

## УСТОЙЧИВЫЕ МОМЕНТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИВОДОВ С ЭКСКАВАТОРНЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВРАЩАТЕЛЕЙ БУРОВЫХ СТАНКОВ ПРИ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ КАРЬЕРОВ КАРАКУБСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИЗВЕСТНЯКОВ

*В статье проведены результаты экспериментальных исследований по замеру нагрузок на приводных двигателях постоянного тока независимого возбуждения с экскаваторной характеристикой при работе буровых станков в реальных производственных условиях Каракубского месторождения известняков. Определены устойчивые моменты, необходимые для выбора рациональных параметров шарошечного бурового инструмента и режимов его работы и для выбора мощности привода вращателя станка. Определены потери энергии из-за работы приводов на вращателе бурового станка в переходных процессах, обусловленных динамическими изменениями моментов сил сопротивления на буровой инструмент и скоростей вращения двигателей.*

### **Ключевые слова:**

*Буровые станки шарошечного бурения, двигатели постоянного тока, экспериментальные исследования, устойчивый момент привода вращателя, потери энергии в переходных процессах.*

### **Постановка проблемы**

В настоящее время наибольшее распространение при бурении взрывных скважин на карьерах получило шарошечное бурение, которое наиболее эффективно при бурении скважин в скальных и полускальных породах практически в различных горно-геологических условиях. Для производства буровых работ на карьерах Каракубского месторождения применяются в основном станки шарошечного бурения типа СБШ-250-МНА 32, обладающие высокой универсальностью и значительным уровнем производительности. Для обеспечения дальнейшего повышения значений их эксплуатационной производительности и надежности необходимо установление рациональных параметров шарошечного бурового инструмента и режимов его работы, которое гарантируется полным использованием возможностей приводных электродвигателей вращателей при минимальных удельных энергетических затратах на разрушение породы в забоях скважин.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Бурение взрывных скважин шарошечным инструментом - сложный процесс, при котором горная порода в забое разрушается скалыванием, смятием, истиранием, усталостным разрушением и другими способами [1,2]. При этих видах разрушения формируются моменты и вертикальные

составляющие сил сопротивления на буровой головке. Причем спектральный состав нагрузок включают как высокочастотные слагаемые (до 100 Гц), так и низкочастотные слагающие (примерно 1,0...2 Гц) сил сопротивления.

Высокочастотные слагаемые нагрузки формируются за счет ударов при перекачивании шарошек буровых долот по забою. Высокая частота сопротивления породы зависит от количества и формы шарошек на буровых головках, размеров их диаметров, числа и формы зубьев шарошек [3].

Низкие частоты нагрузок формируется за счет изменчивости крепости буримой породы, трещиноватости, неоднородности и других горно-геологических факторов [4]. Кроме этих факторов на низкочастотные слагающие нагрузки влияют и кинематические параметры бурения.

Как известно, высокочастотные слагающие нагрузки сглаживаются электромеханической системой привода, а низкочастотные слагающие моменты сил сопротивления практически не выравниваются [5]. Это приводит к тому, что электродвигатели приводов вращателей при определенных условиях работают все время в переходных процессах, когда происходит переход электропривода из одного установившегося состояния в другое, когда изменяется его угловая скорость, момент и ток двигателя [6]. Работа двигателей в переходных процессах приводит к потере энергии и дополнительному их нагреву [7]. Поэтому необходимо установить порядок опре-

деления устойчивого момента двигателя постоянного тока независимого возбуждения с экскаваторной характеристикой и учитывать при выборе тепловой мощности привода вращателя потери энергии из-за переходных процессов, обусловленных динамическим характером момента сил сопротивления на буровом инструменте.

