

В. М. ЧЕРМАЛЫХ, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПИ»;
А. В. ЧЕРМАЛЫХ, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПИ»;
И. Я. МАЙДАНСКИЙ, ст. преп., НТУУ «КПИ».

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Введение. Ленточные конвейеры обладают многими технологическими преимуществами перед другими транспортными средствами и, поэтому, являются наиболее распространенными установками в различных отраслях промышленности, в частности горнорудной. При эксплуатации ленточных конвейеров расходы на электроэнергию достигают 45% всех издержек и существенно влияют на себестоимость основной продукции. Поэтому основной целью проводимых в настоящее время научно-исследовательских и проектных работ является снижение энергоемкости транспортирования грузов. Электроэнергия, потребляемая электроприводом ленточного конвейера, в основном расходуется на преодоление различных сопротивлений движению тягового органа и для конвейеров средней и большой длины может достигать 95% от всего энергопотребления. Поэтому, основными требованиями при проектировании современных ленточных конвейеров являются уменьшение величин сопротивлений движению ленты, а также выбор соответствующей системы электропривода.

Технология функционирования конвейерных установок предполагает продолжительную работу в течение значительного промежутка времени вследствие загрузки, транспортирования и разгрузки материалов в непрерывном режиме. Характерной особенностью является неравномерность грузопотока, поступающего на ленту конвейера. В результате при постоянной скорости происходит недогруз конвейера, что приводит к снижению статической нагрузки электропривода. При этом ухудшаются энергетические показатели, так как большая часть энергии тратится на перемещение ленты по роликам с одновременным увеличением удельного расхода энергии на транспортирование полезного груза. Снижение энергопотребления возможно за счет применения регулируемого электропривода. Изменение скорости необходимо производить в функции грузопотока таким образом, чтобы обеспечивать полную загруженность ленты, тем самым стабилизируя статическую нагрузку привода конвейерной установки.

Постановка задачи. В большинстве литературных источников, рассматриваются в отдельности или только электропривод или непосредственно сам конвейер, что не позволяет получить полную информацию об эффективности функционирования всей конвейерной установки. В этой связи представляет интерес и актуальность решение вопроса разработки универсальной имитационной модели конвейерной установки в целом на основе виртуальной составляющей. Такой подход, в отличие от наиболее распространенных структурных моделей, позволяет оценить динамику поведения системы, близкую к реальной, а также получить информацию о протекании энергетических процессов.

Материалы исследования. Предлагаемый материал является продолжением и дополнением работ [1,2]. Ленточный конвейер рассматривается как единый технологический комплекс совместно с перспективным энергосберегающим частотно-регулируемым электроприводом.

Целью работы является оценка динамических показателей и энергопотребления конвейерной установки на основе исследования технологических режимов работы ленточного конвейера на базе частотно-регулируемого электропривода с промежуточным звеном постоянного тока с помощью имитационной компьютерной модели, синтезированной в среде *MATLAB - Simulink - SimPowerSystems*.

При построении универсальной модели конвейерной установки учитывалась структура современного автоматизированного электропривода, состоящая из нескольких относительно независимых частей.

Силовой канал реализован в специализированном пакете *SimPowerSystems*, который фактически и дает возможность приблизить компьютерные исследования режимов работы электромеханических систем, близких к поведению реальных объектов [3].

Управляющий канал построен на основе блоков основного пакета *Simulink*, которые в последних версиях системы *MATLAB* являются универсальными и позволяют при моделировании сложных объектов решать практически любые задачи [4].

Для моделирования механической части ленточного конвейера необходимо иметь соответствующее математическое описание исследуемых процессов. Следующим этапом является использование специальных математических блоков из библиотеки пакета *Simulink*, реализующих необходимые зависимости в требуемой последовательности их выполнения.

Визуализацию процесса моделирования обеспечивают виртуальные осциллографы временных зависимостей и графопостроители фазовых траекторий. Численные значения переменных позволяют получить цифровые дисплеи.

Имитационная модель ленточного конвейера приведена на рис. 1. Она выполнена комбинированной и содержит виртуальную, структурную и математическую составляющие.

Виртуальная составляющая определяет силовой канал частотно-регулируемого асинхронного электропривода, структурная – систему управления преобразователем частоты, математическая – механическую часть ленточного конвейера.

