

В.Г. Дмитриев, П.Н. Чередник

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЯГОВОГО РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ПУСКОВЫХ И ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Описан программный комплекс состоящий из двух блоков: блока уточненного тягового расчета ленточного конвейера, позволяющего определить натяжение ленты в характерных точках трассы конвейера и необходимую мощность двигателя, и блока расчета динамических натяжений возникающих при пуске и торможении, по которым определяется коэффициент динамичности. Разработанная на базе математической модели цифровая модель конвейера с постоянной структурой в виде семимассовой системы отличается тем, что при моделировании на ней динамических процессов коэффициенты в математической и соответственно в цифровой моделях автоматически пересчитываются на основании результатов полученных в первом блоке. Цифровая модель позволяет анализировать пусковые и тормозные режимы конвейера, определять время пуска и торможения, максимальный ход и колебания натяжного устройства и усилия в нем и др. В цифровой модели возможно использование моделей двигателей, оснащенных различной пуско-регулирующей аппаратурой.

Ключевые слова: ленточный конвейер, автоматизированный расчет, тяговый расчет, динамические процессы, цифровая модель, прочностной расчет ленты.

Расчет ленточного конвейера с использованием современных теоретических разработок является сложной и трудоемкой задачей. В этом расчете этап определения сил сопротивления движению ленты, нахождения натяжения в характерных точках контура ленты и вычисления мощности двигателя конвейера называется тяговым расчетом и является одним из наиболее ответственных. С использованием результатов этого расчета определяется максимальное статическое натяжение ленты S_{\max} , по которому первоначально принятая расчетчиком по условиям эксплуатации лента рассчитывается на прочность.

Расчет ленты на прочность часто выполняется с использованием коэффициента запаса прочности, равного для резинот-

каневых лент $n = 10 \div 11$, и для резиновых лент $n = 7 \div 8$, т.е. считается, что разрывная прочность ленты должна быть равна:

$$S_p = S_{\max} \cdot n \quad (1)$$

В дальнейшем при оценке экономических показателей конвейера и процесса транспортирования учитывается стоимость принятой ленты, а также стоимость энергопотребления, связанная с выбранным по величине рассчитанной мощности N двигателем. Для улучшения этих показателей тяговый расчет необходимо выполнять максимально точно, с учетом всего многообразия факторов, влияющих на величину натяжения S_{\max} и мощность двигателя N . Уточненный тяговый расчет достаточно сложен и требует при своем выполнении знания большого числа различных констант и специальных коэффициентов, которые не всегда известны и доступны для пользователя. Применение готовой компьютерной программы, содержащей современный уточненный метод тягового расчета, в котором учитывается большое число самых различных факторов, устраняет практически все отмеченные трудности. Такой метод тягового расчета разработан на кафедре «Горной механики и транспорта» Горного института НИТУ МИСИС [1, 2].

Не менее сложной задачей является расчет динамических нагрузок в ленте и других элементах конвейера, возникающих при пуске и торможении.

В настоящее время для уточненного прочностного расчета ленты в общем коэффициенте запаса n выделена динамическая составляющая (ОСТ на расчет подземных ленточных конвейеров, ИГД им. А.А. Скочинского), связанная с нестационарными процессами в ленточных конвейерах, т.е. принято, что необходимая разрывная прочность равна:

$$S_p = S_{\max} \cdot n_{\text{ст}} \cdot k_d, \quad (2)$$

где $n_{\text{ст}}$ — статический коэффициент запаса прочности: $n_{\text{ст}} = 7$ для тканевых лент и $n_{\text{ст}} = 5$ для тросовых; k_d — коэффициент динамичности, зависящий в частности, от кратности пускового момента, способа пуска конвейера и пр.

При назначении по этой методике коэффициента k_d принято достаточно много различных ограничений и допущений, делающих выбор его величины весьма проблематичным [2]. Для более обоснованной оценки дополнительных динамических нагрузок и исключения многих различных ограничений, в данной работе предлагается использовать для конвейера го-

товую цифровую модель с постоянной структурой, которая позволяет оценить при пуске не только максимальные динамические усилия в ленте и рассчитать величину k_d , но и определить время разгона конвейера, ход грузового натяжного устройства и усилия, возникающие в нем при пуске, а также исследовать многие режимы, возникающие при торможении. В цифровой модели конвейера возможно использование цифровых моделей двигателей с различной пуско-регулирующей аппаратурой.

