

В. С. Щербаков, М. С. Корытов, А. Н. Шабалин

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ МАШИННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ОПТИМИЗАЦИЮ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТРУБОУКЛАДЧНОЙ КОЛОННЫ

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Обеспечение безопасности рабочего процесса грузоподъемных машин является актуальной проблемой по следующим причинам: во-первых, человек, занятый в производственном процессе, должен быть уверен в своей безопасности; во-вторых, аварийные ситуации приводят к большим финансовым затратам. *Материалы и методы.* Для обеспечения безопасности производственного процесса грузоподъемных машин создано множество различных устройств и систем безопасности, направленных на сохранение устойчивости грузоподъемных машин, принцип действия которых основан на ограничении грузового момента, создаваемого самим краном. Данный подход применим для случая работы отдельно стоящей машины с собственным единичным грузом. В рабочем процессе комплекта машин с общим грузом есть свои особенности, которые делают все эти устройства малоэффективными, поскольку автономное и независимое повышение устойчивости одной машины существующими устройствами, как правило, вызывает снижение устойчивости всех остальных машин. Все воздействия на кран-трубоукладчик, можно разделить на высокочастотные и низкочастотные. *Результаты.* Для компенсации низкочастотных воздействий создана система автоматического управления, для компенсации высокочастотных воздействий создано устройство стабилизации грузового момента, так как из-за запаздывания гидропривода система управления не успевает обрабатывать высокочастотные воздействия.

**Ключевые слова:** трубоукладочная колонна, комплект машин, кран-трубоукладчик, система управления, момент устойчивости, расчетная схема, однородные координаты.

V. S. Shcherbakov, M. S. Korytov, A. N. Shabalin

## IMPROVEMENT OF METHODS OF MACHINE COMPLEXES CONTROL PROVIDING OPTIMIZATION OF THE WORKING PROCESS OF THE PIPELAYING COLUMN

**Abstract.** *Background.* Safety of the working process of load-lifting cars is a topical problem for the following reasons: first, a person involved in production has to be confident in safety; secondly, emergencies lead to big financial expenses. *Materials and methods.* For safety of production of load-lifting cars there was created a set of various devices and systems of safety intended to preserve stability of load-lifting cars which principle of action is based on restriction of the load moment created by the crane itself. This approach is applicable for a case of operation of the separate car with own single freight. In working process of a set of cars with the general freight there are features which make all these devices ineffective as autonomous and independent increase of stability of one car by existing devices, as a rule, causes decrease in stability of all other cars. All impacts on the crane-pipe layer may be divided into high-frequency and low-frequency ones. *Results.* For compensation of low-frequency impacts the authors created a system of automatic control, for com-

pensation of high-frequency impacts the researchers created a device of stabilization of the load moment since due to the delay of the hydraulic actuator the control system doesn't manage to deal with high-frequency impacts.

**Key words:** pipelaying column, set of cars, crane pipe layer, control system, stability moment, settlement scheme, uniform coordinates.

### Введение

Типичным примером комплекта грузоподъемных машин является трубоукладочная колонна, состоящая из нескольких кранов-трубоукладчиков. Кран-трубоукладчик (КТ) – это строительная машина, созданная на базе трактора с увеличенной шириной базы и смещенным центром тяжести, оснащенного боковой стрелой А-образной формы [1–3]. Рабочий процесс трубоукладочной колонны заключается в движении колонны вдоль трубопровода, поднятии его условно неограниченного участка с одновременным смещением к оси траншеи. Сложность задачи заключается в том, что укладка трубопровода требует согласованных действий всех участников рабочего процесса. На машинистов КТ колонны возложена корректировка расстояния между машинами, движущимися вдоль оси траншеи, угла наклона стрелы КТ, высоты подвеса крюковой обоймы КТ. При движении колонна перемещается по естественному рельефу, все КТ связаны между собой трубопроводом, что делает трубоукладочную колонну сложной динамической системой.

