

УДК 622.232.7

**О.Е.Шабаетв**, канд. техн. наук, доц., **А.К.Семенченко**, докт. техн. наук, проф., **Н.В.Хиценко**, канд. техн. наук, доц.,  
Донецкий национальный технический университет

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА МЕХАТРОННОГО ВЫЕМОЧНОГО КОМБАЙНА**

*Разработаны математические модели функционально законченных элементов «преобразователь частоты» и «асинхронный электродвигатель», позволяющие выполнять имитационное моделирование рабочего процесса мехатронного горного комбайна с частотно регулируемым приводом*

**мехатроника, выемочный комбайн, частотно регулируемый привод, преобразователь частоты, имитационное моделирование**

**Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.** Важной особенностью условий работы горных выемочных машин является наличие существенного разброса прочностных характеристик разрушаемых пород в пределах одного забоя. Это обуславливает необходимость регулирования нагрузки на привод исполнительного органа для максимального использования установленной мощности как одного из условий достижения максимальной производительности. Современным направлением совершенствования выемочных машин является оснащение их частотно регулируемыми приводами, эффективное функционирование которых возможно лишь при использовании мехатронных подходов к проектированию [1]. Одной из основных проблем при этом является выбор рациональных параметров и алгоритмов функционирования преобразователя частоты напряжения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, который имеет преимущественное применение в приводе горных выемочных машин. Частотно регулируемый привод (рис. 1) включает звено постоянного тока 1-2, инвертор 3 и фильтр 4, сглаживающий напряжение переменной частоты, подаваемое на асинхронный электродвигатель. Ввиду ограниченности габаритов горных машин, фильтр 4, как правило, в приводе не устанавливается. В результате на вход двигателя подается импульсное питающее напряжение. Выбор рациональных параметров и алгоритмов функционирования частотного преобразователя предусматривает отсутствие существенного влияния этого возмущения на динамические процессы в сило-

вых системах горной машины. Решение этой проблемы возможно на основе применения методов имитационного математического моделирования.

