

# РЕГУЛЯТОР СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ

В. М. Марасанов, Г. П. Дылдин

## Rotation speed regulator of the electric drive of the cone crusher

V. M. Marasanov, G. P. Dyldin

The maximum value of the output and the power consumption, as well as the smallest size of the crushing products, one can achieve with a certain combination of the stroke, the angle of incline and the oscillation frequency of the mobile body of the crusher, and the size of its unloading slot. One way to improve the efficiency of the crushing process is to control the oscillation frequency of the mobile body of the crusher. The authors propose control algorithms for changing the rotation speed of the electric drive that can achieve it. There are three types of control algorithms for implementation. One can implement the algorithm of the first type by including in the algorithmic scheme a relay element that stepwise changes the control signal at the input of the intensity controller with the corresponding changes in the armature current. The intensity controller appears in the structure in order to convert the step changes of the control signal into smooth ones in accordance with the restrictions imposed on the current and the acceleration of the electric motor. The technical implementation of the algorithm of the second type, by using special devices that measure the dynamic component of the current by drive acceleration, solves the problem of separating the static component from the full current of the electric motor during the transition process of handling the corrected task, when the dynamic component of the current appears. In the algorithm of the third type, the authors use the time principle to isolate the static current for control circuits, namely, the control process is carried out in two stages. The first stage is the formation and storage of the correction of the control signal during the steady motion of the electric drive; the second stage - testing of the control signal (realization of the correction signal formed at the first stage). The control process in this case looks like a series of successive corrections. In accordance to the algorithm of the third type, the control device by structure is a PI-regulator with digital input.

**Keywords:** crusher; performance; fineness; oscillation frequency; control algorithm; regulator with digital input.

Максимальное значение производительности и потребляемая мощность, а также наименьшая крупность продуктов дробления достигаются при определенном сочетании величины хода, угла наклона и частоты качаний подвижного органа дробилки, размера ее разгрузочной щели. Одним из способов повышения эффективности процесса дробления является управление частотой качаний подвижного органа дробилки. Этого можно достичь, изменяя скорость вращения электропривода в соответствии с предложенными авторами алгоритмами управления. Для реализации приняты три типа алгоритмов управления. Реализация алгоритма первого типа достигается путем включения в алгоритмическую схему релейного элемента, ступенчато изменяющего сигнал управления на входе задатчика интенсивности при соответствующих изменениях тока якоря. Задатчик интенсивности введен в структуру для того, чтобы преобразовать ступенчатые изменения сигнала управления в плавные в соответствии с ограничениями, накладываемыми на ток и ускорение электродвигателя. При технической реализации алгоритма 2-го типа путем использования специальных устройств, измеряющих динамическую составляющую тока по ускорению привода, решается задача выделения из полного тока двигателя его статической составляющей во время переходного процесса по обработке скорректированного задания, когда появляется динамическая составляющая тока. В алгоритме 3-го типа использован временной принцип выделения статического тока для цепей управления, а именно – процесс регулирования осуществляется в два этапа. 1-й этап – формирование и запоминание коррекции управляющего сигнала при установившемся движении электропривода; 2-й этап – отработка управляющего сигнала (реализация сформированного на 1-м этапе сигнала коррекции). Процесс управления в данном случае представляется в виде ряда последовательных коррекций. В соответствии с алгоритмом третьего типа управляющее устройство по структуре представляет собой ПИ-регулятор с дискретным входом.

**Ключевые слова:** дробилка; производительность; крупность; частота качаний; алгоритм управления; регулятор с дискретным входом.

Максимальное значение производительности и потребляемая мощность, а также наименьшая крупность продуктов дробления достигаются при определенном сочетании величины хода, угла наклона и частоты качаний подвижного органа дробилки, размера ее разгрузочной щели [1–7]. Величина максимального значения производительности, мощности, потребляемой на дробление, крупности продуктов дробления определяются прочностью, структурой и крупностью подвергающейся дроблению породы [8, 9]. Одним из способов повышения эффективности процесса дробления является управление частотой качаний подвижного органа дробилки [10–13].

