



## ВЛИЯНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ «БУРИЛЬНАЯ КОЛОННА – ПРИВОД» НА СТРАТЕГИЮ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Б.А.Перминов<sup>1</sup>, Э.Х.Ягубов\*<sup>1</sup>, И.А.Дементьев<sup>1</sup>, Э.З.Ягубов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия;

<sup>2</sup>Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия

### Influence of Relaxation Oscillations in the «Drill String - Drive System» on the Well Drilling Strategy

B.A.Perminov<sup>1</sup>, Z.Kh.Yagubov<sup>1</sup>, I.A.Dementiev<sup>1</sup>, E.Z.Yagubov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia; <sup>2</sup>Pitirim Sorokin Syktyovkar State University, Syktyovkar, Russia

#### Abstract

The emergence and impact of relaxation oscillations on the oil and gas drilling strategy has been studied very little, while their importance cannot be underestimated. The dynamic equilibrium in the system of the drill string - drive is determined by the energy balance between the energy consumption of the drill string during its operation and the power of the drive motor. In case of violation of this equilibrium state on the part of energy consumption relaxation oscillations may occur with consequences in the form of emergencies. In this regard, the determination of the influence and the need to take into account the relaxation oscillations in the drill string - drive system in the calculation of drilling strategy are extremely important tasks. According to experimental data, the selection of power from the drive motor in the event of relaxation oscillations can reach about 47%, which leads to a violation of the energy balance in the drill string - drive system and, as a consequence, appearance of self-oscillations of the drive motor power. The proposals on compensation of relaxation oscillations in the drill string - drive system by the Yagubov – Perminov method are considered.

#### Keywords:

Drilling strategy;  
Relaxation oscillations;  
Dynamic equilibrium;  
Energy balance;  
Torsional self-oscillations

© 2018 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Выбранная стратегия бурения скважины в первую очередь определяется устойчивым режимом работы бурильной колонны при углублении [1]. Однако обеспечить устойчивый режим в силу целого ряда случайных факторов, воздействующих на колонну [2], а так же в связи с особенностью динамических свойств самой колонны бурильных труб [3] практически невозможно.

Колонна бурильных труб в процессе углубления скважины определяется как неустойчивый объект управления и её работа всегда сопровождается наличием автоколебаний [4], что доказывается и теоретически, и экспериментально [4]. При этом, отбор мощности от двигателя привода бурильной колонны на крутильные, продольные и собственные автоколебания может составлять порядка 37% [5], это соответственно приводит к снижению коэффициента полезного действия буровой установки на 30% и более. Существует

большое число методов и средств компенсации автоколебаний бурильной колонны. Особенно практикуется в последнее время направление использования виртуальной модели процесса бурения с коррекцией режимных параметров по их текущим значениям [1, 2]. Считаем, что подобное направление заранее обречено на неудачу в связи со следующими обстоятельствами:

- реализовать виртуальную модель неустойчивого объекта управления крайне сложно;
- измерение текущих значений режимных параметров бурения сопряжено с целым рядом трудностей, особенно при передаче информации;
- для получения объективных интегративных данных необходимо проводить измерения по всей длине бурильной колонны [6], что практически не реализуемо;
- бурильная колонна при работе постоянно находится в режиме автоколебаний, что обусловлено её динамическими свойствами, что существенно затрудняет сбор информации о текущих значениях режимных параметров бурения;

\*E-mail: [zyagubov@ugtu.net](mailto:zyagubov@ugtu.net)

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20180400365>

- текущая информация определяется сложным гармоническим сигналом, затрудняющим её преобразование в цифровой код и дальнейшее использование для коррекции виртуальной модели бурения;

- учитывая инерционные свойства процесса управления бурением скважин система регулирования режимных параметров не способна по своему быстродействию отслеживать текущие измерения этих параметров;

- реализовать прямое управление неустойчивым объектом регулирования без применения корректирующих устройств не реально [2], так как противоречит основным постулатам теории автоматического регулирования;

Поддержание заданной стратегии бурения возможно в том случае, когда реализуется непрерывное отслеживание не численных параметров бурения, а управление бурением определяется динамическим приращением этих режимных параметров по величине которого и проводится управление [7].