### Метод повышения безопасности и эффективности рабочего процесса комплекта грузоподъемных машин трубоукладочной колонны

Для решения поставленной задачи необходимо разработать математическую модель сложной динамической системы «трубоукладочная колонна». Ее условно можно разделить на следующие подсистемы: краны-трубоукладчики, трубопровод, гидропривод, рельеф. Для создания универсальной математической модели, которая будет отражать особенности большинства существующих моделей КТ, необходимо разработать пространственные расчетные схемы трубопровода (рис. 1) и КТ (рис. 2).

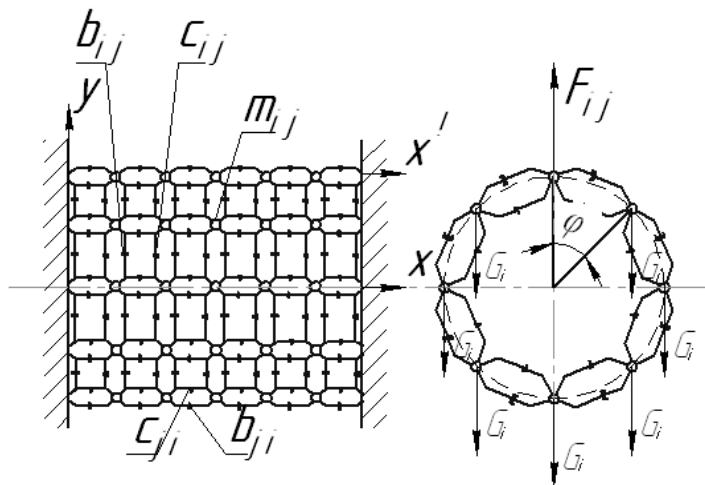


Рис. 1. Пространственная расчетная схема трубопровода

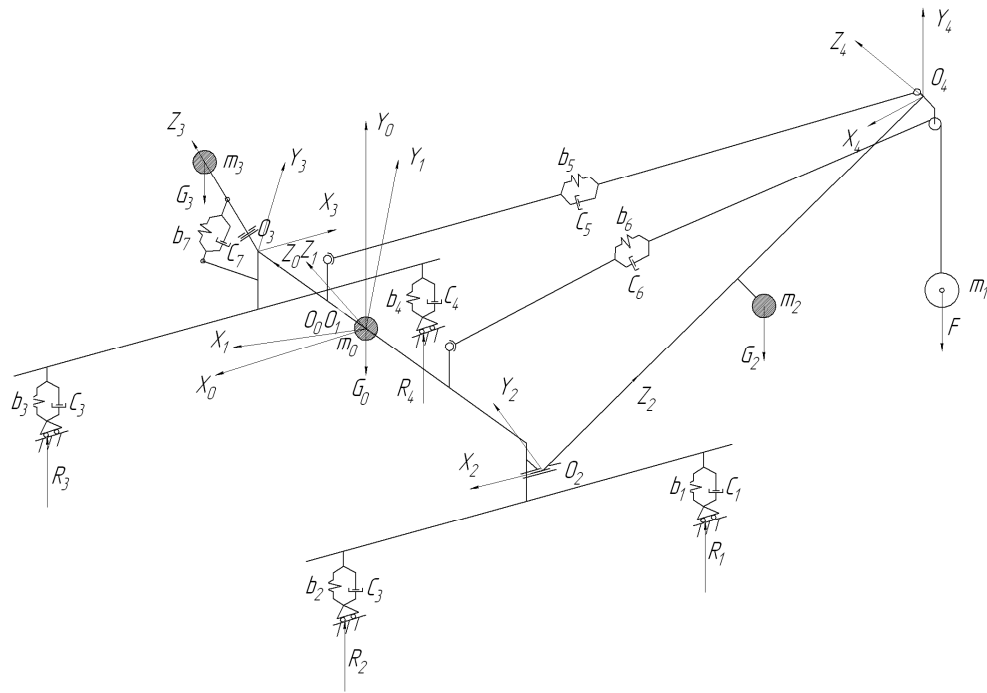


Рис. 2. Пространственная расчетная схема отдельного крана-трубоукладчика в составе трубоукладочной колонны

При составлении пространственных расчетных схем на основании анализа конструкций и условий работы КТ приняты следующие допущения: 1) КТ и трубопровод являются голономными и стационарными системами; 2) КТ и трубопровод представляют собой шарнирно-сочлененные многосвязники с наложенными на них упруго-вязкими и динамическими связями; 3) внешние силы, действующие на КТ и трубопровод, являются сосредоточенными; 4) зазоры и силы сухого трения в шарнирах не оказывают существенного влияния на эффективность рабочего процесса и не учитываются; 5) колебания элементов КТ и трубопровода малы.