Увеличение частоты качаний дробящего конуса дробилок повышает эффективность измельчения продуктов дробления и обеспечивает значительный экономический эффект, при этом количество крупных фракций в продуктах дробления уменьша-

ется. Получение высокой степени сокращения при значительной производительности практически возможно и целесообразно только при работе с повышенным числом качаний подвижного конуса дробилки [2, 3].

### Влияние частоты качаний на гранулометрический состав продуктов дробления.

Число качаний дробящего конуса, мин <sup>-1</sup> ...	224	270	338
Размер разгрузочной щели, мм .....	6,1	7,1	6,3
Содержание фракции +20 мм, % .....	9,5–11,0	2,5–6,0	1,0

С увеличением частоты качаний потребляемая на дробление мощность снижается, так как максимальное значение крутящего момента на приводном валу дробилки в этом случае уменьшается за счет снижения амплитуды колебаний, возникающих при попадании в дробящее пространство кусков руды большей прочности (рис. 1).

### Мощность, потребляемая на дробление дробилкой КМД 2200-600.

Частота качаний конуса, мин <sup>-1</sup> .....	224	270	338
Производительность дробилки, т/ч .....	300	300	300
Степень сокращения .....	4,5	4,5	4,5
Мощность, потребляемая двигателем дробилки, кВт .....	182	138	94

Проведенные специальные исследования позволяют сделать вывод, что повышения эффективности процесса дробления на конусной дробилке можно достичь, изменяя скорость вращения электропривода в соответствии с полученными алгоритмами управления. При разработке регулятора скорости вращения электропривода конусной дробилки необходимо учитывать следующие обстоятельства:

– во-первых, приводной вал подвижного конуса установлен в конусной втулке. При высокой частоте качаний и отсутствии материала в дробящем пространстве подвижный конус выдвигается вверх и упирается в неподвижный, что приводит к разрушению футеровки конусов;

– во-вторых, регулируемый электропривод может быть выполнен принципиально различными схемами: тиристорный электропривод постоянного тока, асинхронный вентильный

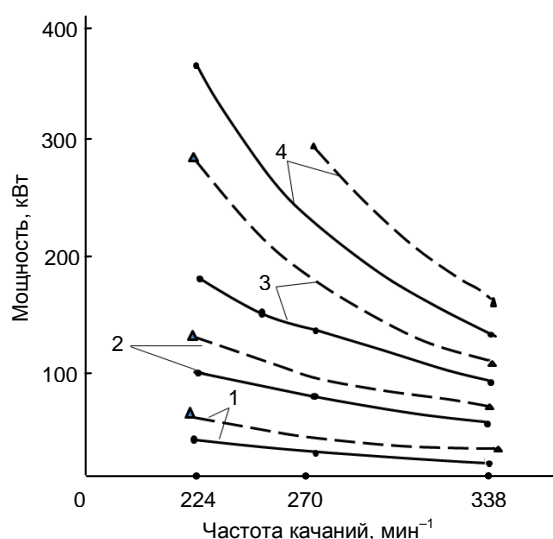


Рисунок 1. Расход энергии на дробление магнетитовых руд дробилкой КМД 2200-600 при степени дробления:  $i = 4,5$  (сплошная линия);  $i = 5,0$  (пунктирная линия); 1, 2, 3, 4 – при производительности 100, 200, 300 и 400 т/ч.

каскад, асинхронный электродвигатель с частотным регулированием и т. д.;

– в-третьих, рекомендуемые алгоритмы управления, достаточно приближенные, могут быть уточнены только в процессе экспериментальных исследований;

– в-четвертых, работа дробилки с высокой частотой качаний может выполняться только при наличии материала в дробящем пространстве.

Перечисленные соображения и обуславливают ряд специфических требований, предъявляемых к конструкции и схеме регулятора:

а) регулятор должен реализовать рекомендуемые алгоритмы управления с достаточной точностью;

б) схема регулятора должна обеспечивать возможность некоторого варьирования структуры и коэффициентов алгоритмов управления;

в) конструкция и параметры регулятора должны обеспечивать возможность комплектования с различными системами регулируемого электропривода;

г) схема регулятора должна обеспечивать возможность согласования с входными устройствами серийно выпускаемых вентильных преобразователей;

д) схема регулятора должна обеспечивать возможность перехода на ручное управление.