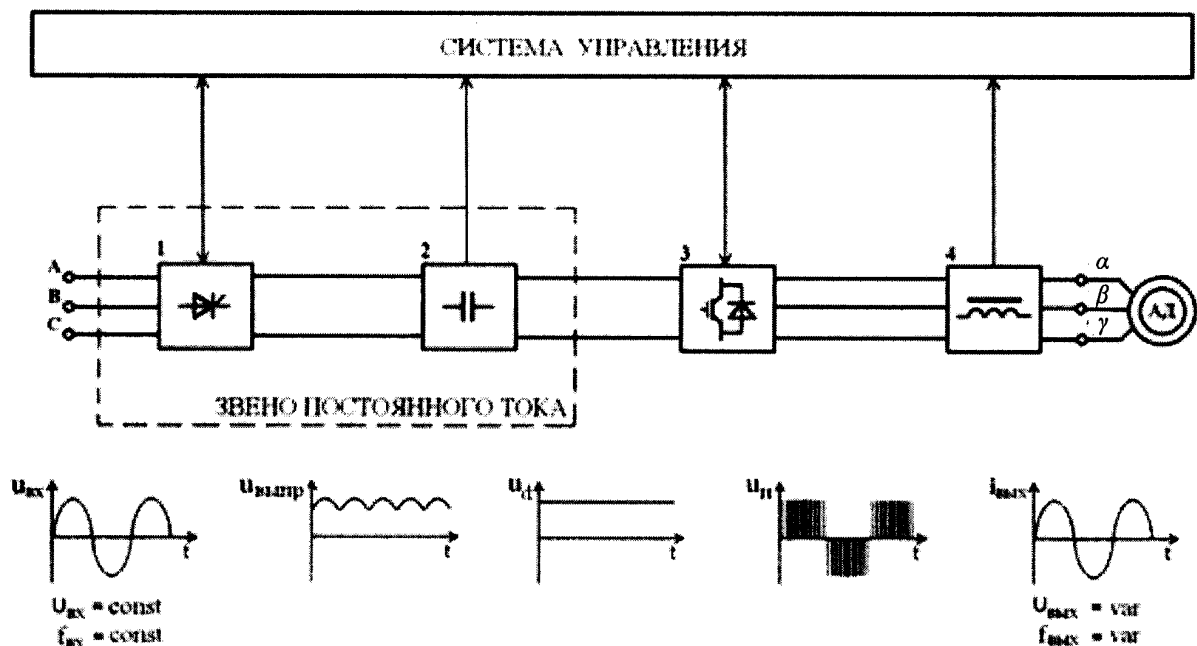


Рисунок 1 – Структурная схема частотно регулируемого привода

**Анализ исследований и публикаций.** Математическое моделирование функционирования горных выемочных машин может быть наиболее эффективно реализовано на основе системного представления о машине как о совокупности взаимосвязанных функционально законченных элементов (ФЗЭ), каждый из которых описывается частной математической моделью (ММ) [2]. В частности, для имитационного моделирования может быть применена приведенная в работе [3] модель рабочего процесса проходческого комбайна, в которой для описания ФЗЭ «Асинхронный электродвигатель» использована математическая модель Парка-Горева [4, 5]. В модели ФЗЭ «Асинхронный электродвигатель» согласно питающее напряжение задается в виде синусоиды. Таким образом, модель [3] для исследований частотно регулируемого привода требует доработки, заключающейся в разработке ММ ФЗЭ «Преобразователь частоты» и адаптации ММ ФЗЭ «Асинхронный электродвигатель» к условиям питания импульсным напряжением с учетом [6].

**Постановка задачи.** С учетом вышеизложенного, цель статьи - разработка ММ ФЗЭ «Преобразователь частоты» и «Асинхронный

электродвигатель» для описания рабочего процесса частотно регулируемого привода мехатронного выемочного комбайна.

**Изложение материала и результаты.** В соответствии со сформулированной проблемой, при оценке влияния импульсного возмущения на динамические процессы в силовых системах горной машины можно пренебречь динамическими процессами в преобразователе частоты. При этом ММ ФЗЭ «Преобразователь частоты» может описывать только изменение напряжения на его выходе.

Напряжение в сети изменяется по синусоидальному закону с амплитудой  $U_m$ . После выпрямителя получаем напряжение постоянного тока  $U'_m = \sqrt{\frac{2}{3}}U_m$ . Инвертор выдает последовательность импульсов постоянного тока (рис. 2), форма и периодичность которых определяется системой интеллекта машины [3].