В этом случае представляется целесообразным создание для пользователей программного комплекса, осуществляющего последовательно современный метод уточненного тягового расчета конвейера, а затем с использованием необходимых данных из этого этапа расчета выполняющего моделирование пусковых и тормозных режимов ленточного конвейера. Это позволяет более точно определять как величину статического натяжения S_{max} , так и коэффициент динамичности k_d , а следовательно, максимально обоснованно выбирать ленту по прочности.

Программный комплекс (рис. 1) состоит из двух информационно-расчетных блоков: блока тягового расчета ленточного конвейера, блока расчета динамических натяжений при пусковых и тормозных режимах ленточного конвейера с выдачей расчетной информации на экран ЭВМ.

Блок тягового расчета представляет собой программу, реализованную в программной среде Delphi. Структура данной программы состоит из трех окон, на которых последовательно

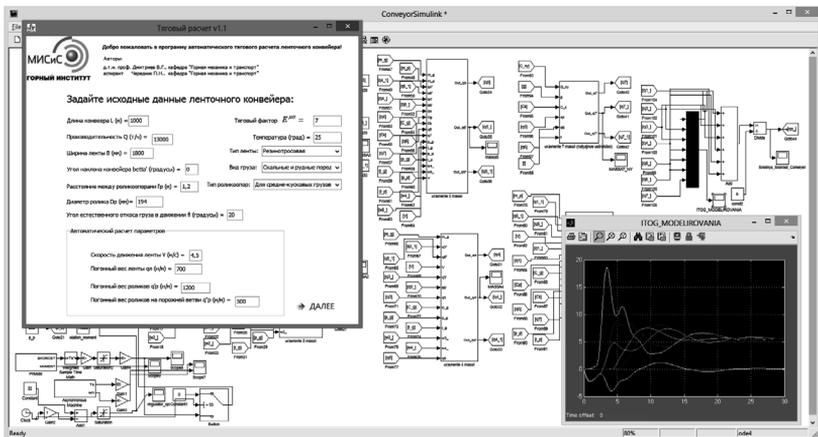


Рис. 1. Программный комплекс для тягового расчета и анализа пусковых и тормозных режимов ленточных конвейеров

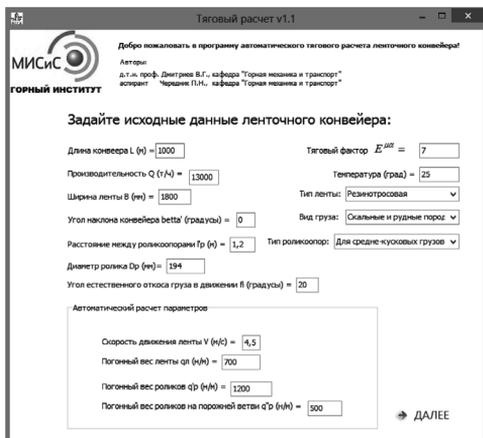


Рис. 2. Основное окно программы тягового расчета ленточного конвейера

демонстрируется выполненный определенный этап тягового расчета. Переход между окнами осуществляется при нажатии кнопок «Далее» и «Назад».

При первоначальном запуске комплекса, в главном окне программы необходимо указать исходные данные для расчета ленточного конвейера: производительность, ширина ленты и ее тип, угол наклона и другие параметры, необходимые для расчета.

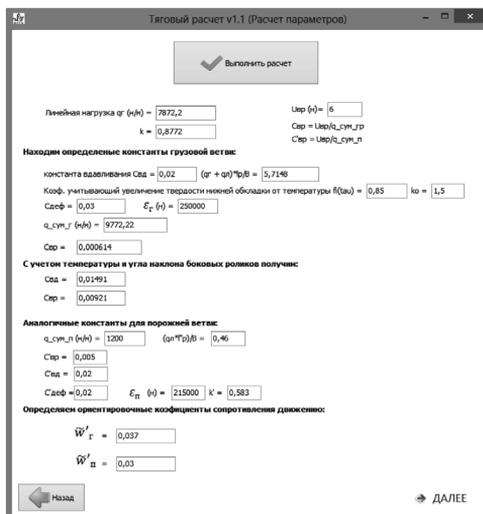


Рис. 3. Окно уточненного тягового расчета первого блока программного комплекса

Здесь же в автоматическом режиме рассчитывается и выводится в окне скорость движения ленты, ее погонный вес, погонный вес роликов на порожней и грузовой ветвях.