В качестве примера реализации такого способа компенсации автоколебаний бурильной колонны при её работе можно рассмотреть патенты [1, 2]. Предлагаемые способ и устройство позволяют с высокой степенью эффективности компенсировать автоколебания бурильной колонны при её работе в случае выхода режима бурения из псевдо устойчивого состояния.

Известно, что наиболее опасным и тяжелым по своим последствиям является эффект возникновения биений колонны бурильных труб, приводящий к разрушению стенок скважины, сломам колонны труб и возникновению релаксационных колебаний мощности двигателя привода буровой установки [8]. Возникновение жёстких биений бурильной колонны обусловлено потерей геометрической формы устойчивости сжатой части бурильной колонны, которая возможна при достижении критических значений осевой нагрузки равной [4-6]

$$P_{кр} = q \cdot l_{кр} \quad (1)$$

при критической глубине проводки скважины критическое значение длины колонны.

Определив значение критической осевой нагрузки  $P_{кр}$ , определяем критическую длину участка сжатой части колонны бурильных труб на верхней границе которого происходит изменение вида вращения бурильной колонны:

$$l_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\pi^2 \cdot EI}{q}} \quad (2)$$

где  $P_{кр}$  – критическая осевая нагрузка на сжатую часть бурильной колонны, при которой наблюдается потеря геометрической формы бурильной колонны, кН;

$EI$  – жёсткость колонны на изгиб, Н·м<sup>2</sup>;

$q$  – вес единицы длины колонны, кг.

$l_{кр}$  – критическое значение длины бурильной

колонны, м;

С потерей устойчивости формы колонны бурильных труб происходит появление изгибных полуволн, соударение которых о стенки скважины вызывает жесткие колебания биений [5]. Затраты мощности двигателя привода на преодоление колебаний биений, согласно экспериментальным данным, могут составлять порядка 47%. На рисунке 1 приведена осциллограмма мощности двигателя привода, снятая на экспериментальной скважине фирмы «Элтех» г. Усинска, Республики Коми. Осциллограмма соответствует осевой нагрузке равной 120 кН, при которой не происходит образование изгибных полуволн, потери устойчивости формы не наблюдается и вся мощность двигателя привода расходуется на преодоление диссипативных сил, автоколебаний бурильной колонны и разрушение разбуриваемой породы.

На рисунке 2 приведена осциллограмма мощности двигателя привода при осевой нагрузке 160 кН, превышающей критическую для данных параметров колонны труб. Отличается резкий рост отбора мощности, возникновение биений и, как следствие, наступление релаксационных колебаний системы «бурильная колонна – привод», что наглядно отражает вид приведённой осциллограммы изменения мощности.

Таким образом, момент наступления биений бурильной колонны может быть зафик-



Рис.1. Осциллограмма мощности при осевой нагрузке 120 кН



Рис.2. Осциллограмма мощности при осевой нагрузке 160 кН

сирован появлением гармонической составляющей отбора мощности от двигателя привода [6]. Компенсация биений может быть реализована двумя способами:

1. Изменением угловой скорости вращения колонны буровых труб;
2. Непосредственным воздействием на двигатель привода.

Критическое значение осевой нагрузки пропорционально угловой скорости вращения буровой колонны. Следовательно, при наступлении биений для их устранения необходимо увеличение скорости вращения колонны буровых труб. Неограниченное увеличение угловой скорости невозможно в следствии особенностей технологического процесса бурения. Кроме того, угловая скорость, как правило, задаётся выбранной стратегией бурения. В этой связи компенсация биений с использованием регулирования скорости вращения буровых труб не представляется возможной.