Выполнение перечисленных требований позволит решить основные задачи, связанные с применением регулятора в

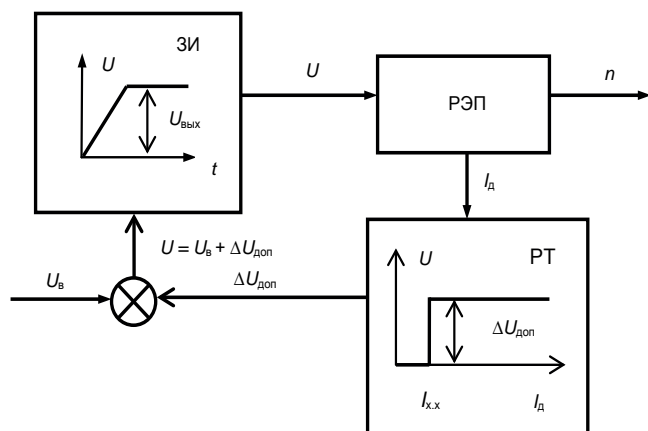


Рисунок 2. Структурная схема алгоритма управления первого типа.

процессе исследований, и экспериментально проверить и уточнить расчетные алгоритмы управления.

Принципы реализации рекомендуемых алгоритмов управления. Для реализации приняты три типа алгоритмов управления: первый из них достаточно прост, но имеет приближенный характер (алгоритм 1-го типа), второй определяет характер управления более полно (алгоритм 2-го типа). В соответствии с алгоритмом 3-го типа управляющее устройство по структуре представляет собой ПИ-регулятор с дискретным входом.

Алгоритм управления 1-го типа имеет вид:

$$n = n_6 + n_{доп} \text{ при } I_{д.с} > 2I_{x.x}, \quad (1)$$

где  $n$  – скорость вращения электропривода;  $n_6$  – базовая скорость вращения, соответствующая минимальной скорости в процессе регулирования;  $n_{доп}$  – рекомендуемая добавочная скорость при работе дробилки под нагрузкой;  $I_{д.с}$  – статический ток двигателя;  $I_{x.x}$  – статический ток, соответствующий холостому ходу двигателя.

С учетом того что сигнал управления, поступающий с выхода регулятора на вход системы управления приводом, и скорость вращения  $n$  связаны однозначной зависимостью

$$n = k_n U, \quad (2)$$

где  $k_n$  – коэффициент передачи по каналу напряжение–скорость, выражение (1) можно интерпретировать в виде

$$k_n U = k_n U_6 + k_n U_{доп} \text{ при } I_{д.с} > 2I_{x.x} \quad (3)$$

или

$$U = U_6 + U_{доп} \text{ при } I_{д.с} > 2I_{x.x}. \quad (4)$$

Алгоритмическая структура, реализующая зависимость (1)–(4), представлена на рис. 2. Реализация достигается путем включения в схему релейного элемента, ступенчато изменяющего сигнал управления на входе датчика интенсивности ЗИ при соответствующих изменениях тока якоря. Датчик интенсивности введен в структуру для того, чтобы преобразовать ступенчатые изменения сигнала управления в плавные в соответствии с ограничениями, накладываемыми на ток и ускорение электродвигателя. На рис. 2 обозначены: ЗИ – датчик интенсивности, РЕП – регулируемый электропривод, РТ – реле тока.

Алгоритм управления второго типа

$$n = n_6 + n_{доп} + k_1 Q - k_2 I_{д.с} \text{ при } I_{д.с} > 2I_{x.x}, \quad (5)$$

где  $k_1, k_2$  – постоянные коэффициенты;  $Q$  – производительность дробилки;  $I_{д.с}$  – статический ток двигателя.