Затем в следующем окне программы необходимо нажать кнопку «Выполнить расчет» после чего программой автоматически рассчитываются необходимые константы для грузовой и порожней ветвей, а также определяются ориентировочные коэффициенты сопротивления движению (рис. 3).

В качестве схемы ленточного конвейера, используется схема указанная в третьем окне программы, на которой изображается изменение статического натяжения по длине конвейера при принятых уточненных коэффициентах сопротивления движению $w'_Г$ и $w'_П$ на грузовой и порожней ветвях. В расчете также учитывается сопротивление $W_{ЗАГ}$ возникающее в месте загрузки для загрузочного устройства стандартного вида – в виде загрузочной воронки с направляющими бортами, расположенными в хвостовой части конвейера.

В третьем окне программы также печатаются результаты расчета сил сопротивления движению на грузовой и порожней ветвях, силу сопротивления в месте загрузки, натяжения в характерных точках конвейера, рассчитанная мощность привода и уточненные коэффициенты сопротивления движению для дискретной модели расчета динамики ленточного конвейера (рис. 4). Все расчеты выполнены в соответствии с методикой тягового расчета, изложенной в работе [1]. При желании

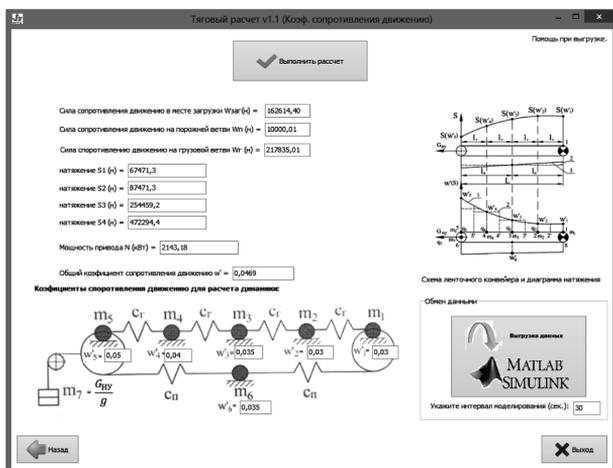


Рис. 4. Окно программы итогового тягового расчета ленточного конвейера

пользователь может ограничиться только этим этапом расчета и рассчитать ленту на прочность, приняв коэффициент запаса $n = 10$ или $n = 7$ в зависимости от типа ленты.

Далее полученные итоговые значения коэффициентов сопротивления движению и другие необходимые константы загружаются в файл Matlab Simulink, где находится спроектированная дискретная модель ленточного конвейера. Осуществляется это нажатием соответствующей кнопки «Выгрузка данных в Matlab Simulink». Перед процессом загрузки в Matlab Simulink в программе возможно задать начальный интервал моделирования для последующего анализа динамики ленточного конвейера.

Способ передачи данных между блоками программы основан на технологическом стандарте СОМ (ComponentObjectModel) и базирующейся на этом стандарте технологии OLE Automation [5]. Технология OLE Automation разработана для поддержки интерпретирующих языков. Она позволяет передавать данные от одного приложения к другому и возвращать результат работы обратно. Процедура выгрузки данных из блока «тяговый расчет» в блок «расчет динамики ленточного конвейера» реализован следующим образом:

```
V:=CreateOleObject('matlab.application'); //Запуск сервера автоматизации Matlab
path:='cd('+quotedstr(GetCurrentDir)+')'; //Установка рабочей директории
V.Execute(path);
V.Execute('open_system('+quotedstr('ConveyorSimulink')+')'); //Открытие модели
V.Execute('set_param('+quotedstr('ConveyorSimulink')+','+quotedstr('StopTime')+','+quotedstr(EditTimeModeling.text)+')'); //установка времени моделирования
V.Execute('set_param('+quotedstr('ConveyorSimulink')+','+quotedstr('Numerator')+','+quotedstr(KEdit.text)+')'); //Изменение параметров модели
V.Execute('sim('+quotedstr('ConveyorSimulink')+')') //Запуск модели
```