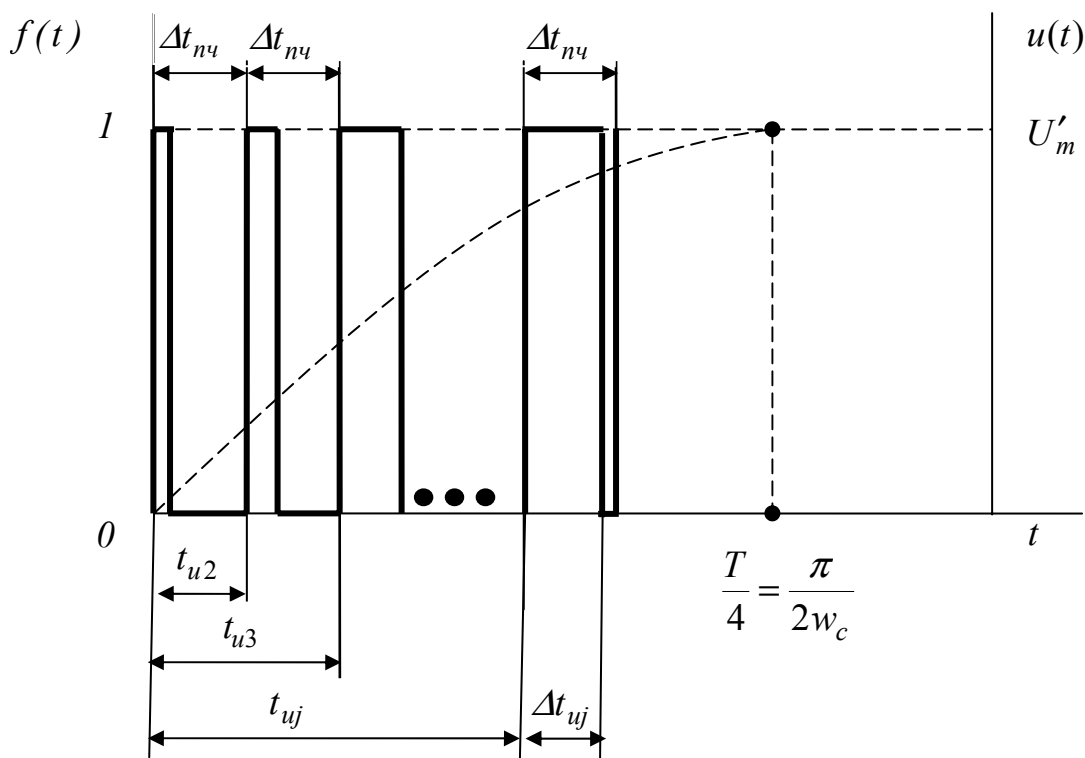


Рисунок 2 – Диаграмма формирования импульсов питающего напряжения

Любая периодическая функция  $f(t)$  с периодом  $T$  может быть разложена в ряд Фурье. Поэтому для формирования диаграммы импульсов питающего напряжения достаточно задать их только лишь за половину периода синусоидальной функции  $f(t)$ , т.к. импульсы напряжения второго полупериода будут совпадать с импульсами перво-

го полупериода, взятыми с противоположным знаком. При таком подходе ММ ФЗЭ «Преобразователь частоты» может быть представлена в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_k = \frac{2}{k\pi} \sqrt{\frac{2}{3}} U_m \sum_{j=1}^{n_{um}} [\cos(k\pi t_{uj}) - \cos(k\pi(t_{uj} + \Delta t_{uj}))], \quad k = 1 \div n_k; \\ \omega_{c_i} = \omega_{c_{i-1}} + \Delta t (V_\omega + k_{V\omega} |\omega_{cy} - \omega_{c_{i-1}}|) \cdot \text{sign}(\omega_{cy} - \omega_{c_{i-1}}); \\ U_{\alpha_i} = \sum_{k=1}^{n_k} u_k \sin(k\omega_{c_i} t); \quad U_{\beta_i} = \sum_{k=1}^{n_k} u_k \sin\left(k\omega_{c_i} t + \frac{2\pi}{3}\right); \\ U_{\gamma_i} = \sum_{k=1}^{n_k} u_k \sin\left(k\omega_{c_i} t + \frac{4\pi}{3}\right); \end{array} \right.$$

где  $u_k$  - амплитуда  $k$ -той гармоники напряжения;  $n_{um}$  - число импульсов питающего напряжения;  $n_k$  - число гармоник питающего напряжения;  $t_{uj}$  - значения моментов времени начала подаваемых импульсов, соответствующие несущей частоте преобразователя  $f_{nc}$ ,  $t_{uj} = j\Delta t_{nc}$ ;  $\Delta t_{nc}$  - период открытия ключа инвертора, соответствующий несущей частоте;  $\omega_{c_i}$ ,  $\omega_{c_{(i-1)}}$  - значения угловой скорости питающего напряжения на  $i$ -том и  $(i-1)$ -м шагах моделирования;  $\Delta t$  - шаг моделирования;  $V_\omega$  - постоянная скорости изменения угловой скорости питающего напряжения;  $k_{V\omega}$  - коэффициент пропорциональности между скоростью изменения угловой скорости питающего напряжения и его отклонением от заданной системой интеллекта синхронной угловой скорости  $\omega_{cy}$ ;  $U_m$  - амплитуда напряжения на входе преобразователя частоты;  $U_{\alpha_i}$ ,  $U_{\beta_i}$ ,  $U_{\gamma_i}$  - напряжения в соответствующих фазах на выходе преобразователя на  $i$ -том шаге моделирования.

Как показали результаты предварительных модельных исследований работы преобразователя частоты согласно приведенной модели, даже при относительно небольшом числе импульсов в полупериоде (порядка 10-20) для корректной замены получаемой пилообразной кривой рядом Фурье требуется значительное число гармоник (более 300). В качестве примера на рис. 3 приведена аппроксимация

полупериода питающего напряжения при 20 импульсах и 300 гармониках. Как видно из рисунка, полученная кривая не вполне соответствует требуемой форме. Учет большого числа гармоник требует значительного объема вычислений при моделировании, поэтому более целесообразно для воспроизведения сигнала питающего напряжения на выходе преобразователя частоты использовать логические функции.