Приняты обозначения:  $m_i$  – масса  $i$ -го звена КТ;  $G_i$  – сила тяжести  $i$ -го звена;  $b_i$  – коэффициент вязкости  $i$ -го звена;  $C_i$  – коэффициент упругости  $i$ -го звена;  $R_i$  – сила реакции грунта;  $F_i$  – внешняя сила [4, 5].

Для разработки динамической модели КТ и трубопровода применялся метод уравнений Лагранжа второго рода. Каждое из уравнений Лагранжа второго рода для голономной системы с числом степеней свободы, равным  $l$ , которым соответствуют обобщенные координаты  $q_j$  ( $j = 1, \dots, l$ ), будет иметь следующий вид [6–8]:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right] - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_j} = F_j, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $q_j$  – обобщенная координата;  $K$  – кинетическая энергия;  $P$  – потенциальная энергия;  $\Phi$  – диссипативная функция;  $\dot{q}_j$  – обобщенная скорость;  $F_j$  – обобщенная сила, действующая по обобщенной координате.

В векторно-матричной форме система дифференциальных уравнений будет иметь вид [6–8]:

$$A \cdot \ddot{\vec{q}} + B \cdot \dot{\vec{q}} + C \cdot \vec{q} = \vec{F}, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – матрицы коэффициентов дифференциальных уравнений ( $A$  – матрица инерционных коэффициентов,  $B$  – матрица коэффициентов демпфирования,  $C$  – матрица коэффициентов жесткости);  $\ddot{\vec{q}}$ ,  $\dot{\vec{q}}$ ,  $\vec{q}$  – векторы соответственно ускорения, скорости и обобщенных координат;  $\vec{F}$  – вектор внешних сил, действующих по обобщенным координатам.

После подстановки всех слагаемых в уравнение Лагранжа получим систему дифференциальных уравнений вида [6–8]:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{\ell} \text{tr} \left[ U_{ij} H_i U_{iV}^T \right] q'_j + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^{\ell} \text{tr} \left[ M_{uj} B_u M_{uV}^T \right] q'_j + \\ + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^{\ell} \text{tr} \left[ M_{uj} N_u M_{uV}^T \right] q_j + \sum_{i=1}^k m_i g G^T U_{iV} \bar{R}_i = \sum_{r=1}^m \bar{F}_r U_{iV} \bar{R}_{ir}, \quad (3)$$

где  $U_{ij}$  – матрица скоростей;  $H_i$  – матрица инерции;  $M_{ij}$  – матрица скоростей упруго-вязких элементов;  $B_u$  – матрица вязкости;  $N_u$  – матрица упругости;  $m_i$  – масса звена;  $G$  – вектор силы тяжести;  $R_i$  – вектор центра масс звена;  $F_i$  – вектор внешней силы;  $R_{ir}$  – вектор точки приложения внешней силы.

Результатом решения системы дифференциальных уравнений (3) как с постоянными, так и с переменными коэффициентами являются временные зависимости изменения обобщенных координат, описывающие изменение положения элементов КТ и трубопровода в пространстве.

Адекватность математической модели подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями. Из рис. 3 и 4 следует, что расхождение теоретических и экспериментальных кривых не превышает 5 %.