Цифровая модель ленточного конвейера постоянной структуры состоит из 5 сосредоточенных масс, расположенных на грузовой ветви, и одной массы на порожней; масса привода (приведенная) $m_{пп}$ присоединена к первой массе грузовой ветви. Массы соединены пружинами с соответствующими жесткостями $C_Г$ и $C_{п.}$. Кроме того, отдельно выведена модель грузового натяжного устройства, расположенного в хвостовой части конвейера (см. рис. 4). Отличительной особенностью данной дис-

кретной модели является то, что массы перемешаются по опорной поверхности с разными коэффициентами сопротивления движению, определенными ранее в блоке тягового расчета.

Для построения цифровой модели, позволяющей анализировать динамику пусковых и тормозных режимов ленточного конвейера, использован метод кусочно-линейной аппроксимации. В соответствии с методом математическая модель ленточного конвейера представлена в виде следующей системы из семи нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка [3]:

$$\begin{aligned}
 & (2m_z + 2m_n + m_{np})\ddot{q}_1 + m_z\ddot{q}_2 + m_n\ddot{q}_6 + 2v\dot{q}_1 - v\dot{q}_2 - v\dot{q}_6 + \\
 & + 2C_z q_1 - C_n q_2 - C_n q_6 + (0,5\rho_z l_z w'_1 + 0,5\rho_n l_n w'_2) \operatorname{sgn} \dot{q}_1 = \\
 & = M_{np}(v) \operatorname{sgn}(\dot{q}_c - \dot{q}_1) / R_\sigma ; \\
 & m_z\ddot{q}_1 + 4m_z\ddot{q}_2 + m_z\ddot{q}_3 - v\dot{q}_1 + 2v\dot{q}_2 - v\dot{q}_3 - C_z q_1 + 2C_z q_2 - C_z q_3 + \\
 & + 0,5\rho_z l_z (w'_1 + w'_2) \operatorname{sgn} \dot{q}_2 = 0; \\
 & m_z\ddot{q}_2 + 4m_z\ddot{q}_3 + m_z\ddot{q}_4 - v\dot{q}_2 + 2v\dot{q}_3 - v\dot{q}_4 - C_z q_2 + 2C_z q_3 - C_z q_4 + \\
 & + 0,5\rho_z l_z (w'_2 + w'_3) \operatorname{sgn} \dot{q}_3 = 0; \\
 & m_z\ddot{q}_3 + 4m_z\ddot{q}_4 + m_z\ddot{q}_5 - v\dot{q}_3 + 2v\dot{q}_4 - v\dot{q}_5 - C_z q_3 + 2C_z q_4 - C_z q_5 + \\
 & + 0,5\rho_z l_z (w'_3 + w'_4) \operatorname{sgn} \dot{q}_4 = 0; \\
 & m_z\ddot{q}_4 + (2m_z + 2m_n)\ddot{q}_5 + m_n\ddot{q}_6 - v\dot{q}_4 + 2v\dot{q}_5 - v\dot{q}_6 - C_z q_4 + \\
 & + (2C_z + 0,25C_\kappa)q_5 - (C_z + 0,25C_\kappa)q_6 - 0,5C_\kappa q_7 + \\
 & + (0,5\rho_z l_z w'_4 + 0,5\rho_n l_n w'_5) \operatorname{sgn} \dot{q}_4 = 0; \\
 & m_n\ddot{q}_1 + m_n\ddot{q}_5 + 4m_n\ddot{q}_6 - v\dot{q}_5 + 2v\dot{q}_6 - v\dot{q}_1 - C_n q_1 + \\
 & + (2C_n + 0,25C_\kappa)q_6 - (C_n + 0,25C_\kappa)q_5 + \\
 & + 0,5C_\kappa q_7 + \rho_n l_n w'_6 \operatorname{sgn} \dot{q}_6 = 0; \\
 & \frac{G_{ny}}{g} \ddot{q}_7 - 0,5C_\kappa q_5 + 0,5C_\kappa q_6 + C_\kappa q_7 + G_{ny} + G_{ny} f \operatorname{sgn} \dot{q}_7 = 0, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $\ddot{q}_i, \dot{q}_i, q_i$ – вторая и первая производные от i -ой обобщенной координаты, \dot{q}_c – установившаяся стационарная скорость конвейера, м/с; $m_\Gamma = \rho_\Gamma l_\Gamma / (6g)$, $m_n = \rho_n l_n / (6g)$; m_{np} – приведенная масса привода, кг; ρ_z, ρ_n – погонный вес движущихся частей конвейера на грузовой и порожней ветвях, Н/м; l_z, l_n – расстояния между массами на грузовой и порожней ветвях, м; M_{np}/R – приведенный к ободу барабана момент привода, v – приведен-