Второй способ компенсации биений буровой колонны основан на активном управлении мощностью двигателя привода при возникновении релаксационных автоколебаний в системе «привод – буровая колонна». Способ подробно описан в [2], а его основная суть заключается в следующем. Биение буровой колонны в процессе углубления скважины приводит к гармоническим изменениям мощности двигателя привода с частотой, равной частоте изменения динамического наброса крутящего момента на валу привода (рис. 2) [1].

Отсюда, приращение крутящего момента, на валу привода определится как отношение приращения мощности двигателя привода к приращению угловой скорости его вращения [1].

$$\Delta M = \Delta N / \Delta \omega, \quad (3)$$

где  $\Delta M$  – приращение крутящего момента, Н·м;

$\Delta N$  – приращение мощности двигателя привода, Вт;

$\Delta \omega$  – приращение угловой скорости вращения вала, рад/с.

Согласно приведённым осциллограммам, приращение крутящего момента определяется гармоническим законом:

$$\Delta M = M \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (4)$$

где  $M$  – амплитуда крутящего момента.

Если реализовать измерение приращения мощности привода по гармоническому

закону с той же частотой, но сдвинутой на  $180^\circ$  то получим:

$$\Delta N = N \cdot \sin(\omega \cdot t - 180^\circ) = N \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5)$$

Отсюда, угловая скорость вращения привода:

$$\omega = \frac{N \cdot \sin(\omega \cdot t)}{M \cdot \sin(\omega \cdot t)} = \frac{N}{M}, \quad (6)$$

т. е. вращение вала становится равномерным.

Реализация способа может быть осуществлена с использованием блок-схемы, приведённой на рисунке 3. Здесь, схематически показано взаимодействие основных функциональных блоков структуры для компенсации колебаний биений. В структуру входят: Д – двигатель привода; БК – буровая колонна; ВС – вариационная структура измерения крутящего момента; ИУ – инвертирующий усилитель; РМ – регулятор мощности двигателя привода.

При возникновении колебаний биений буровой колонны значения мощности двигателя привода  $N$  и угловой скорости  $\omega$  его выходного вала поступают на вариационную структуру измерения мощности и угловой скорости вариационной структуры измерения [2]. При этом следует иметь ввиду, что каналы измерения мощности и угловой скорости в силу их дифференцирующих свойств отсекают постоянные составляющие этих величин. На выходе вариационной структуры измерения имеется блок деления, который реализует операцию  $\Delta N / \Delta \omega$ . Сигнал градиента крутящего момента с выхода вариационной структуры поступает на вход инвертирующего усилителя, реализующего поворот фазы сигнала на  $180^\circ$ , который в дальнейшем используется регулятором для управления мощностью двигателя привода по гармоническому закону.

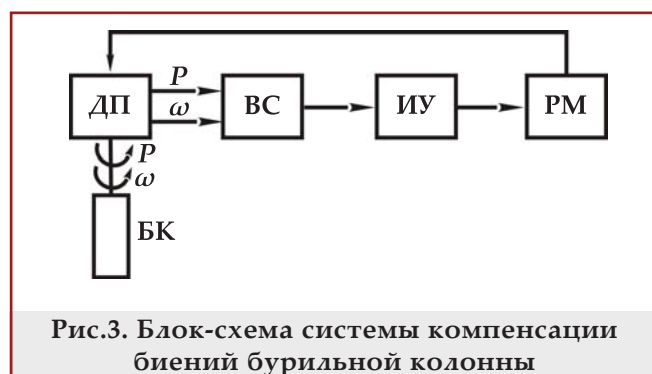
Необходимость компенсации колебаний биений буровой колонны очевидна, так как при отборе мощности от двигателя привода на преодоление жёстких биений буровой колонны требуется порядка 47%. КПД буровой установки при этом снижается более, чем на 30%.

### Выводы

1. Углубление скважины в процессе бурения всегда сопровождается наличием автоколебаний буровой колонны в силу её особых динамических свойств, при этом имеется большой арсенал средств для их компенсации.

2. Особую опасность представляют жёсткие колебания биений, приводящие к разрушению стенок скважины, сломам буровой колонны и вызывающие релаксационные колебания системы «привод – буровая колонна».