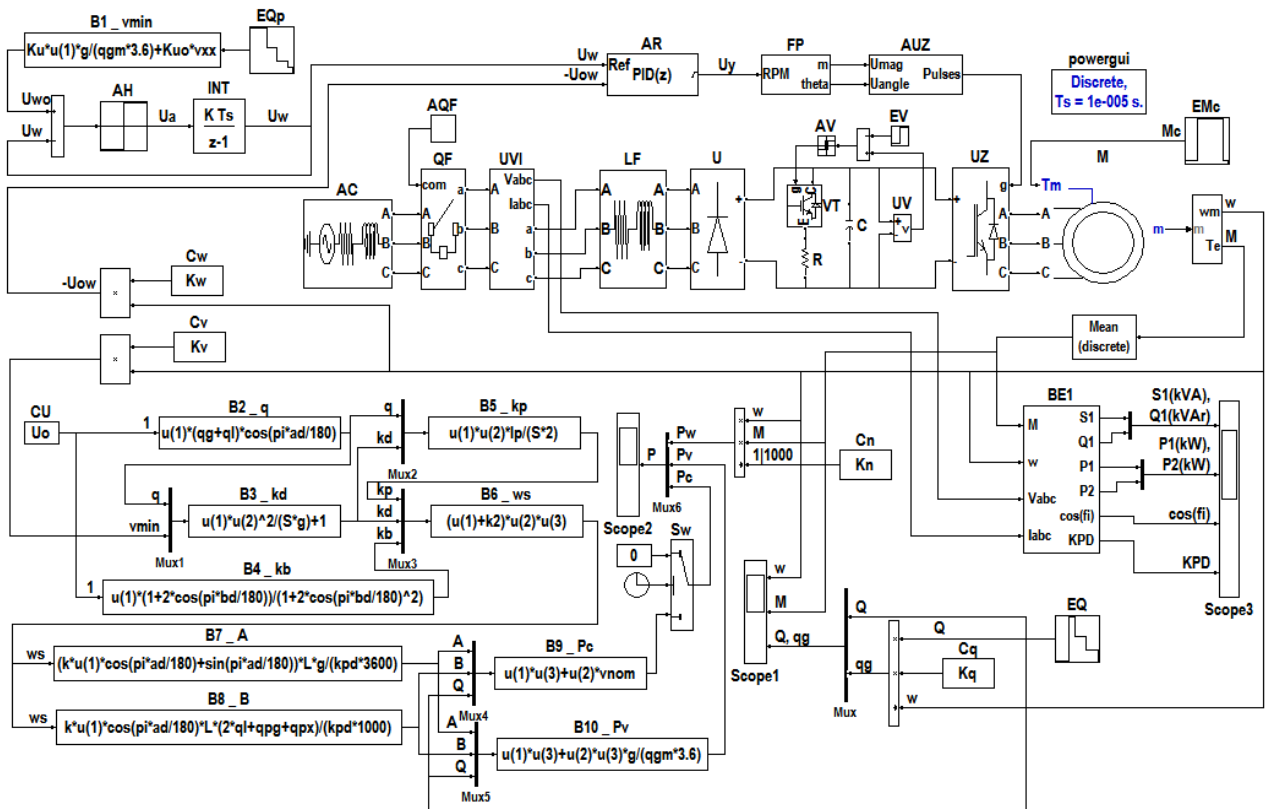


Рис. 1 Имитационная модель ленточного конвейера

Элементы силового канала электропривода с указанием в скобках основных параметров, вводимых в поля настроек соответствующих блоков:

AC – трехфазная сеть переменного тока (линейное напряжение, частота сети, сопротивление и индуктивность источника);

QF – силовой автоматический выключатель на входе (сопротивление в замкнутом состоянии);

AQF – блок управления автоматом (времена подачи сигналов на включение/отключение);

UVI – трехфазные датчики напряжений и токов (вид напряжений – линейные или фазные);

LF – фильтр электромагнитной совместимости преобразователя частоты с сетью (сопротивление и индуктивность);

U – выпрямитель на диодах (сопротивление вентилялей, падение напряжения на них);

VT – транзистор *IGBT* (сопротивление) для подключения тормозного резистора **R** (сопротивление);

C – конденсаторный фильтр в звене постоянного тока (емкость);

UV – датчик напряжения в звене постоянного тока (отсутствуют);

UZ – автономный инвертор напряжения преобразователя частоты на транзисторных *IGBT*-модулях (сопротивление в открытом состоянии, падение напряжения на транзисторах и обратных диодах);

M – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (мощность, напряжение, частота сети, сопротивление и индуктивность статора, приведенные к статору сопротивление и индуктивность ротора, взаимная индуктивность, момент инерции, коэффициент трения, число пар полюсов, начальное состояние машины).