ный коэффициент внутреннего трения в ленте; C_r, C_n – жесткости участков: $C_r = EF/l_r$, Н/м, $C_n = EF/l_n$, Н/м; E – модуль упругости ленты, Па; F – площадь поперечного сечения ленты, м²; G_{ny} – вес груза натяжного устройства, Н; C_k – жесткость канатов натяжного устройства, Н/м; f – коэффициент трения при перемещении натяжного устройства; при помощи знака sgn реализована нелинейная ступенчатая функция, соответствующая изменению силы сухого трения в подшипниках роликов при изменении направления скорости участка \dot{q}_i .

Для построения цифровой модели ленточного конвейера в пакете программ Matlab Simulink математическая модель по системе уравнений (3) преобразована к следующему виду:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 &= \frac{1}{(2m_z + 2m_n + m_{np})} (-m_z \ddot{q}_2 - m_n \ddot{q}_6 - 2\nu \dot{q}_1 + \nu \dot{q}_2 + \nu \dot{q}_6 - \\ &\quad - 2C_z q_1 + C_n q_2 + C_n q_6 + \\ &\quad - (0,5\rho_z l_z w'_1 + 0,5\rho_n l_n w'_2) \text{sgn } \dot{q}_1 - M_{np} \text{sgn } (\dot{q}_c - \dot{q}_1) / R_0); \\ \ddot{q}_2 &= \frac{1}{4m_z} (-m_z \ddot{q}_1 - m_z \ddot{q}_3 + \nu \dot{q}_1 - 2\nu \dot{q}_2 + \nu \dot{q}_3 + C_z q_1 - 2C_z q_2 + C_z q_3 - \\ &\quad - 0,5\rho_z l_z (w'_1 + w'_2) \text{sgn } \dot{q}_2); \\ \ddot{q}_3 &= \frac{1}{4m_z} (-m_z \ddot{q}_2 - m_z \ddot{q}_4 + \nu \dot{q}_2 - 2\nu \dot{q}_3 + \nu \dot{q}_4 + C_z q_2 - 2C_z q_3 + C_z q_4 - \\ &\quad - 0,5\rho_z l_z (w'_2 + w'_3) \text{sgn } \dot{q}_3); \\ \ddot{q}_4 &= \frac{1}{4m_z} (-m_z \ddot{q}_3 - m_z \ddot{q}_5 + \nu \dot{q}_3 - 2\nu \dot{q}_4 + \nu \dot{q}_5 + C_z q_3 - 2C_z q_4 + C_z q_5 - \\ &\quad - 0,5\rho_z l_z (w'_3 + w'_4) \text{sgn } \dot{q}_4); \\ \ddot{q}_5 &= \frac{1}{(2m_z + 2m_n)} (-m_z \ddot{q}_4 - m_n \ddot{q}_6 + \nu \dot{q}_4 - 2\nu \dot{q}_5 + \nu \dot{q}_6 + C_z q_4 - \\ &\quad - (2C_z + 0,25C_k) q_5 + (C_z + 0,25C_k) q_6 + 0,5C_k q_7 - \\ &\quad - (0,5\rho_z l_z w'_4 + 0,5\rho_n l_n w'_5) \text{sgn } \dot{q}_4); \\ \ddot{q}_6 &= \frac{1}{4m_n} (-m_n \ddot{q}_1 - m_n \ddot{q}_5 + \nu \dot{q}_5 - 2\nu \dot{q}_6 + \nu \dot{q}_1 + C_n q_1 - \\ &\quad - (2C_n + 0,25C_k) q_6 + (C_n + 0,25C_k) q_5 - \\ &\quad - 0,5C_k q_7 - \rho_n l_n w'_6 \text{sgn } \dot{q}_6); \end{aligned}$$