3. При возникновении релаксационных колебаний системы «привод – буровая колонна» КПД буровой установки резко падает в следствии большого отбора мощности от двигателя привода на их преодоление.



4. Жесткие колебания биений приводят к резкому снижению механической скорости проводки скважины в следствии уменьшения крутящего момента на буровом инструменте и уменьшению удельной осевой нагрузки на долоте.

5. Эффективным методом компенсации жестких колебаний биений является способ гармонического противофазного управления мощностью

двигателя привода.

6. Для расчёта стратегии бурения скважин данных о геологической структуре разбуриваемой породы и технического прогнозирования как правило недостаточно.

7. При определении стратегии бурения необходимо учитывать влияния релаксационных колебаний в системе «бурильная колонна – привод».

#### *Литература*

1. З.Х.Ягубов, Б.А.Перминов, В.Б.Перминов, С.В. Полетаев. Способ управления процессом бурения и система для его осуществления. Патент РФ № 2569659, 2015.

2. З.Х.Ягубов, Б.А.Перминов, В.Б.Перминов, С.В. Полетаев. Способ управления процессом бурения и система для его осуществления. Патент РФ № 2569656, 2015.

3. В.И.Векерик, В.М.Мойсишин. Определение динамической составляющей осевой нагрузки на долото по данным колебаний верхней части бурильной колонны //Известия вузов «Нефть и газ». – 1986. – №4. – С. 22–26.

4. И.К.Майоров. Спиральный продольный изгиб колонны труб //Нефтяное хозяйство. – 1966. – №4. – С. 28–32.

5. B.A.Perminov, V.B.Perminov, Z.H.Yagubov, E.Z. Yagubov. Ratio of indicators in the system «drill string – drive» //Science & Applied Engineering Quarterly. – SAEQ: UK, London. – 2016. – Issue 08. – P. 7 – 13.

6. N.D.Tshodaya, B.A.Perminov, V.B.Perminov, et al. Frequency characteristics of a variatoinal strueture of measurer of a torque //The international science – technical journal Herald of the Azerbaijan Engineering Academy. – 2016. - Vol. 8. - №1. - P. 52 – 62.

7. Б.А.Перминов, В.И.Перминов, З.Х.Ягубов, И.А. Деметьев. Квазирезонанс в двухходовых системах контроля параметров бурения //SOCAR Proceedings. – 2017. – № 4. – С. 27–35.

8. М.М.Александров. О силе прижатия вращающихся труб к стенкам вертикальной скважины //Известия вузов «Нефть и газ». – 1988. – №8. – С. 17–21.

#### *References*

1. Z.Kh.Jagubov, B.A.Perminov, V.B.Perminov, S.V. Poletaev. Method of drilling control and system for its implementation. RU Patent 2569659, 2015.

2. Z.Kh.Jagubov, B.A.Perminov, V.B.Perminov, S.V. Poletaev. Method of drilling control, and system for its implementation. RU Patent 2569656, 2015.

3. V.I.Vekerik, V.M. Moysishin. Determination of the dynamic component of the axial load on the bit according to oscillations of the upper part of the drill string // News of universities "Oil and gas". - 1986. – No. 4. - P. 22–26.

4. I.K.Mayorov. Spiral buckling of a pipe string // Oil industry. - 1966. – No.4. - P. 28–32.

5. B.A.Perminov, V.B.Perminov, Z.H.Yagubov, E.Z. Yagubov. Ratio of indicators in the system «drill string – drive» //Science & Applied Engineering Quarterly. – SAEQ: UK, London. – 2016. – Issue 08. – P. 7 – 13.

6. N.D.Tshodaya, B.A.Perminov, V.B.Perminov, et al. Frequency characteristics of a variatoinal strueture of measurer of a torque //The international science – technical journal Herald of the Azerbaijan Engineering Academy. – 2016. - Vol. 8. - №1. - P. 52 – 62.

7. B.A.Perminov, V.B.Perminov, Z.H.Yagubov, I.A. Dementiev. Quasiresonance in dual-inputs control systems of drilling parameters //SOCAR Proceedings. – 2017. – No. 4. – P. 27–35.