**Цель (задачи) исследования**

Целью исследований настоящей работы является повышение эффективности эксплуатации шарошечных буровых станков и повышение их показателей по производительности и по надежности, за счет определения показателей устойчивых моментов приводов вращателей, значения которых необходимы для выбора рациональных параметров шарошечных бурильных головок и рациональных режимов работы буровых станков, а также для выбора тепловой мощности двигателей постоянного тока с независимым возбуждением.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

- провести экспериментальные исследования в реальных производственных условиях (карьеров) Каракубского месторождения для получения зависимостей изменения скорости вращения приводных двигателей вращателей буровых станков в функции их нагруженности;
- определить устойчивые моменты двигателей постоянного тока с экскаваторной характеристикой приводов вращателей буровых станков, необходимые для выбора мощности двигателей и для выбора рациональных параметров шарошечного бурового инструмента и режимов его работы.
- установить зависимости, позволяющие определить потери энергии при работе двигате-

лей приводов вращателей буровых станков в переходных процессах, обусловленных динамическими изменениями моментов сил сопротивления на исполнительных органах станков.

**Основной материал исследования**

В качестве приводных электродвигателей на карьерах Каракубского месторождения применяются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением типа ДПВ-52 и ДПВ-72 при питании от тиристорного преобразователя ТПЭ 250/460.

При бурении горных пород со сложной структурой массивов карьеров рассматриваемого месторождения нагрузка привода вращателя носит изменчивый (динамичный) характер, обуславливаемый множеством факторов. Основными факторами являются изменение крепости горных пород как в одном слое, так и в различных слоях по глубине залегания, наличия трещиноватостей и неоднородностей, нарушений сплошности, а также наличия твердых включений (колчеданов и ожелезненных песчаных включений) в разрушаемых породах. Так, например, толщина слоев и коэффициент крепости пород при бурении изменяются случайным образом соответственно от 3 до 60 м и от 3 до 11 (по шкале профессора М.М. Протодыяконова), что оказывает значительное влияние на динамические процессы при бурении породы.

Поэтому для привода вращателей буровых станков шарошечного бурения широко применяют приводы постоянного тока с экскаваторной характеристикой, отличающиеся резким снижением скорости вращения при некотором, заранее определенном значении момента нагрузки  $M_{oc}$ . Общий вид экскаваторной характеристики приведен на рис. 1.

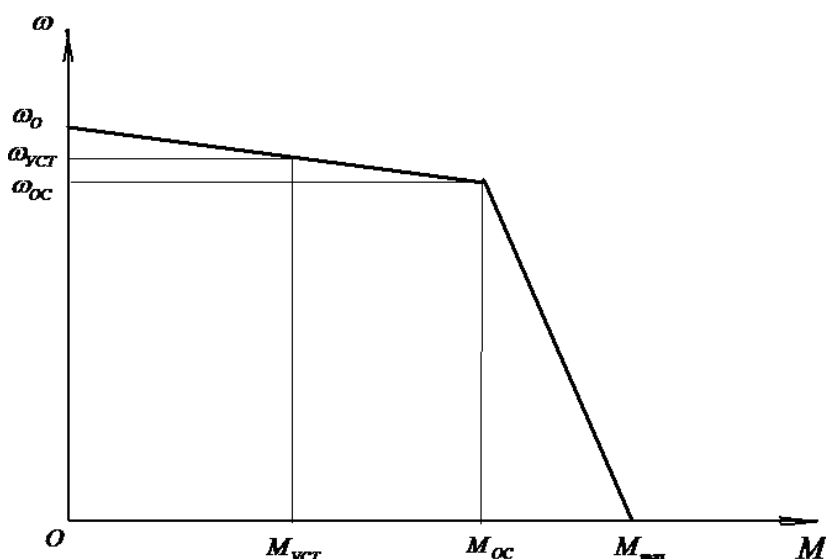


Рис. 1. Экскаваторная характеристика двигателя постоянного тока бурового станка

Обозначения, приведенные на рисунке:

$\omega_0$  – скорость холостого хода двигателя;

$M_{уст} \omega_{уст}$  – устойчивый момент и устойчивая скорость вращения двигателя;

$M_{ос}, \omega_{ос}$  – момент и скорость вращения отсечки двигателя;

$M_{max}$  – максимальный момент (момент стопорения при  $\omega_{max}=0$ ).