$$\ddot{q}_7 = \frac{1}{G_{\text{HY}}} (0,5C_{\text{K}}q_5 - 0,5C_{\text{K}}q_6 - C_{\text{K}}q_7 - G_{\text{HY}} - G_{\text{HY}} f \operatorname{sgn} \dot{q}_7), \quad (4)$$

$$g$$

где w'_i – коэффициенты сопротивления движению, с которыми перемещаются сосредоточенные массы m_i ; они определены на этапе тягового расчета в точках по длине конвейера: $L/4$, $L/2$, $3L/4$, L , на грузовой ветви и $L/2$ на порожней.

С использованием модели (4) в пакете Matlab Simulink спроектирована цифровая компьютерная модель постоянной конфигурации для анализа динамических процессов в ленточном конвейере (рис. 5).

Одной из искомым величин в данной модели является скорость обобщенной координаты \dot{q}_1 , поскольку при пуске величина динамического усилия может быть определена по выражению:

$$S_{\text{дин}}(t) = c\rho\dot{q}_1(t), \quad \text{Н} \quad (5)$$

где c – скорость распространения упругой волны в ленте, м/с, ρ – плотность ветви ленты, кг/м³, $\dot{q}_1(t)$ скорость первой обобщенной координаты ленты, м/с.

Для примера расчета в данной модели в качестве двигателя ленточного конвейера использован асинхронный короткозамкнутый двигатель, который например, доступен в библиотеке SimPowerSystem пакета Matlab Simulink (рис. 6).

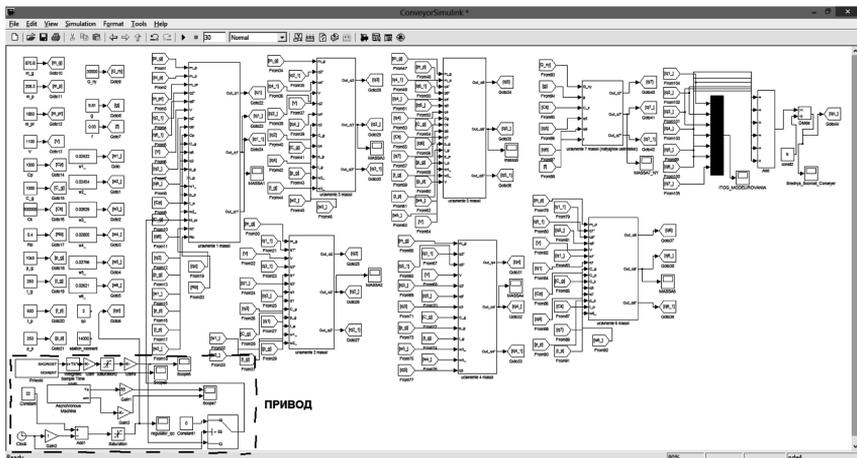


Рис. 5. Цифровая модель для анализа динамических процессов в ленточном конвейере

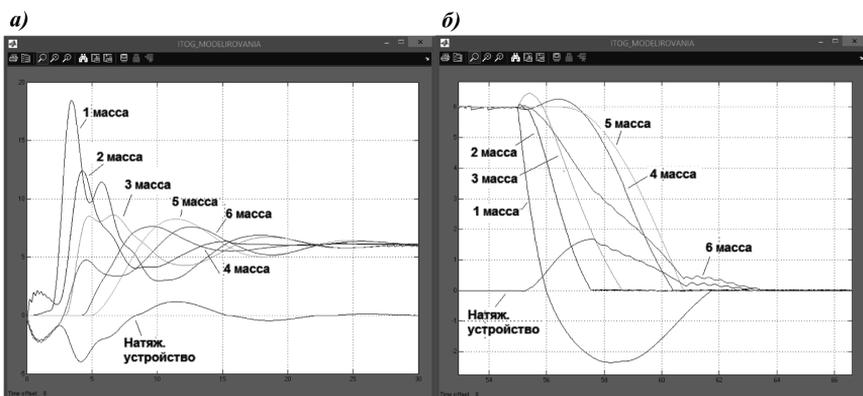


Рис. 6. Характер изменения скоростей обобщенных координат при пусковых (а) и тормозных (б) режимах ленточного конвейера