Представим скорость в процессе регулирования в виде

$$n = n_6 + n_{доп} + \Delta n, \quad (6)$$

где  $\Delta n$  – дополнительный прирост скорости (коррекция скорости) в соответствии с алгоритмом управления:

$$\Delta n = k_1 Q - k_2 I_{д.с}. \quad (7)$$

Разделив обе части выражений (6) и (7) на  $k_n$  в соответствии с (3), получим

$$\Delta U = \left| \frac{k_1}{k_n} Q - \frac{k_2}{k_n} I_{д.с} \right| \quad (8)$$

и

$$U = U_6 + U_{доп} + \Delta U. \quad (9)$$

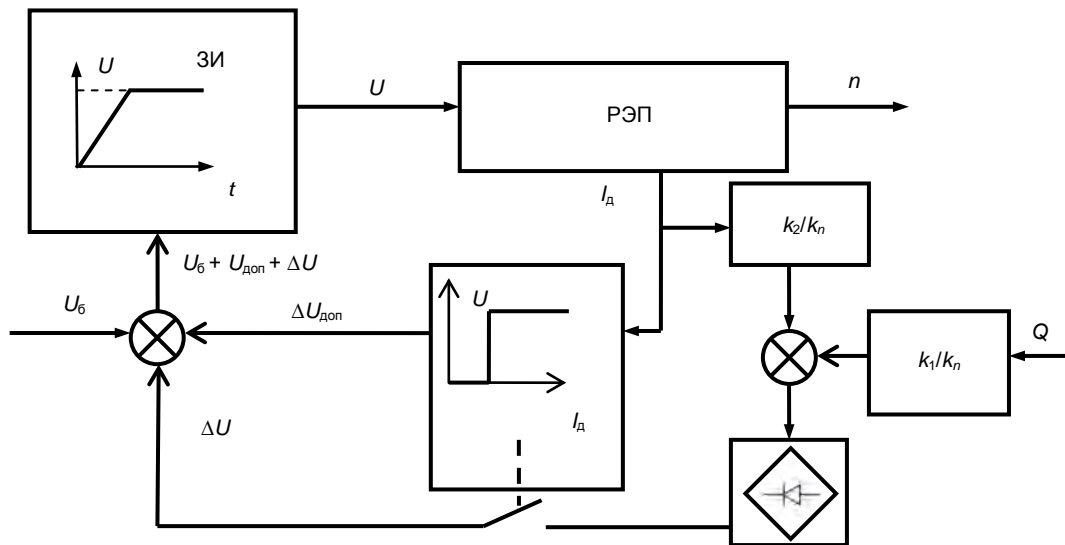


Рисунок 3. Структурная схема алгоритма управления второго типа.

Зависимости (8) и (9), описывающие рекомендованный алгоритм управления, могут быть реализованы с помощью алгоритмической структуры, показанной на рис. 3.

Существенную трудность при технической реализации алгоритма 2-го типа в соответствии с алгоритмической структурой рис. 3 представляет задача выделения из полного тока двигателя его статической составляющей во время переходного процесса по обработке скорректированного задания, когда появляется динамическая составляющая тока. Тогда задача решается путем использования специальных устройств, измеряющих динамическую составляющую тока по ускорению привода, что позволяет выделить статический ток двигателя в соответствии с известной зависимостью

$$I_{д.с} = I_{д} + I_{д.д}, \tag{10}$$

где  $I_{д}$  – полный ток двигателя;  $I_{д.д}$  – динамическая составляющая тока двигателя.

Однако техническая реализация такого решения относительно сложна. Значительно проще можно решить

указанную задачу, если исходить из предпосылки, что на эффективность процесса дробления быстродействие регулятора не оказывает заметного влияния. Действительно, для процесса дробления характерно постоянство возмущающих воздействий, изменение скорости требуется не часто, а появление динамической составляющей тока обусловлено исключительно отработкой управляющего воздействия. В этих условиях можно использовать временной принцип выделения статического тока для цепей управления, а именно, осуществлять процесс регулирования в два этапа.

1-й этап – формирование и запоминание коррекции управляющего сигнала  $\Delta U$  при установившемся движении электропривода;

2-й этап – отработка сигнала  $\Delta U$  (реализация сформированного на 1-м этапе сигнала коррекции).