8. M.M.Aleksandrov. On the pressure force of rotating pipes to the vertical well walls // News of universities "Oil and gas". - 1988. – No. 8. - P. 17–21.



## Влияние релаксационных колебаний в системе «бурильная колонна – привод» на стратегию бурения скважин

Б.А.Перминов<sup>1</sup>, З.Х.Ягубов<sup>1</sup>, И.А.Дементьев<sup>1</sup>, Э.З.Ягубов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия;

<sup>2</sup>Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина,  
Сыктывкар, Россия

### Реферат

Появление и влияние релаксационных колебаний на стратегию бурения скважин на нефть и газ весьма мало изучено, в то время как их значение нельзя недооценивать.

Динамическое равновесие в системе «бурильная колонна – привод» определяется энергетическим балансом между энергопотреблением бурильной колонны при её работе и мощностью двигателя привода. При нарушении этого равновесного состояния со стороны энергетики потребления возможно возникновение релаксационных колебаний с последствиями в виде аварийных ситуаций. В этой связи определение влияния и необходимость учёта релаксационных колебаний в системе «бурильная колонна – привод» при расчёте стратегии бурения оказываются чрезвычайно важными задачами.

Согласно экспериментальным данным, отбор мощности от двигателя привода при возникновении релаксационных колебаний может достигать порядка 47%, что приводит к нарушению энергетического баланса в системе «бурильная колонна – привод» и, как следствие, появлению автоколебаний мощности двигателя привода. Рассмотрены предложения по компенсации релаксационных колебаний в системе «бурильная колонна – привод» по методу Ягубова – Перминова.

**Ключевые слова:** стратегия бурения; релаксационные колебания; динамическое равновесие; энергетический баланс; крутильные автоколебания.

## Relaksasiya rəqslərinin «qazma kəməri - ötürücü» sistemində quyuların qazılması strategiyasına təsiri

B.A.Perminov<sup>1</sup>, Z.X.Yaqubov<sup>1</sup>, İ.A.Demytyev<sup>1</sup>, E.Z.Yaqubov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uxta Dövlət Texniki Universiteti, Uxta, Rusiya;

<sup>2</sup>Pitirim Sorokin adına Sıktıvkar Dövlət Universiteti, Sıktıvkar, Rusiya

### Xülasə

Relaksasiya rəqslərinin yaranması və neft və qaz quyuların qazılması strategiyasına təsiri çox az öyrənilmişdir, eyni zamanda onların əhəmiyyətini qiymətləndirməməkdə olmaz.

«Qazma kəməri - ötürücü» sistemində dinamik tarazlıq qazma kəmərinin işi zamanı onun elektrik sərfi ilə mühərikin ötürücüsünün gücü arasındakı energetik balansla təyin edilir. Bu tarazlığın energetik sərftmə tərəfindən pozulduqda qəza vəziyyətlərinə qətib çıxaran relaksasiya rəqslərinin yaranması mümkündür. Bununla əlaqədar «qazma kəməri - ötürücü» sistemində relaksasiya rəqslərinin təsirinin müəyyən edilməsi və nəzərə alınması vacib məsələlərdən biridir. Təcrübi göstəricilərə əsasən relaksasiya rəqslərinin yaranması ötürücü mühərrikinin gücünün 47%-ə qədər alınmasına qətib çıxara bilər ki, bu da «qazma kəməri - ötürücü» sistemində energetik balansın pozulmasına və bunun nəticəsi kimi ötürücü mühərrikinin gücündə avto rəqslərin yaranmasına gətirir. «Qazma kəməri - ötürücü» sistemində relaksasiya rəqslərinin Yaqubov–Perminov üsuluna əsasən kompensasiyası olunması təkliflərinə baxılmışdır.

**Açar sözlər:** qazma strategiyası; relaksasiya rəqsləri; dinamik tarazlıq; energetik balans; burucu avtorəqslər.