На основании выполненного моделирования динамического процесса определяется коэффициент динамичности k_d , и по формуле (2) находится расчетное натяжение S_p , по которому пользователь может рассчитать на прочность ленту, принятую ранее по условиям эксплуатации.

Наряду с решением задач динамики, данная модель позволяет оценить устойчивость беспробуксовочной работы приводного барабана в режиме пуска, анализировать динамику тормозных режимов при использовании имеющихся на конвейере тормозных устройств, в частности, создавать режимы, обеспечивающие продольную устойчивость ленты, исследовать динамические нагрузки в редукторе, приводном барабане и пр.

Программный комплекс для тягового расчета и анализа пусковых и тормозных режимов ленточного конвейера может использоваться для последующего решения оптимизационных задач. При этом разработанный программный комплекс является универсальным и может использоваться для расчетов ленточных конвейеров различного назначения: общего назначения, для открытых и подземных горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. – М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.
2. Галкин В.И., Дмитриев В.Г. и др. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий. – М.: Горная книга, 2011. – 527 с.
3. Дмитриев В.Г., Иванов Н.Ю. Математическая модель ленточного грубогабаритного конвейера для моделирования динамических процессов на

ЭВМ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 3. – Отдельные статьи (специальный выпуск).

4. *Черных И.В.* Авторские руководства по продуктам Matlab. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru>, свободный.

5. *Основы технологии COM в Delphi* [Электронный ресурс] – <http://www.realcoding.net/article/view/2872> – статья в интернете. **ПЛАТ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Дмитриев В.Г. – доктор технических наук, профессор,

Чередник П.Н. – аспирант, e-mail: xbox10@ya.ru,

МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC
621.867.2

V.G. Dmitriev, P.N. Cherednik

SOFTWARE PACKAGE FOR TRACTIVE CALCULATION AND ANALYSIS OF THE STARTING AND BRAKING MODES OF BELT CONVEYORS

Described software complex consists of two blocks: the sophisticated traction calculation of belt conveyor, allowing to determine the tension of the tape in characteristic points of the route of the pipeline and power required of the engine, and the calculation of dynamic tensions arise during start-up and braking, which are used to determine the dynamic factor. Developed on the basis of the mathematical model of the digital model of the pipeline with a constant structure in the form seven mass system differs in that when modeling dynamic processes ratios in mathematical and accordingly in the digital models are automatically recalculated on the basis of the results obtained in the first block. Digital model allows to analyze the starting and braking modes of the belt conveyor, to determine the time of starting and braking, and maximum speed and fluctuations tensioner and effort in it and others. In the digital model, you can use motors with different start-control equipment.

Key words: belt conveyor, automated calculation, traction calculation, dynamic processes, digital model, strength calculation of the tape.

AUTHORS

*Dmitriev V.G.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

*Cherednik P.N.*¹, Graduate Student, e-mail: xbox10@ya.ru,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Shakhmeyster L.G., Dmitriev V.G. *Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov* (Theory and design of belt conveyors), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 336 p.

2. Galkin V.I., Dmitriev V.G. *Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornykh predpriyatiy* (Modern theory of belt conveyors mining enterprises), Moscow, Gornaya kniga, 2011, 527 p.

3. Dmitriev V.G., Ivanov N.Yu. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 3. Special edition.

4. Chernykh I.V. *Avtorskie rukovodstva po produktam Matlab*, available at: <http://matlab.exponenta.ru>, свободный.

5. *Osnovy tekhnologii COM v Delphi*, available at: <http://www.realcoding.net/article/view/2872> статья в интернете.