Система управления выполнена по современной структуре с цифровым ПИД-регулятором скорости **AR**. Управление автономным инвертором в режиме ШИМ-модуляции с заданной частотой коммутации вентилялей обеспечивает блок **AUZ**, а закон скалярного управления $U/f = const$ реализует функциональный преобразователь **FP**. Нелинейный элемент **AV** управляет блоком тормозного резистора относительно величины задаваемого блоком **EV** максимального напряжения в звене постоянного тока.

Блок **Cw** задает в виде константы требуемый коэффициент передачи K_w отрицательной обратной связи по скорости. Блоки **Cn**, **Cv** обеспечивают согласование между физическими величинами соответственно по активной мощности K_n и линейной скоростью K_v ленты конвейера.

На входе системы применено типовое устройство в виде задатчика интенсивности, реализованного на базе нелинейного элемента **AH** и цифрового интегратора **INT**.

Подсистема $BE1$ по сигналам от датчиков напряжений и токов определяет основные энергетические характеристики: полную $S1$, активную $P1$ и реактивную мощности $Q1$, потребляемых системой из сети, а также коэффициент мощности $\cos\phi$ и коэффициент полезного действия η . Кроме того, вычисляется активная механическая мощность на валу электродвигателя $P2$.

Блоки EQp , EQ и EMc формируют амплитудно-временные диаграммы изменения величин соответственно поступающего на ленту грузопотока, производительности на выходе конвейера и статического момента электропривода.

Регулирование скорости конвейера производится в функции грузопотока, который поступает на конвейер, с учетом изменения коэффициента сопротивления движению ленты по роликам. При этом, поддерживается постоянным погонная нагрузка от транспортируемого материала.

Механическая часть конвейера моделируется с помощью вычислителей $B1 \dots B10$, которые с помощью объединителей Mux , $Mux1 \dots Mux5$ выбирают необходимые входные сигналы для реализации требуемой математической зависимости.

Согласно методике, приведенной в работе [5], для определения коэффициента сопротивления движению ленты конвейера, а также потребляемых активных мощностей для нерегулируемого и регулируемого электропривода необходимо последовательно реализовать соответствующие формулы с определением требуемых величин.

Минимальная скорость ленты v_{\min} , при которой сохраняется постоянной и максимальной погонная нагрузка $q_{g\max}$ от перемещаемого материала (вычислитель $B1$)

$$v_{\min} = \frac{Q \cdot g}{3,6q_{g\max}},$$

где Q – производительность конвейера, т/ч; g – ускорение силы тяжести, m/c^2 .

Погонная нагрузка q от груза q_g и ленты q_l с учетом угла наклона конвейера α (вычислитель $B2$)

$$q = (q_g + q_l) \cdot \cos\beta.$$

Коэффициенты, учитывающие влияние инерционной силы при прохождении ленты и груза через ролик-опору K_d (вычислитель $B3$) и неравномерности распределения нагрузки между центральным и боковыми роликами K_β (вычислитель $B4$)

$$k_d = 1 + \frac{q}{g \cdot S} \cdot v^2, \quad k_\beta = \frac{1 + 2a \cdot \cos\beta}{1 + 2a \cdot \cos^2\beta},$$

где S – натяжение ленты, Н; v – скорость ленты, м/с; a – отношение длин среднего и бокового роликов; β – угол наклона боковых роликов, град.

Коэффициенты сопротивлений качению ролика по ленте k_p (вычислитель $B5$) и движению ленты по ролик-коопорам w_s (вычислитель $B6$)

$$k_p = \frac{q \cdot k_d \cdot l_p}{2S}, \quad w_s = (k_p + k_s) \cdot k_d \cdot k_\beta,$$

где l_p – расстояние между ролик-коопорами, м; $k_s = 0,004 \dots 0,005$ – коэффициент сопротивления вращению роликов.