Поскольку при этом формирование корректирующего сигнала управления  $\Delta U$  предполагается только при условии установившегося режима, когда  $I_{д} = I_{д.с}$  (при обработке коррекции формирование сигнала не производится), то процесс управления

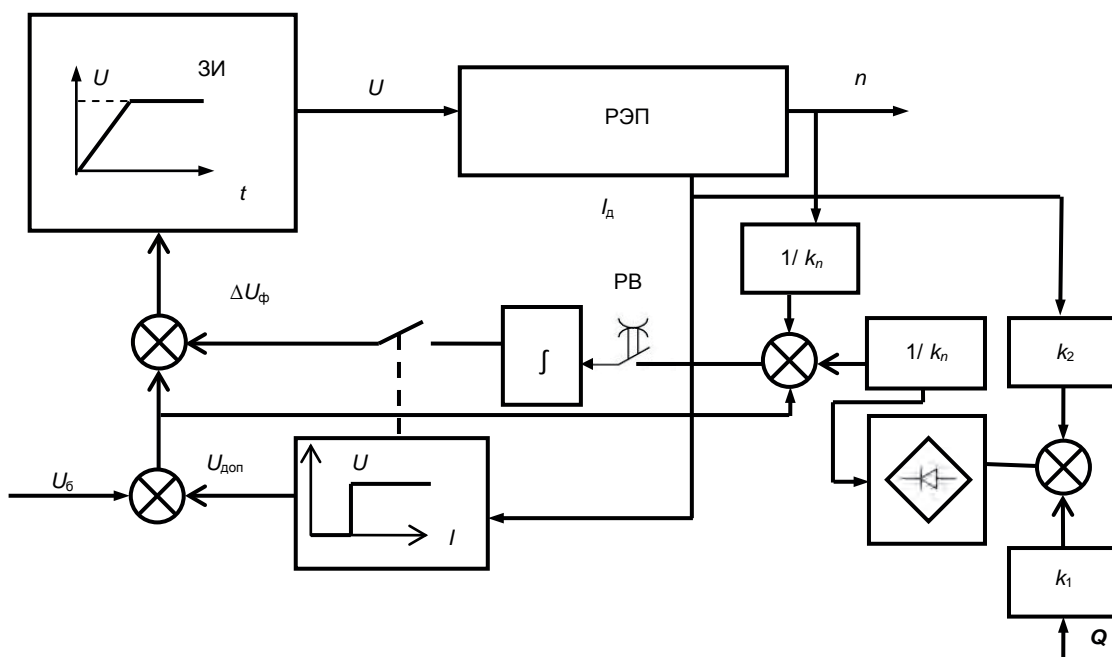


Рисунок 4. Структурная схема алгоритма управления третьего типа.

представляется в виде ряда последовательных коррекций в соответствии с алгоритмом управления.

Реализация алгоритма управления по описанному принципу достигается с помощью алгоритмической структуры, приведенной на рис. 4.

Согласно этой структуре, формирование сигнала коррекции  $\Delta U$  производится интегратором, вход которого периодически подключается через релейный элемент РВ к выходу сумматора, реализующего отклонение фактического режима от расчетного:

$$\Delta n_{\phi} = n - n_{\phi} = n_0 + n_{\text{доп}} + |k_1 Q - k_2 I_n| - n_{\phi}, \quad (11)$$

или, с учетом выражений (1)–(3)

$$\Delta U_{\phi} = U_0 + U_{\text{доп}} + \frac{1}{k_n} I_n - \frac{1}{k_n} n_{\phi}, \quad (12)$$

где  $n_{\phi}$  – фактическое значение скорости вращения.

Длительность включения интегратора элементом РВ устанавливается ниже времени запаздывания  $t_{\text{зан}}$  по каналу выход интегратора – вход системы управления электроприводом, а время отключения интегратора  $t_{\text{откл}}$  выше длительности переходного процесса  $t_{\text{п.п}}$ , обусловленного реализацией электроприводом сигнала коррекции на шаге управления:

$$\Delta t_{\text{и}} < t_{\text{зан}}, \quad (13)$$

$$t_{\text{откл}} > t_{\text{п.п.}} \quad (14)$$

По этой причине процесс интегрирования происходит в период работы электропривода в установившемся режиме. Величина интегрируемого сигнала определяется знаком и величиной сигнала на выходе сумматора и выбранным временем интегрирования  $\Delta t_{\text{и}}$ . При работе электропривода в расчетной точке сигнал  $\Delta U_{\phi}$  на входе сумматора равен нулю, и при очередном подключении интегратора сигнал коррекции  $\Delta U_{\phi}$  на его выходе не изменяется. При работе привода с отклонением от расчетного режима сигнал коррекции изменяется ступенчато при каждом включении РВ на время  $t_{\text{и}}$  до тех пор, пока привод в процессе регулирования скорости не станет работать в расчетном режиме.