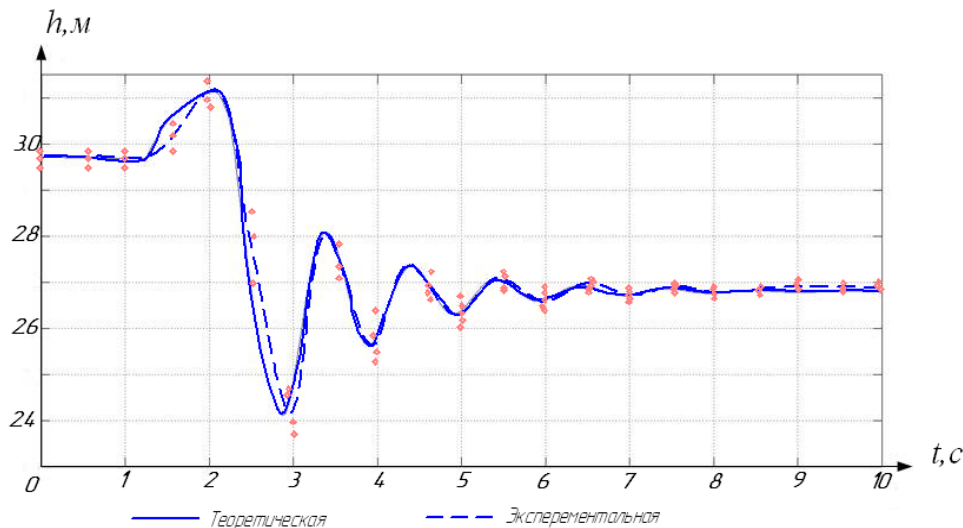


Рис. 3. Графическая зависимость перемещения оголовка стрелы при наезде КТ на неровность высотой 0,23 м (пример)

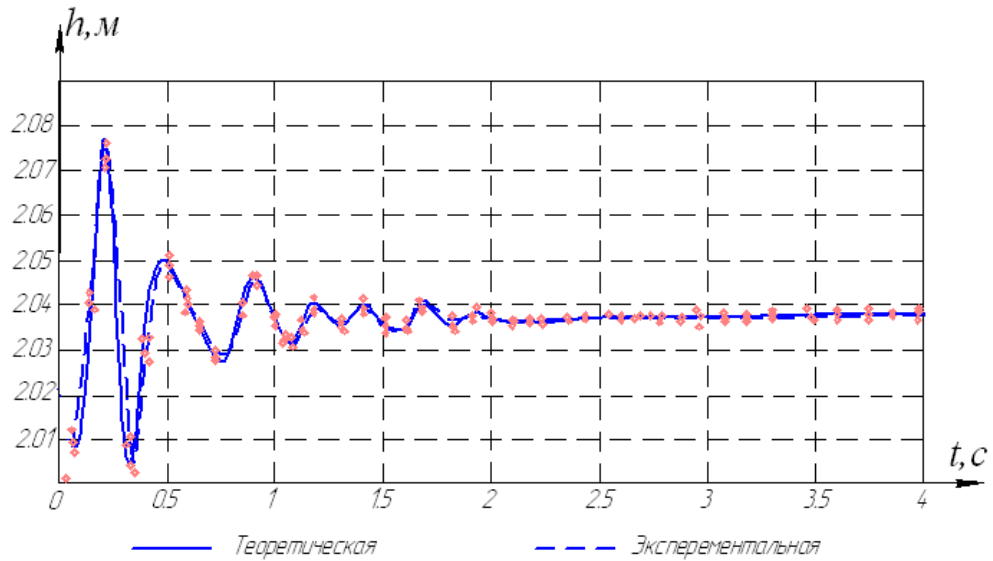


Рис. 4. Графическая зависимость колебаний трубопровода (530×10 мм) при ступенчатом воздействии

Для обеспечения безопасности рабочего процесса трубоукладочной колонны предлагается использовать систему автоматического управления, которая будет корректировать расстояния между отдельными машинами и контролировать равную загруженность всех КТ, регулируя высоту подвеса крюковой обоймы, тем самым компенсируя низкочастотные воздействия.