Коэффициенты мощности, затрачиваемой на транспортирование груза A (вычислитель $B7$) и идущей на преодоление механических сопротивлений в узлах конвейера B (вычислитель $B8$)

$$A = \frac{L \cdot g}{3600z} \cdot (k \cdot w_s \cdot \cos\beta + \sin\beta), \quad B = \frac{L}{1000z} \cdot k \cdot w_s \cdot (q_{pg} + q_{px} + 2q_l) \cdot \cos\beta,$$

где L – длина конвейера, м; η – к.п.д. привода конвейера, о.е.; $k = 1,1$ – коэффициент, учитывающий местные сопротивления; q_{pg} , q_{px} – погонные нагрузки соответственно от вращающихся роликов грузовой и холостой ветвей конвейера, Н/м.

Мощность при нерегулируемом электроприводе P_c (вычислитель $B9$) и при регулировании скорости конвейера P_v (вычислитель $B10$), а также механическая на валу двигателя P_w

$$P_c = A \cdot Q + B \cdot v_{\text{ном}}, \quad P_v = A \cdot Q + B \cdot v_{\min}, \quad P_w = M \cdot \omega,$$

где $v_{\text{ном}}$ – номинальная скорость ленты конвейера, м/с.

В качестве объекта исследования рассмотрена конвейерная установка мощностью $P = 152$ кВт, производительностью $Q = 300$ т/ч, длиной $L = 1000$ м, шириной ленты $B_0 = 1400$ мм и скоростью ленты $v = 1$ м/с с приводным асинхронным двигателем мощностью $P = 160$ кВт, напряжением $U = 380$ В и скоростью $n = 1000$ об/мин.

Алгоритм функционирования модели учитывает следующий технологический режим работы ленточного конвейера:

- $0 \leq t \leq 10$ с – запуск на холостом ходу до номинальной скорости;
- $10 < t \leq 15$ с – работа при номинальном грузопотоке;
- $15 < t \leq 25$ с – уменьшение грузопотока в два раза;
- $25 < t \leq 35$ с – снижение производительности в четыре раза;
- $35 < t \leq 40$ с – работа порожнего конвейера с последующей его остановкой при $t > 40$ с.

Реализация приведенного алгоритма обеспечивается совместной работой блоков EQ_p , EQ и EM_c . Задание численных значений соответствующих входных координат – грузопотока Q_p , производительности Q и статического момента M_c производится в необходимое время t .

На рис. 2 изображены полученные в результате моделирования диаграммы и фазовые траектории.

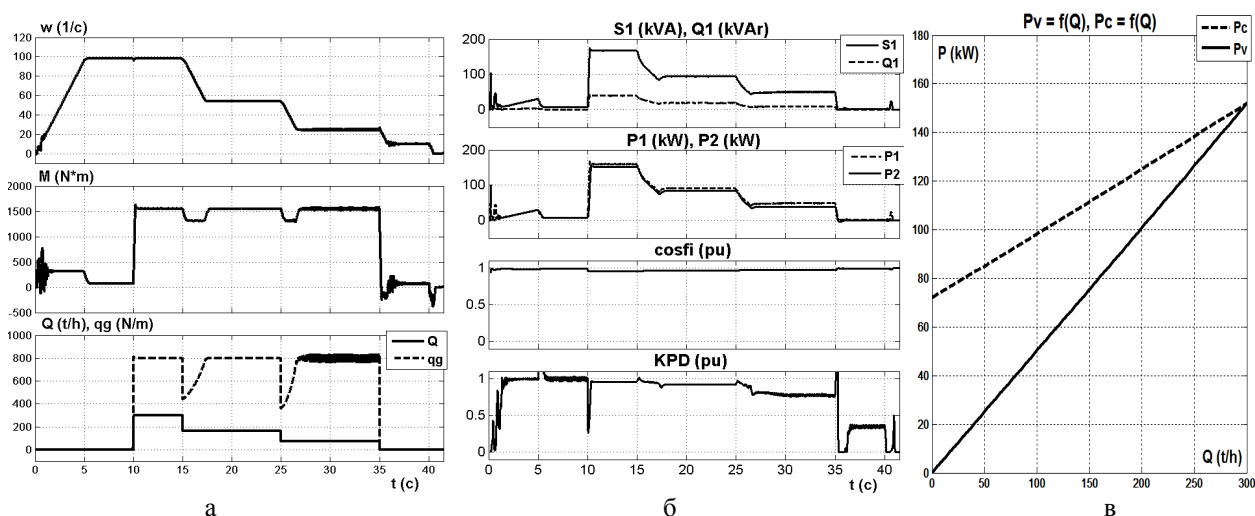


Рис. 2 Графики переходных процессов конвейерной установки:
 а – динамика, б – энергетические характеристики, в – потребляемая активная мощность при изменении производительности

Скоростные и нагрузочные диаграммы (см. рис. 2, а) показывают достаточно высокое качество протекания переходных процессов в динамике и точность обработки заданных значений в статике как относительно угловой скорости, так и электромагнитного момента двигателя.