Для обеспечения плавного изменения сигнала управления на входе преобразователя регулируемого электропривода при ступенчатом изменении сигнала управления  $U_{\text{доп}} + \Delta U_{\phi}$  в систему введен датчик интенсивности ЗИ. Таким образом, в соответствии с 3-м алгоритмом управляющее устройство по структуре представляет собой ПИ-регулятор с дискретным входом.

#### Заключение

Регулятор скорости конусной дробилки, осуществляющий управление в соответствии с предложенными авторами алгоритмами, позволяет увеличивать частоту качаний дробящего конуса дробилок с целью повышения эффективности измельчения продуктов дробления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белуженко В. М., Марасанов В. М. Расчет оптимальных режимов работы конусных дробилок // Изв. вузов. Горный журнал. 1984. № 2. С. 99–102.
2. Панкратов С. А., Болдов Ю. В., Пихаленко И. Г. Повышение эффективности процессов мелкого дробления // Горный журнал. 1968. № 2. С. 60–64.
3. Марасанов В. М., Дылдин Г. П. Идентификация, оптимизация и автоматизация процесса дробления. Екатеринбург: УГГУ, 2017. 268 с.
4. Прокофьев Е. В. Автоматизация технологических процессов и производств. Екатеринбург: УГГУ, 2013. 356 с.
5. Определение режимов работы ДСЦ Г.-П.П. «Гора Хрустальная» с целью повышения выпуска требуемых фракций с минимальной себестоимостью: отчет о НИР / СГИ; науч. рук. Марасанов В. М., отв. исп. Дылдин Г. П. Екате-

ринбург, 1997. № ГР 01970000392. Инв. № 02980000377.

6. Дылдин Г. П. Оптимизация производства технического кварца // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья: междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2003. С. 462–464.
7. А. с. 1020160 СССР, МКИ В 02 25/00. Способ регулирования режима работы дробилки / В. М. Марасанов (СССР). № 3397510/29–33; заявл. 21.01.82; опубл. 30.05.83, Бул. № 20.
8. Андреев Е. Е., Тихонов О. Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. СПб., 2007. 439 с.
9. Газалева Г. И., Цыпин Е. Ф., Червяков С. А. Рудоподготовка. Дробление, грохочение, обогащение. Екатеринбург: ООО «УЦАО», 2014. 914 с.
10. Определение оптимальных режимов работы технологической линии ДСЦ Исетского шехбавода с целью повышения ее эффективности: отчет о НИР / СГИ; науч. рук. Марасанов В. М., отв. исп. Дылдин Г. П. Свердловск, 1991. № ГР 01910013294.
11. Боровков В. А., Марасанов В. М., Дылдин Г. П. Система автоматического регулирования режима работы дробилки // Автоматическое управление технологическими процессами в горной промышленности: межвуз. науч.-темат. сб. Свердловск, 1987. С. 104–107.
12. Лагунова Ю. А., Лазарев Е. А., Жиганов П. А. Новые направления в проектировании и эксплуатации горно-обогатительного оборудования // ГИАБ. 2006. Вып. № 6. С. 301–305.
13. RU 2508948 C2. Method of control over crusher and crusher. Inventor: LEKHTONEN Tommi (FI), POTILA Tapio (FI). Proprietor: METSO MINERELZ INK. (FI); Application 2009137456/02, 05.04.2007; Date of publication 10.03.2014 Bull. 7.