Данная система использует в качестве первичных информационных (входных) параметров следующие величины (рис. 5):  $F$  – силу на крюке;  $\alpha$  – угол наклона КТ в поперечной плоскости;  $l$  – расстояние до идущего позади КТ;  $n$  – число оборотов грузовой лебедки;  $\gamma$  – угол наклона стрелы КТ. Выходными параметрами выступают электрические сигналы управления:  $i_{упр}$  – сигнал изменения высоты подвеса крюковой обоймы, поступающий на гидрораспределитель управления грузовой лебедки;  $l_{упр}$  – сигнал изменения расстояния между КТ, поступающий на сигнализатор расстояния.

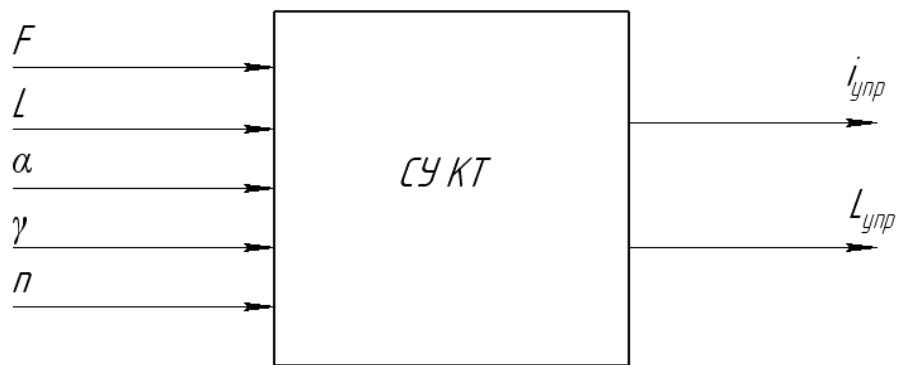


Рис. 5. Входные и выходные параметры системы управления трубоукладочной колонной

Для компенсации высокочастотных динамических воздействий на КТ предлагается установить устройство стабилизации грузового момента, принципиальная схема которого представлена на рис. 6. Принцип действия устройства стабилизации заключается в том, что на базовую машину 1 дополнительно устанавливается упруго-вязкая связь 8, один конец которой неподвижно закреплен, а к другому прикреплен шкив 9, через который проходит грузовой канат 4. Параметры упруго-вязкой связи подобраны таким образом, что при приближении значения грузового момента на крюке 6 к предельно допустимому значению момента устойчивости происходит удлинение грузового каната за счет удлинения связи 8 и происходит перераспределение нагрузки между различными КТ колонны.