Нижняя диаграмма на рис. 2, а иллюстрирует возможность реализации идеи поддержания постоянной погонной нагрузки на ленте конвейера за счет регулирования скорости приводного двигателя в зависимости от величины грузопотока. Следует отметить, что обеспечить полную стабилизацию погонной нагрузки не удастся, так как при резком изменении количества материала необходимо определенное время для соответствующего изменения скорости конвейера, что наглядно демонстрируют полученные графики.

Энергетические характеристики (см. рис. 2, б) относительно мощностей, высоких значений коэффициента мощности и коэффициента полезного действия показывают эффективность применения частотно-регулируемого электропривода для ленточного конвейера.

Полученные графики потребляемых активных мощностей (см. рис. 2, в) при изменении производительности для вариантов с нерегулируемым и регулируемым электроприводом показывают, что регулирование скорости конвейера в функции грузопотока с учетом изменения коэффициента сопротивления движению ленты позволяет существенно снизить энергопотребление. Так, при уменьшении производительности в 2 раза потребляемая мощность уменьшается на 36%.

Синтезированная модель позволяет провести исследования относительно влияния на энергопотребление угла наклона ленточного конвейера. На рис. 3 представлены графики изменения потребляемых активных мощностей в зависимости от угла наклона трассы конвейера.

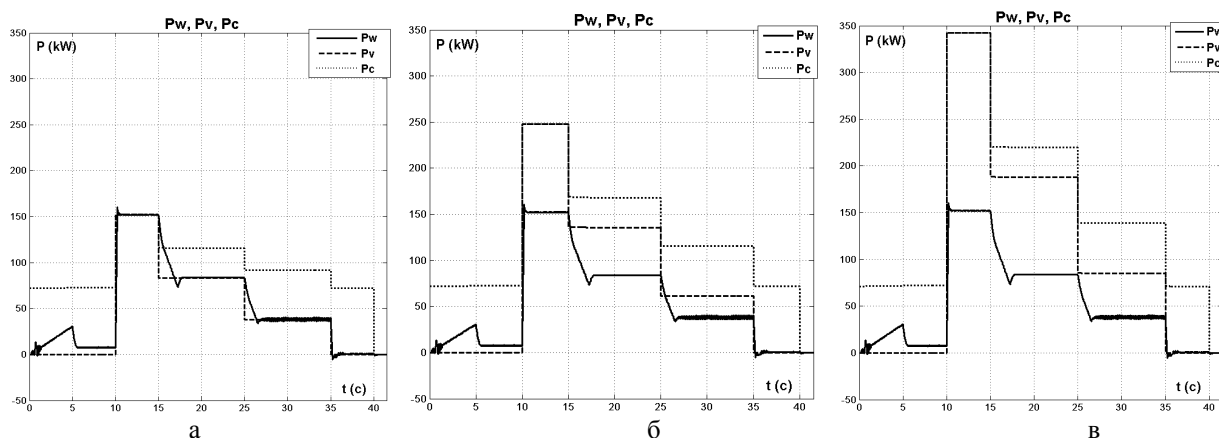


Рис. 2 Графики изменения энергопотребления в зависимости от угла наклона конвейера:
 а – $\alpha = 0^\circ$, б – $\alpha = 3^\circ$, в – $\alpha = 6^\circ$

Результаты подтверждают те положения, в которых акцентируется внимание на то, что применение регулируемого электропривода для ленточных конвейеров наиболее эффективно и целесообразно при горизонтальном расположении трассы. Даже при малых углах наклона резко возрастает энергопотребление за счет механической части, так как значительно увеличивается коэффициент сопротивления движению ленты конвейера.