Коэффициент жесткости характеристики на участке А-В определяется зависимостью

$$k_{\beta AB} = \frac{M_{ос}}{\omega_0 - \omega_{ос}}, \quad (1)$$

Коэффициент жесткости характеристики на участке Б-В определяется зависимостью

$$k_{\beta BB} = \frac{M_{ос} - M_{max}}{\omega_0 - \omega_{ос}} \quad (2)$$

Двигатель с экскаваторной (саморазгружающейся) характеристикой подразумевает работу, в основном, с частотой вращения от  $\omega_0$  до  $\omega_{ос}$  на прямой А-Б механической характеристики вплоть до момента отсечки, затем скорость вращения снижается по линии Б-В и двигатель останавливается, но при этом крутящий момент на приводном валу сохраняется и несколько увеличивается по сравнению с моментом отсечки, но не так значительно, если бы работа происходила на продолжении линии А-Б с коэффициентом жесткости  $k_{\beta AB}$  и при этом в какой момент времени крутящий момент может превысить допустимый момент, исходя из прочности элементов бурового става, и при этом произойдет аварийный выход из строя бурового станка.

Когда, например, буровая головка упирается в

непреодолимое препятствие и крутящий момент, развиваемый приводом вращателя, недостаточных для поворота шарошечного бура, не должно происходить «опрокидывание» двигателя, т. е. падение оборотов и снижение момента на валу двигателя. Для сохранения наибольшей производительности станка желательно, чтобы двигатель работал с постоянной частотой вращения до момента отсечки (наибольшей нагрузки). Это означает, что механическая характеристика должна быть жесткой, состоять из рабочего участка с минимальной линейной зависимостью частоты вращения от момента и нерабочего участка, соответствующего падению частоты вращения при максимальном моменте стопорения.

Для получения экскаваторных характеристик электродвигателей приводов вращателей используются управляемые тиристорные преобразователи или схемы «генератор-двигатель» с так называемой обратной связью и с «отсечкой» при заданном моменте нагрузки  $M_{ос}$ .

В табл. 1 приведены значения крутящих моментов номинальных, отсечки, максимальных (стопорения) и соответствующих этим моментам скорости вращения двигателей.

В настоящей работе для получения данных о нагруженности электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения типа ДПВ-52 с экскаваторной характеристикой привода вращателя бурового станка при эксплуатации станка шарошечного бурения типа СБШ-250-МНА32 на карьере «Жеголевский» были проведены экспериментальные исследования. При исследованиях с помощью осциллографа GW INSTEK GDS – 840С регистрировались значения: момента сил сопротивления на валу; напряжение на клеммах; ток якоря двигателя. Фрагмент осциллограммы представлен на рис. 2.

Таблица 1. Экскаваторные характеристики двигателей постоянного тока

№ п/п	Тип двигателя	Номинальный момент, Н·м	Номинальная скорость, об/мин	Момент отсечки, Н·м	Скорость отсечки, об/мин	Момент стопорения, Н·м	Скорость стопорения, об/мин
1	ДПВ-52	466	1230	630	1400	930	0
2	ДПВ-72	1146	750	1550	825	2200	0