ММ ФЗЭ «Преобразователь частоты» с использованием логических функций может быть представлена в виде (модель приведена для фазы  $\alpha$ , для фаз  $\beta$  и  $\gamma$  зависимости отличаются соответствующим индексом):

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{ci} = \omega_{c(i-1)} + \Delta t (V_{\omega} + k_{V\omega} |\omega_{cy} - \omega_{c(i-1)}|) \cdot \text{sign}(\omega_{cy} - \omega_{c(i-1)}); \\ (\Delta \bar{t}_u, n_{um})_i = f(\omega_{ci}, V_{\omega}, k_{V\omega}, \omega_{cy}); \\ U_{\alpha i} = \begin{cases} U_m Z_{\alpha(i-1)} & \text{при } \tau_{u\alpha(i-1)} > 0; \\ 0 & \text{при } \tau_{u\alpha(i-1)} \leq 0; \end{cases} \\ \tau_{\alpha i} = \begin{cases} \tau_{\alpha(i-1)} - \Delta t & \text{при } ]t_i / \Delta t_{nc} [= ]t_{(i-1)} / \Delta t_{nc} [; \\ \Delta t_{uj\alpha i} & \text{при } ]t_i / \Delta t_{nc} [> ]t_{(i-1)} / \Delta t_{nc} [; \end{cases} \\ j_{\alpha i} = \begin{cases} j_{\alpha(i-1)} & \text{при } ]t_i / \Delta t_{nc} [= ]t_{(i-1)} / \Delta t_{nc} [; \\ j_{\alpha(i-1)} + 1 & \text{при } ]t_i / \Delta t_{nc} [> ]t_{(i-1)} / \Delta t_{nc} [ \text{ и } j_{\alpha(i-1)} < n_{um}; \\ 1 & \text{при } ]t_i / \Delta t_{nc} [> ]t_{(i-1)} / \Delta t_{nc} [ \text{ и } j_{\alpha(i-1)} \geq n_{um}; \end{cases} \\ Z_{\alpha i} = \begin{cases} Z_{\alpha(i-1)} & \text{при } ]t_i / \Delta t_{nc} [= ]t_{(i-1)} / \Delta t_{nc} [ \text{ или } j_{\alpha(i-1)} < n_{um}; \\ -Z_{\alpha(i-1)} & \text{при } ]t_i / \Delta t_{nc} [> ]t_{(i-1)} / \Delta t_{nc} [ \text{ и } j_{\alpha(i-1)} \geq n_{um}, \end{cases} \end{array} \right.$$

где  $f()$  - вектор-функция для расчета параметров импульсов питающего напряжения;  $Z_{\alpha i}$ ,  $Z_{\alpha(i-1)}$  - знаки напряжения в фазе  $\alpha$  на выходе преобразователя на  $i$ -том и  $(i-1)$ -м шагах моделирования;  $\tau_{\alpha i}$ ,  $\tau_{\alpha(i-1)}$  - остаточные длительности импульсов в фазе  $\alpha$  на выходе преобразователя на  $i$ -том и  $(i-1)$ -м шагах моделирования;  $j_{\alpha i}$ ,  $j_{\alpha(i-1)}$  - номера обрабатываемых импульсов проекций питающего напряжения для фазы  $\alpha$  на  $i$ -том и  $(i-1)$ -м шагах моделирования;  $\Delta t_{nc} = 1 / f_{nc}$  - период подачи импульсов,  $f_{nc}$  - несущая частота преобразователя.