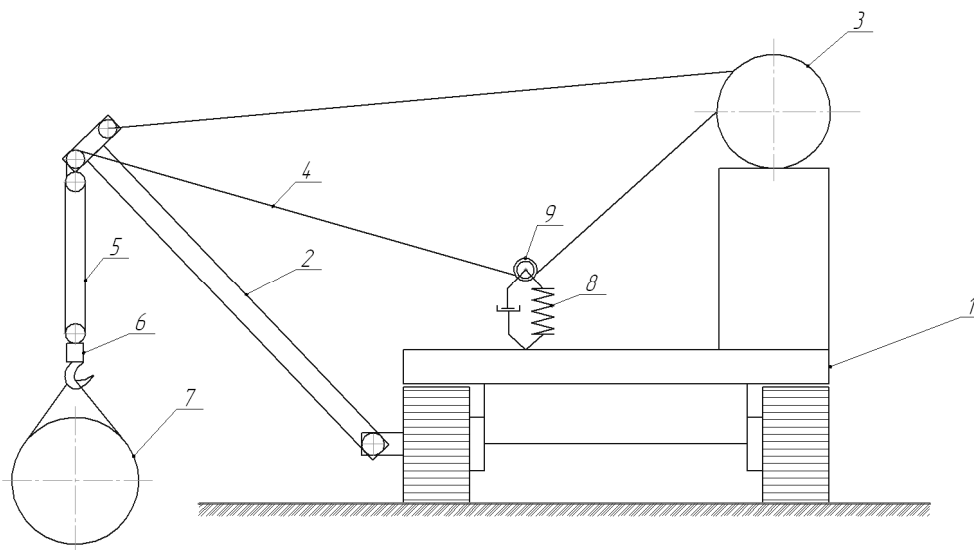


Рис. 6. Схема устройства стабилизации грузового момента крана-трубоукладчика

Применение системы управления комплектом машин трубоукладочной колонны и устройства стабилизации грузового момента позволяет исключить аварийные ситуации потери устойчивости отдельным КТ и всей колонной, и тем самым повысить безопасность и эффективность рабочего процесса трубоукладочной колонны. Данный вывод подтверждается расчетными экспериментами. С использованием динамической математической модели были получены графические зависимости грузового момента каждого КТ в составе трубоукладочной колонны с типовыми, т.е. разработанными ранее (рис. 7), и предлагаемыми (рис. 8) системами управления и безопасности.

Внедрение предлагаемой системы автоматического управления и устройства стабилизации грузового момента облегчает труд машинистов, делает его безопасным, поскольку грузовые моменты различных КТ в колонне при этом стремятся к некоторому одинаковому значению, не превышающему при этом момент устойчивости отдельного КТ. Максимальный грузовой момент наименее устойчивого КТ колонны в неблагоприятных с позиции устойчивости расчетных случаях снижается на величину до 40–45 % (см. рис. 7, 8).

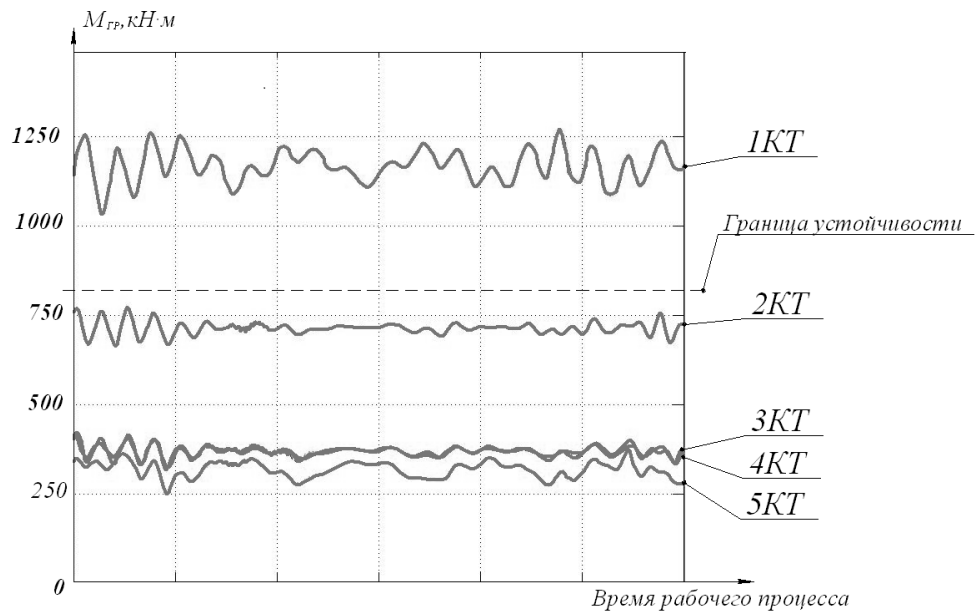


Рис. 7. Графические зависимости изменения грузовой момент кранов-трубоукладчиков, входящих в состав трубоукладочной колонны с типовыми устройствами безопасности (пример)