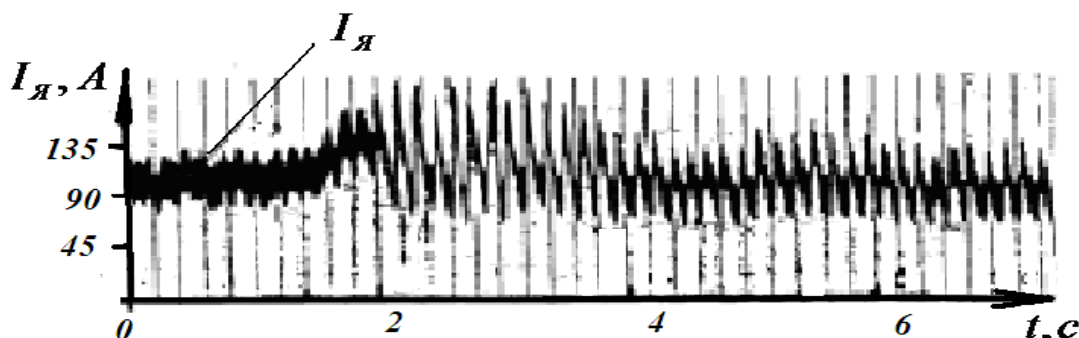


Рис. 2. Фрагмент осциллограммы записи тока якоря вращателя станка СБШ-250-МНА32

Из анализа полученных данных экспериментальных исследований следует, что среднее значение момента сопротивления  $M_{cp}$  на привод изменяется от 460 до 800 Н·м, амплитуда колебаний момента  $A_m$  составляет 160...210 Н·м, частота колебаний фиксировалась только низкочастотная составляющая 2,5...3.0 Гц при бурении с двумя буровыми штангами.

Коэффициент неравномерности низкочастотной слагающей нагрузки определяется по зависимости

$$K_n = (M_{cp} + A_m) / M_{cp} \quad (3)$$

Значения коэффициента неравномерности низкочастотной слагающей нагрузки из данных экспериментальных исследований  $K_n = 1,3 \dots 1,35$ .

Высокая частота, которая формируется при разрушении шарошками породы в забое скважины, не фиксировалась записывающей аппаратурой при записи нагрузки из-за того, что она практически сглаживалась электро-механической системой привода вращателя из-за большой инертности бурового става с буровой коронкой (т. е. буровой став выполняет роль маховика, сглаживающего нагрузку).

Как известно [7,8], переход из одного установившегося состояния электрического привода в другое состояние, при котором изменяются значения скорости вращения, крутящего момента и тока двигателя, называют переходным процессом приводящим к значительному росту потерь мощности и более интенсивному нагреву двигателя.

Из приведенных экспериментальных данных следует, что двигатель работает в переходном процессе, при этом экскаваторная характеристика привода оказывает значительное влияние на его показатели. Поскольку изменение момента сил сопротивления и скорости вращения двигателя не по линейной зависимости, а по ломаной зависимости, состоящей из двух линий А-Б и Б-В (см. рис. 1). На второй линии Б-В при увеличении значений момента происходит более резкое уменьшение скорости вращения двигателя, чем на линии А-Б.

Устойчивый момент двигателя постоянного тока независимого возбуждения с экскаваторной характеристикой следует определять по следующей зависимости [5], аналогичной устойчивому моменту асинхронного двигателя

$$M_y = \frac{K_{yn} M_{oc}}{K_n (1 + K_\sigma K_{вч})}, \quad (4)$$

где  $K_{yn}$  – коэффициент управления бурильным

станком;  $K_\sigma$  – коэффициент динамичности (сглаживания) высокочастотной слагающей нагрузки;  $K_{вч}$  – коэффициент высокочастотной слагающей нагрузки.

При высокой частоте значение коэффициента динамичности (сглаживания) высокочастотной слагающей нагрузки равен примерно нулю, поэтому выражение (4) можно представить в виде

$$M_y = M_{oc} / K_n. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что сумма значений устойчивого момента и амплитуды низкочастотной слагающей момента сил сопротивления не будут превышать момента отсечки  $M_{oc}$ , т.е.

$$M_y + A_m \leq M_{oc}. \quad (6)$$

Действующие в течение значительной части общего времени работы станка большие динамические нагрузки обуславливают основное количество тепловых потерь, выделяющегося в двигателе вращателя, и оказывают на его нагрев определяющее влияние.

Для количественного определения влияния переходных процессов электропривода на нагрев двигателя выполним расчет потерь энергии в двигателе за время переходных процессов [7,8].

В общем случае потери энергии в двигателях можно представлять в виде суммы потерь мощности  $\Delta P_n$ , постоянных потерь, не зависящих от нагрузки, и переменных потерь  $\Delta P_v$ , которые пропорциональны нагрузке двигателей

$$\Delta P = \Delta P_n + \Delta P_v \quad (7)$$

Постоянные потери  $\Delta P_n$  определяют потерями в электротехнической стали  $\Delta P_{cm}$  и механическими потерями  $\Delta P_{мех}$ .