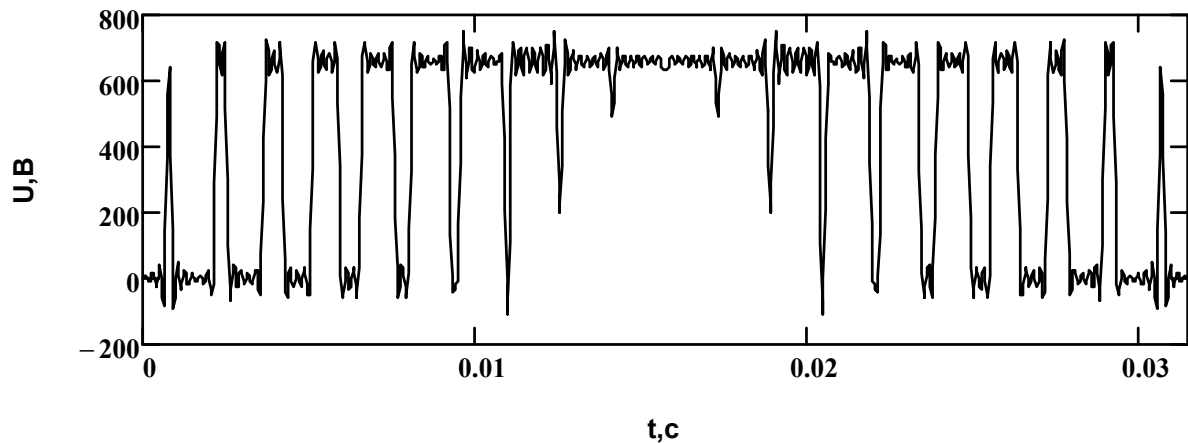


Рисунок 3 - Аппроксимирующая кривая полупериода питающего напряжения, полученная при разложении в ряд Фурье при 20 импульсах в полупериоде и 300 гармониках

Начальные условия для приведенной ММ, обеспечивающие требуемый сдвиг фаз:

$$j_{\alpha 0} = 1; \quad j_{\beta 0} = \left[ \frac{n_{\text{имп}}}{3} \right] + 1; \quad j_{\gamma 0} = \left[ \frac{2n_{\text{имп}}}{3} \right] + 1.$$

Параметры импульсов рассчитываются в соответствии с функцией  $f()$ , заложенной в систему интеллекта машины. Один из наиболее простых вариантов этой функции основан на равенстве площадей под участком синусоиды и соответствующим ему импульсом длительностью  $\Delta t_{uj}$ :

$$\Delta t_{uj} = \int_{t_{uj}}^{t_{uj} + \Delta t_{nч}} \sin \omega_{ci} t dt = \frac{1}{\omega_{ci}} [\cos \omega_{ci} (j-1) \Delta t_{nч} - \cos \omega_{ci} j \Delta t_{nч}],$$

при этом количество импульсов в полупериоде составляет

$$n_{\text{имп}} = \left[ \frac{\pi}{\omega_{ci}} \right] + 1.$$

В интегрированной форме ММ ФЗЭ «Преобразователь частоты» может быть записана в виде

$$\bar{Y}_{ПЧ} = \bar{F}_{ПЧ} (\bar{X}_{ПЧ}, \bar{P}_{ПЧ}),$$

где  $\bar{Y}_{ПЧ} \{U_{\alpha i}, U_{\beta i}, U_{\gamma i}, \omega_{ci}\}$  - выходной вектор;  $\bar{X}_{ПЧ} \{U_m, f\}$  - входной вектор;  $\bar{P}_{ПЧ} \{f_{nч}\}$  - вектор параметров;  $\bar{f} \{\omega_{cy}, V_{\omega}, k_V \omega\}$  - вектор управляющих воздействий.

Вектор  $\bar{Y}_{ПЧ} \{U_{\alpha i}, U_{\beta i}, U_{\gamma i}\}$  является входным для ФЗЭ «Асинхронный электродвигатель», описываемого ММ Парка-Горева [4,5], скорректированной с учетом [6] для случая подачи импульсного напряжения. В связи с незначительностью изменений ММ ФЗЭ «Асинхронный электродвигатель» в развернутом виде не приводится, а в интегрированной форме имеет вид:

$$\bar{F}_{AD}(\bar{X}_{AD}, \bar{P}_{AD}, \bar{Y}_{AD}, \bar{\mu}) = 0,$$

где  $\bar{X}_{AD} \{U_{\alpha i}, U_{\beta i}, U_{\gamma i}, \omega_{ci}, M_c\}$  - входной вектор;  $\bar{P}_{AD} \{J, R_S, X_S, R_{rv}, X_{rv}, R_{rn}, X_{rn}, X_m, R_c, X_c, p\}$  - вектор параметров;  $\bar{Y}_{AD} \{\varphi_p, \omega_p, M_\partial, P_\partial\}$  - выходной вектор;  $\bar{\mu} \{\omega_p, M_c, i_S\}$  - вектор сигналов с интегрированных датчиков. Здесь  $\varphi_p, \omega_p$  - угол поворота и угловая скорость ротора;  $J$  - момент инерции ротора двигателя;  $M_\partial$  - электромагнитный момент, развиваемый двигателем;  $M_c$  - момент нагрузки на валу двигателя;  $R_c, X_c$  - соответственно активное и индуктивное сопротивление питающей сети;  $i_S$  - ток статора;  $p$  - число пар полюсов электродвигателя;  $P_\partial$  - активная мощность, потребляемая электродвигателем;  $R_S, X_S$  - активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки статора;  $R_{rv}, R_{rn}$  - активные сопротивления фаз верхней и нижней клеток ротора соответственно;  $X_{rv}, X_{rn}$  - индуктивные сопротивления рассеяния соответственно верхней и нижней клеток ротора;  $X_m$  - индуктивное сопротивления взаимоиндукции.

### ***Выводы и направление дальнейших исследований.***

Разработаны математические модели функционально законченных элементов «Преобразователь частоты» и «Асинхронный электродвигатель», позволяющие описать рабочий процесс частотно регулируемого привода мехатронного выемочного комбайна, учитывающие импульсный характер питающего напряжения двигателя. Математические модели могут быть использованы для выбора рациональных параметров и алгоритмов функционирования частотно регулируемого привода, обеспечивающих:

- отсутствие существенного влияния внутреннего возмущения в виде импульсного питающего напряжения на динамические процессы в силовых системах выемочного комбайна;

- достаточно высокое быстродействие регулирования скоростей рабочих органов выемочного комбайна при допустимом уровне динамических нагрузок, обусловленных переходными процессами.

Список источников.

1. Стадник Н.И., Сергеев А.В., Кондрахин В.П. Мехатроника в угольном машиностроении//Горное оборудование и электротехника. – М.: 2007, - Вып. 4. – С.20-29.
2. Семенченко А.К., Кравченко В.М., Шабаев О.Е. Многокритериальный синтез горных машин и процесса их восстановления как динамических систем. – Донецк: ДонГТУ, 2002 – 312 с.
3. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. – Донецк: ДПИ, 1979. – 110 с.
4. Гуляев В.Г., Сивокобыленко В.Ф., Жуков К.В. Математическая модель двухдвигательного привода исполнительных органов очистного комбайна // Труды Донецкого государственного технического университета. Выпуск 7, серия горно-электромеханическая. ДонГТУ. – Донецк, – 1999. – С. 97-102.
5. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Степаненко Е.Ю., Хиценко Н.В. Оценка эффективности проходческого комбайна с интеллектуальной системой «управление-подача» исполнительного органа. // Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю, №1, 2009. – С. 207-218.
6. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. - Екатеринбург: УРО РАН, 2000. - 654 с.

Стаття надійшла до редколегії 11.09.2009

Рецензент: докт. техн. наук, проф. В. П. Кондрахин

**О.Е.Шабаєв, А.К.Семенченко, М.В.Хиценко.** Математична модель робочого процесу частотно регульованого приводу мехатронного виїмкового комбайна. Розроблено математичні моделі функціонально закінчених елементів «перетворювач частоти» й «асинхронний електродвигун», що дозволяють виконувати імітаційне моделювання робочого процесу мехатронного гірничого комбайна із частотно регульованим приводом

**мехатроніка, виїмковий комбайн, частотно регульований привід, перетворювач частоти, імітаційне моделювання**

**O. Shabaev, A. Semchenko, N. Khitsenko.** The Mathematical Model of the Working Procedure of the Variable Frequency Drive of a Mechatronic Mining Machine. The mathematical models of all-in-one elements “frequency converter” and “asynchronous motor” have been developed. These models can be used to simulate the working procedure of mechatronic mining machines equipped by the variable frequency drive.

**mechatronic, mining machine, variable frequency drive, frequency converter, simulation**

© О. Е. Шабаев, А. К. Семенченко, Н. В. Хиценко, 2009