#### REFERENCES

1. Beluzhenko V. M., Marasanov V. M. 1984, *Raschet optimal'nykh rezhimov raboty konusnykh drobilok* [Calculation of optimum operating conditions of cone crushers]. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 2, pp. 99–102.
2. Pankratov S. A., Boldov Yu. V., Pikhaleiko I. G. 1968, *Povyshchenie effektivnosti protsessov melkogo drobleniya* [Increase of efficiency of processes of fine crushing]. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 2, pp. 60–64.
3. Marasanov V. M., Dyldin G. P. 2017, *Identifikatsiya, optimizatsiya i avtomatizatsiya protsessa drobleniya* [Identification, optimization and automation of the crushing process], Ekaterinburg, 268 p.
4. Prokof'ev E. V. 2013, *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv* [Automation of technological processes and productions], Ekaterinburg, 356 p.
5. Marasanov V. M., Dyldin G. P. 1997, *Opreделение rezhimov raboty DSTs G.-P.P. «Gora Khrustal'naya» s tsel'yu povysheniya vypuska trebuyemykh fraktsiy s minimal'noy sebestoimost'yu: otchet o NIR / SGI* [Defining modes of DSC Mining and Industrial Engineering "Crystal Mountain" to increase the release of the required fractions with minimal cost: research report], Ekaterinburg, № GR 01970000392. Inv. № 02980000377.
6. Dyldin G. P. 2003, *Optimizatsiya proizvodstva tekhnicheskogo kvartza* [Optimization of production of technical quartz]. *Nauchnye osnovy i praktika razvedki i pererabotki rud i tekhnogenogo syr'ya: mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* [Scientific bases and practice of prospecting and processing of ores and technogenic raw materials: international scientific-technical conference], Ekaterinburg, pp. 462–464.
7. А. с. 1020160 SSSR, МКИ В 02 25/00. *Sposob regulirovaniya rezhima raboty drobilki / V. M. Marasanov (SSSR). № 3397510/29–33; yayavl. 21.01.82; opubl. 30.05.83, Byul. № 20* [A. s. 1020160 USSR, МКИ В 02 25/00. A way of regulating the operating mode of the crusher. Marasanov V. M. (USSR), no. 3397510/29–33; claimed 21.01.82; published 30.05.83, Bull. no. 20].
8. Андреев Е. Е., Тихонов О. Н. 2007, *Droblenie, izmel'chenie i podgotovka syr'ya k obogashcheniyu* [Crushing, grinding and preparation of raw materials for enrichment], St. Petersburg, 439 p.
9. Gazaleeva G. I., Tsyypin E. F., Chervyakov S. A. 2014, *Rudopodgotovka. Droblenie, grokhochenie, obogashchenie* [Ore preparation. Crushing, screening, dressing], Ekaterinburg, 914 p.
10. Marasanov V. M., Dyldin G. P. 1991, *Opreделение optimal'nykh rezhimov raboty tekhnologicheskoy linii DSTs Isetskogo shchebzavoda s tsel'yu povysheniya ee effektivnosti: otchet o NIR / SGI* [Determination of the optimal operating modes of the shunting controller of Isetsky chipper plant for the purpose of increasing its efficiency: research report], Sverdlovsk, № GR 01910013294.
11. Bоровков V. A., Marasanov V. M., Dyldin G. P. 1987, *Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya rezhima raboty drobilki* [Automatic control system of crusher operation mode]. *Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami v gomoy promyshlennosti: mezhvuz. nauch.-temat. sb.* [Automatic control of technological processes in the mining industry: interuniversity scientific-thematic collection], Sverdlovsk, pp. 104–107.
12. Lagunova Yu. A., Lazarev E. A., Zhiganov P. A. 2006, *Novye napravleniya v proektirovani i ekspluatatsii gorno-obogatitel'nogo oborudovaniya* [New directions in the design and operation of ore mining and processing equipment]. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin], no. 6, pp. 301–305.
13. RU 2508948 C2. Method of control over crusher and crusher. Inventor: LEKHTONEN Tommi (FI), POTILA Tapio (FI). Proprietor: METSO MINERELZ INK. (FI); Application 2009137456/02, 05.04.2007; Date of publication 10.03.2014 Bull. 7.

Виктор Михайлович Марасанов,  
v.marasanoff@yandex.ru

Герман Петрович Дылдин,  
German.Dyldin@yandex.ru  
Уральский государственный горный университет  
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Viktor Mikhailovich Marasanov,  
v.marasanoff@yandex.ru

German Petrovich Dyldin,  
German.Dyldin@yandex.ru  
Ural State Mining University  
Ekaterinburg, Russia