Переменные потери  $\Delta P_v$  определяются потерями в меди, которые пропорциональны квадрату тока двигателя и сопротивлениям обмоток.

$$\Delta P_v = I_\alpha^2 R_\alpha \quad (8)$$

Поскольку потребляемая энергия якорем двигателя независимого возбуждения определяется мощностью  $P_\alpha = M \cdot \omega_\alpha$ , а электромагнитная мощность определяется произведением  $M\omega$ , то переменные потери  $\Delta P_v$  могут быть выражены также через электромагнитный момент и относительную скорость, а именно

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= M\omega_\alpha - M\omega = M(\omega_\alpha - \omega) = \\ &= M \omega_\alpha \frac{\Delta\omega}{\omega_\alpha} = P_{эм} \frac{\Delta\omega}{\omega_\alpha} \end{aligned} \quad (9)$$

где  $P_{эм}$  – электромагнитная мощность;  $\Delta\omega$ ,  $\omega_o$  – соответственно перепад угловой скорости, обусловленный моментом  $M$ , и угловая скорость идеального холостого хода.

При токах, соответствующих номинальным режимам двигателей при работе на естественных характеристиках, переменные потери можно определить по данным двигателя. Поэтому удобно выразить потери при токах, отличных от номинальных, через номинальные.

Определим кратность тока двигателей  $x$ , равную:

$$x = I_{я} / I_{я, ном} \quad (10)$$

или

$$\Delta P_v = \Delta P_{v, ном} x^2 \quad (11)$$

При введении отношения постоянных потерь к номинальным переменным потерям

$$\alpha = \Delta P_c / \Delta P_{v, ном} \quad (12)$$

Суммарные потери можно представить выражением

$$\Delta P_v = \Delta P_v (\alpha + x^2). \quad (13)$$

Значение коэффициента  $\alpha$  зависит от номинальной мощности, скорости и коэффициента исполнения двигателя и лежит в пределах  $\alpha = 0,5 \dots 2$ .

Потери энергии на участке механической характеристики А-Б при гармонических колебаниях момента сил сопротивления  $M = M_{ycm} + A_m \times \sin(\Omega t - \psi)$  и скорости двигателя

$$\omega = \omega_{ycm} + \Delta\omega \sin \Omega t.$$

Мгновенные значения мощности переменных потерь в двигателе постоянного тока определяются выражением

$$\Delta P_v(t) = M(t) [\omega_o - \omega(t)] \quad (14)$$

Выражение средних потерь за период колебаний момента и скорости получим из выражения

$$\Delta P_{v, cp} = \frac{\Omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\Omega} \left[ M_{ycm} + A_m \sin(\Omega t - \Psi) \right] \times \left[ \omega_o - \omega_{ycm} - \Delta\omega \sin \Omega t \right] dt \quad (15)$$

Интегрируя выражение (15), получим

$$\Delta P_{v, cp} = M_{ycm} (\omega_o - \omega_{ycm}) - A_m \Delta\omega \cos \psi. \quad (16)$$

Из выражения (16) следует, что при низких частотах значения  $\cos \psi$  отрицательны, а наличие колебаний скорости приводит к росту потерь энергии, тем больше, чем ниже частота этих колебаний.

### Выводы

Для обеспечения повышения значений эксплуатационной производительности и надежности буровых станков за счет выбора рациональных параметров шарошечного бурового инструмента и режимов его работы были проведены экспериментальные исследования в производственных условиях карьеров Каракубского месторождения известняков по замеру нагруженности двигателей постоянного тока независимо возбуждения с экскаваторной характеристикой.

При проведении исследований регистрировались значения крутящих моментов на валах двигателей вращателей, токов и скоростей их вращения.

Установлено, что приводы вращателей в основном эксплуатируются на более жесткой (горизонтальной) части механической характеристики двигателя, ниспадающая часть характеристики используется более редко и предназначена для предохранения от опрокидываний двигателей, неконтролируемого роста крутящих моментов, который может привести к поломке элементов шарошечных инструментов и приводов вращателя и поэтому двигатель останавливается, сохраняя крутящий момент.