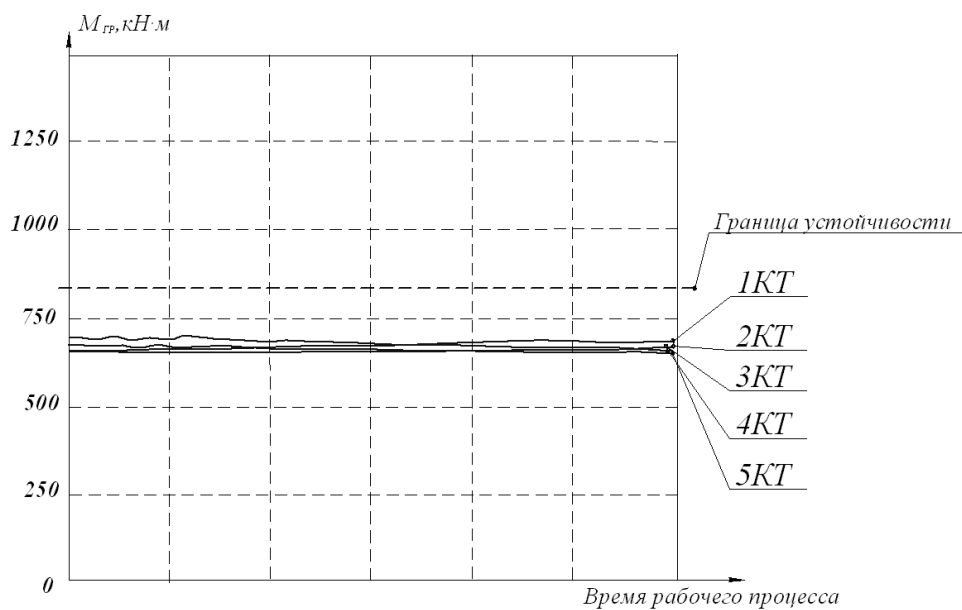


Рис. 8. Графические зависимости изменения грузовой момент кранов-трубоукладчиков, входящих в состав трубоукладочной колонны с системой автоматического управления и устройством стабилизации грузовой момент (пример)

### Заключение

Указанный результат достигается оптимизацией грузовой момент КТ всей колонны в комплексе и учетом и оптимизацией ряда дополнительных

параметров рабочего процесса, прежде всего расстояния между отдельными КТ в составе колонны. В разработанных ранее системах данное расстояние не учитывалось. Кроме того, дополнительно происходит перераспределение высокочастотных колебаний нагрузки от общего груза между отдельными КТ при движении по неровностям микрорельефа местности при помощи предлагаемой конструкции устройства стабилизации грузового момента. Разработанные ранее системы не позволяют осуществить подобное перераспределение, что увеличивает достигаемые максимальные значения грузового момента на отдельной машине.

### Список литературы

1. **Шабалин, А. Н.** Математическое описание трубопровода для создания систем управления трубоукладочной колонной / А. Н. Шабалин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. – № 3. – С. 134–136.
2. **Щербаков, В. С.** Оценка устойчивости автокрана по моменту запаса устойчивости / В. С. Щербаков, М. С. Кoryтов, С. А. Зырянова // Машины и процессы в строительстве : сб. науч. тр. – Вып. 5. – Омск : СибАДИ, 2004. – С. 184–187.
3. **Кoryтов, М. С.** Моделирование динамической системы автокрана при помощи блоков пакета «SIMMECHANICS» системы MATLAB / М. С. Кoryтов, С. А. Зырянова // Омский научный вестник. – 2004. – № 4 (29). – С. 88–90.
4. **Щербаков, В. С.** Математическая модель крана-трубоукладчика на базе гусеничной машины / В. С. Щербаков, М. С. Кoryтов // Многоцелевые гусеничные и колесные машины: разработка, производство, боевая эффективность, наука и образование (Броня – 2002) : матер. межрегион. науч.-техн. конф. – Омск : ОТИИ, 2002. – Ч. 3. – С. 42–45.
5. **Щербаков, В. С.** Математическая модель трубопровода как объекта управления кранов-трубоукладчиков / В. С. Щербаков, М. С. Кoryтов, Ю. Б. Тихонов // Информационный листок. – Омск : ЦНТИ, 2003. – № 1.
6. **Кoryтов, М. С.** Метод составления уравнений динамики для исследования движения подъемно-транспортных машин в больших перемещениях / М. С. Кoryтов, П. Ю. Манник // Дорожные и строительные машины (исследование, испытание и расчет) : сб. науч. тр. – Вып. 4. – Омск : СибАДИ, 2001. – Ч. 4. – С. 72–79.
7. Система автоматизированного моделирования стрелового грузоподъемного крана : моногр. / В. С. Щербаков, С. А. Зырянова, М. С. Кoryтов. – Омск : СибАДИ, 2009. – 104 с.
8. Статическая и динамическая устойчивость фронтальных погрузчиков : моногр. / В. С. Щербаков, М. С. Кoryтов. – Омск : СибАДИ, 1998. – 100 с.

