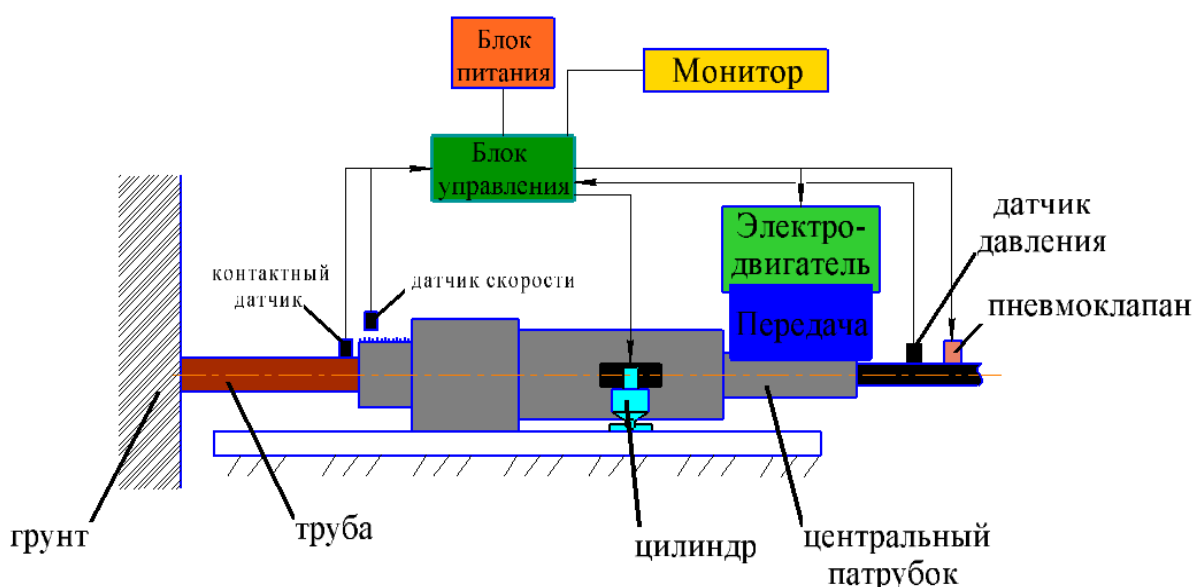


**Рис. 4.** Схема системы управления для адаптивной технологии проходки скважин методом забивания труб в грунт

Принцип работы системы управления заключается в следующем. Пневмударная машина осуществляет забивание трубы в грунт. Контактный датчик (датчик вибрации, тензодатчик, GPS-трекер, пьезометрический, акустический датчики, акселерометр, гироскоп) или их совокупность подают сигнал совместно с датчиком скорости на блок управления. В блоке управления происходит анализ данных согласно заданному алгоритму, заложенному в процессоре, и последующая подача управляющего сигнала на силовой цилиндр для изменения траектории погружения трубы, электродвигатель для изменения положения центрального патрубка, пневмоклапан для изменения давления энергоносителя в питающей магистрали. Если происходит отклонение трубы от проекта проходки, то GPS-трекер или гироскоп фиксирует отклонение и подает сигнал на блок управления, который в свою очередь подает сигнал на подачу давления в цилиндр.

Таким образом, происходит изменение положения машины совместно с трубой согласно заданным в блоке управления проектным параметрам. Сигналы с других контактных датчиков так же поступают в блок управления. После анализа этих данных осуществляется формирование и подача управляющего сигнала на электродвигатель для изменения энергетических характеристик ударного воздействия без потери ударной мощности или же на пневмоклапан для изменения давления энергоносителя или перекрытия магистрали и остановки машины. Скорость проходки фиксируется соответствующим датчиком. С датчика сигнал поступает на блок управления и далее на пневмоклапан при необходимости или на электродвигатель привода управления положением воздухораспределительного патрубка ударной машины. Так достигается изменение давления воздуха в магистрали и положения центрального патрубка, изменение рабочего хода ударника и, соответственно, энергетических характеристик устройства в процессе проходки. Иными словами, реализуется многофакторная система управления рабочим процессом, позволяющая в режиме реального времени обеспечить высокую эффективность всего технологического процесса. Процесс изменения параметров проходки в режиме реального времени отображается на мониторе. Питание всей системы управления осуществляется от блока питания.

### ***Обсуждение***

Анализ предложенной схемы управления показывает, что такая схема, в отличие от существующих, позволяет регулировать энергетические характеристики (энергию и частоту ударов) не только путем изменения давления энергоносителя или ограничения его расхода, но и изменением положения центрального патрубка. Такая система является более многофункциональной, поскольку позволяет минимизировать потерю ударной мощности ввиду того, что энергия и частота ударов изменяются разнонаправленно [2], уменьшить одновременно и энергию, и частоту ударов, уменьшить силу обратной отдачи, вибрацию, изменять другие технологические параметры. В совокупности с системой корректировки траектории и средствами дистанционного управления такая система является перспективной для реализации адаптивной технологии проходки скважин пневматической ударной машиной.

### ***Заключение***

Проведен анализ систем управления, предназначенных для реализации адаптивной технологии проходки горизонтальных скважин. Предложена новая схема системы управления, позволяющая изменять энергетические характеристики устройства не только путем снижения давления энергоносителя, но и за счет изменения рабочего хода ударника в процессе работы. На следующем этапе исследований будут разработаны алгоритмы работы блока управления, которые позволят реализовать процесс забивания труб в автоматическом режиме.

### ***Благодарности***

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 121052600390-5).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 208325 РФ. Устройство ударного действия / Б. Б. Данилов, В. В. Плохих, А. А. Речкин, Д. О. Чецин // Оpubл. 14.12.2021. Бюл. № 35.
2. Плохих В.В. Разработка пневматической ударной машины с изменяемыми энергетическими характеристиками для проходки скважин: Автореф. дис... канд. техн. наук: 2.8.8. / В.В. Плохих. – Новосибирск, 2025. – 24 с.
3. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Радиолокационный комплекс мониторинга положения буровой головки в устройстве наклонно-направленного бурения // Изв. вузов России. Радио-электроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 90–101. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-90-101
4. Najafi M. Trenchless Technology Pipeline and Utility Design. Construction and Renewal. Michigan: McGraw Hill, 2005. 489 p.
5. Балаховский М. С. На Российском рынке – американская фирма «Vermeer» // Механизация строительства. 2000. № 10. С. 2–7.
6. Официальный сайт The Toro Company [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.toro.com/en>
7. Tervydis P., Jankuniene R. Horizontal directional drilling pilot bore simulation // Turkish J. of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2017. Vol. 25, iss. 4. P. 3421–3434. doi: 10.3906/elk-1606-200
8. Cai L., Polak M. A. A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 83. P. 313–323. doi: 10.1016/j.tust.2018.09.014
9. Meier Hoyela C., Terzuoli A. J., Wasky R. P. Determining possible receiver locations for passive radar // IEEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation. 2005. № 3. P. 206–214. doi: 10.1049/ip-rsn:20045023
10. Плохих В.В., Чецин Д.О., Данилов Б.Б. Результаты исследования динамики рабочего цикла пневмоударного устройства с изменяемой величиной рабочего хода ударника // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2025. Т. 12. № 1 С.58-64 DOI: 10.15372/FPVGN2025120107

© В. В. Плохих, Б. Б. Данилов, Д. О. Чецин, 2026