Определено, что нагрузка на приводы вращателей с двигателем ДПВ-52 состоит в основном из низкочастотных составляющих (2,5...3,0 Гц), при этом крутящий момент на валу двигателя изменялся от 460 до 800 Н·м, амплитуда колебаний момента составила 160...210 Н·м, а значения коэффициента неравномерности низкочастотной слагающей нагрузки составляли 1,3...1,35.

Предложена зависимость для определения устойчивого момента двигателя постоянного тока независимо возбуждения с экскаваторной характеристикой, из которой следует, что сумма значений устойчивого момента и амплитуды низкочастотной слагающей момента сил сопротивления не превышают значения момента отсечки.

Для количественного определения влияния переходных процессов электропривода на нагрев двигателя предложены зависимости, позволяющие

щие выполнить расчет потерь энергии в двигателе за время переходных процессов и установлено, что наличие колебаний скорости вращения двигателя приводит к росту потерь энергии, тем больше, чем ниже частота колебаний.

**Литература**

1. Барон, Л. И. Разрушение горных пород шарошечным инструментом / Л.И. Барон, Л.Б. Глатман – М.: Наука, 1966. – 136 с.
2. Буткин, В. Д. Выбор и рациональная эксплуатация буровых инструментов и станков на карьерах: Монография / В. Д. Буткин, А. В. Гилев, Д. Б. Нехорошев, В. Т. Чесноков, и [др.] – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 235 с.
3. Гилев, А. В. Проектирование рабочих органов и режимных параметров буровых станков для сложноструктурных горных массивов: монография / А. В. Гилев, А. О. Шигин, В. Д. Буткин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 320 с.
4. Подэрни, Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2007, – 680 с.
5. Горбатов, П. А., Петрушкин, Г. В., Лысенко, Н. М., Павленко, С. В., Косарев, В. В. Горные машины для подземной добычи угля. // Учеб. пособие для вузов. Под общ. ред. Горбатова П. А. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Норд Компьютер, 2006. – 669 с.
6. Забудский, Е.И. Электрические машины. Ч. 4. Машины постоянного тока: Учебное пособие – М.: МГАУ, 2009. – 217 с.
7. Дементьев, Ю. Н., Чернышев, А. Ю., Чернышев, И. А. Д-30 Электрический привод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 232 с.
8. Ключев, В.И. Теория электропривода.– М.: Энергоатомиздат, 2001 – 704 с.

**N.G. Afendikov /Cand. Sci. (Eng.)/, O.F. Larionov**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**STABLE MOMENTS OF DIRECT CURRENT MOTORS OF DRIVES WITH EXCAVATOR MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROTATORS OF DRILLING RIGS WHEN OPERATING IN OPEN PITS OF THE KARAKUB LIMESTONE DEPOSIT**

**Background.** Establishment of rational parameters of the roller-cone tool of drilling rigs is possible with the full use of the capabilities of the drive electric motors of the rotators and the minimum specific energy costs for the destruction of rock in the bottomholes of the wells.

**Materials and/or methods.** To determine the stable moments of independent excitation direct current motors with excavator characteristics of rotator drives, experimental studies were carried out in the production conditions of the Karakub limestone deposit.

**Results.** A dependence is proposed for determining the stable moment of an independent excitation DC motor with an excavator characteristic, from which it follows that the sum of the values of the stable moment and the amplitude of the low-frequency component of the moment of resistance forces do not exceed the value of the cutoff moment.

**Conclusion.** For a quantitative determination of the influence of transient processes of an electric drive on the heating of the motor, dependences are proposed that allow calculating energy losses in the motor during the time of transient processes.

**Keywords:** rotary cutter drilling rigs, DC motors, experimental research, stable torque of the rotator drive, energy losses in transient processes.

**Сведения об авторе**

**Н.Г. Афендиков**  
 ORCID iD: 0000-0001-8876-7254  
 Телефон: +380 (71) 376-13-46  
 Эд. почта: an77tn@gmail.com

**О.Ф. Ларионов**  
 Телефон: +380 (50) 628-23-60  
 Эд. почта: an77tn@gmail.com

*Статья поступила 04.02.2021г.  
 © Н.Г. Афендиков, О.Ф. Ларионов, 2019  
 Рецензент д.т.н., проф. К.Н. Маренич*