Численные значения потребляемых активных мощностей для различных режимов работы ленточного конвейера в зависимости от угла наклона приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Количественные данные относительно потребляемой активной мощности

Угол наклона конвейера, град.	$\alpha = 0^\circ$			$\alpha = 3^\circ$			$\alpha = 6^\circ$		
Активная мощность, kW	P_w	P_v	P_c	P_w	P_v	P_c	P_w	P_v	P_c
Разгон конвейера вхолостую	30	0	72	30	0	72	30	0	72
Работа конвейера на холостом ходу	8	0	72	8	0	72	8	0	72
Грузопоток 100 %	152	152	152	152	250	250	152	342	342
Грузопоток 50 %	85	85	115	85	135	170	85	190	220
Грузопоток 25 %	40	40	92	40	60	110	40	85	140
Замедление конвейера без груза	1	0	72	1	0	72	1	0	72
Остановка конвейера	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Анализ полученных результатов показывает, что для горизонтального конвейера потребляемые мощности приводом и установкой в целом практически равны во всех режимах работы, а уже даже при небольшом угле наклона $\alpha = 3^\circ$ энергопотребление конвейера относительно привода возрастает примерно на 35 - 40% в зависимости от величины грузопотока.

Выводы. Полученные результаты показывают, что имеется возможность построения комбинированной имитационной модели конвейерной установки как единого технологического комплекса в составе электропривода и механической части самого конвейера. Наличие виртуальной составляющей для силового канала электропривода приближает функционирование модели к работе реального конвейера. При этом, имеется возможность получить информацию об энергетических характеристиках ленточного конвейера относительно потребляемых из сети полной, активной и реактивной мощностей, а также получить коэффициенты мощности и полезного действия всей системы и определить механическую мощность на валу двигателя. Исследование возможных технологических режимов работы конвейерной установки подтвердили эффективность и целесообразность применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода, позволяющего обеспечить высокие динамические показатели, а также стабилизировать погонную нагрузку на ленте при снижении энергопотребления в зависимости от грузопотока и текущей производительности. Разработанная модель является универсальной, что позволяет проводить исследования любых режимов работы любых типов ленточных конвейеров в зависимости от требований технологического процесса. Для этого необходимо просто ввести паспортные данные конвейера, электродвигателя и преобразователя.

Список литературы: 1. Чермалых А. В. Исследование технологических режимов работы конвейерной установки с частотно-регулируемым электроприводом / А. В. Чермалых, В. Н. Пермяков, И. Я. Майданский // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вып. 1/2015(3). – С. 68-70. **2.** Чермалых А. В. Моделирование технологических режимов работы стрічкових конвеєрів / А. В. Чермалых, В. Н. Пермяков, А. С. Иржавский // Энергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2015. – С. 116-122. **3.** Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с. **4.** Дьяконов В. П. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. Справочник / В. П. Дьяконов, А. А. Пеньков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с. **5.** Монастырский В.Ф. Эффективность работы ленточных конвейеров на горных предприятиях / В. Ф. Монастырский, В. Ю. Максютенко, Р. Ф. Кирия // Геотехническая механика. Межведомственный сборник научных трудов. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2010. – Вып. 88. – С. 185-191.

Bibliography (transliterated): 1. Chermalyh, A. V., Permjakov, V. N. and Majdanskij, I. Y. "Issledovanie tekhnologicheskikh rezhymov raboty konvejenoy ustanovki s chastotno-reguliruemym elektroprivodom." Problemy energoresursozberezhennya v elektrotehnichnykh sistemah. Nauka, osvita i praktika. Naukove vydannja, Kremenchuk: KrNU, Vyp. 1/2015(3): 68–70. Print. **2.** Chermalyh, A. V., Permjakov, V. N. and Irzhavskij, A. S. "Modeljuvannja tekhnologichnyh rezhymiv roboty strichkovykh konvejeriv." Energetika. Ekologija. Ljudyna. Naukovi pratsi NTUU "KPI", IEE. Kiev: NTUU "KPI", IEE, 2015: 116–122. Print. **3.** German-Galkin, S. G. "Matlab i Simulink. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK." St. Petersburg: Korona–Vek, 2008. Print. **4.** Dyakonov, V. P. and Penkov, A. A. "MATLAB i Simulink v electroenergetike." Moscow: Gorjachaja linija – Telecom, 2009. Print. **5.** Monastyrskiy, V. F., Maxjutenko, V. Y. and Kirija, R. F. "Energoeffektivnost' rabotu lentochnyh konvejerov na gornyh predpriyatijah." Geotekhnicheskaja mehanika. Mezhdomestvennyj sbornik nauchnyh trudov. Dnepropetrovsk: IGTM NANU, Vyp. 88, 2010: 185–191. Print.

Поступила (received) 28.08.2015