### References

1. Shabalin A. N. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of machine building and automation]. 2012, no. 3, pp. 134–136.
2. Shcherbakov V. S., Korytov M. S., Zyryanova S. A. *Mashiny i protsessy v stroitel'stve: sb. nauch. tr. Vyp. 5.* [Machines and processes in construction: collected papers. Issue 5]. Omsk: SibADI, 2004, pp. 184–187.
3. Korytov M. S., Zyryanova S. A. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk scientific bulletin]. 2004, no. 4 (29), pp. 88–90.
4. Shcherbakov V. S., Korytov M. S. *Mnogotsel'evye gusenichnyye i kolesnyye mashiny: razrabotka, proizvodstvo, boevaya effektivnost', nauka i obrazovanie (Bronya – 2002): mater. mezhregion. nauch.-tekhn. konf.* [Multipurpose track and wheel machines: development, production, combat efficiency, science and education (Armor – 2002): proceedings of the Interregional scientific and technical conference]. Omsk: OTII, 2002, part 3, pp. 42–45.



5. Shcherbakov V. S., Korytov M. S., Tikhonov Yu. B. *Informatsionnyy listok* [Information bulletin]. Omsk: TsNTI, 2003, no. 1.
6. Korytov M. S., Mannik P. Yu. *Dorozhnye i stroitel'nye mashiny (issledovanie, ispytanie i raschet): sb. nauch. tr. Vyp. 4* [Road and construction machines (research, testing and calculation): collected papers. Issue 4]. Omsk: SibADI, 2001, part 4, pp. 72–79.
7. Shcherbakov V. S., Zyryanova S. A., Korytov M. S. *Sistema avtomatizirovannogo modelirovaniya strelovogo gruzopod'emnogo krana: monogr.* [System of automated modeling of jib hoisting crane: monograph]. Omsk: SibADI, 2009, 104 p.
8. Shcherbakov V. S., Korytov M. S. *Statischeckaya i dinamichesckaya ustoychivost' frontal'nykh pogruzchikov: monogr.* [Static and dynamic stability of front-end loaders: monograph]. Omsk: SibADI, 1998, 100 p.

---

***Щербаков Виталий Сергеевич***

доктор технических наук, профессор,  
декан факультета нефтегазовой  
и строительной техники, Сибирская  
государственная автомобильно-дорожная  
академия (Россия, г. Омск, пр. Мира, 5)

E-mail: sherbakov\_vs@sibadi.org

***Shcherbakov Vitaliy Sergeevich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
dean of the faculty of oil-and-gas  
and construction technology, Siberian  
State Automobile and Highway Academy  
(5 Mira avenue, Omsk, Russia)

***Корытов Михаил Сергеевич***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра конструкционных материалов  
и специальных технологий, Сибирская  
государственная автомобильно-дорожная  
академия (Россия, г. Омск, пр. Мира, 5)

E-mail: kms142@mail.ru

***Korytov Mikhail Sergeevich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of construction materials  
and special technologies, Siberian State  
Automobile and Highway Academy  
(5 Mira avenue, Omsk, Russia)

***Шабалин Андрей Николаевич***

аспирант, Сибирская государственная  
автомобильно-дорожная академия  
(Россия, г. Омск, пр. Мира, 5)

E-mail: andreishabalin@mail.ru

***Shabalin Andrey Nikolaevich***

Postgraduate student, Siberian State  
Automobile and Highway Academy  
(5 Mira avenue, Omsk, Russia)

---

УДК 621.86./87.

**Щербаков, В. С.**

**Совершенствование методов управления машинными комплексами, обеспечивающих оптимизацию рабочего процесса трубоукладочной колонны / В. С. Щербаков, М. С. Корытов, А. Н. Шабалин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 180–188.**