

УДК 622.3.002.5

**В.Н. Ставицкий**Донецкий национальный технический университет, г. Донецк,  
кафедра «Горная электротехника и автоматика им.Р.М.Лейбова»E-mail: [dis\\_stv@ukr.net](mailto:dis_stv@ukr.net)**АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДЕРЖКИ КОНВЕЙЕРА****Аннотация**

**Ставицкий В.Н.** Алгоритм идентификации транспортной задержки конвейера. Представлены результаты анализа факторов, влияющих на динамику транспортирования грузов ленточным конвейером. Обоснована методика определения транспортной задержки.

**Ключевые слова:** конвейер, транспортная задержка, регулятор, система автоматической стабилизации.

**Проблема и ее связь с научными задачами.**

Ленточные конвейеры (ЛК) являются одним из самых распространенных средств транспортирования грузов на горных предприятиях. Обладая рядом неоспоримых преимуществ (непрерывность, широкие возможности для автоматизации, возможность транспортирования грузов в наклонных выработках, простота наращивания и разветвления линии, относительная безопасность), ЛК эффективно заменяют локомотивную и канатную откатку.

Одним из самых главных недостатков конвейерного транспорта является недостаточная эффективность применяемых систем привода. Данный недостаток особенно проявляется в условиях работы конвейера при неравномерном грузопотоке (участковые конвейеры). Колебания интенсивности поступления груза  $Q$  приводят к соответствующему изменению нагрузки на привод  $F$ , которая может варьироваться в довольно широких пределах [1]:

$$F = a \cdot \left( \frac{Q}{v} + b \right); \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий длину конвейера, сопротивление движению;  $b$  – коэффициент, учитывающий удельную массу ленты, роликов и сцепление между лентой и барабаном и углы обхвата лентой приводного и натяжного барабанов;  $v$  – скорость ленты.

Привод ЛК представлен асинхронными двигателями (АД) с короткозамкнутым ротором, что затрудняет реализацию возможности регулирования скорости в подземных условиях и влечет за собой следующие негативные явления:

- для исключения проскальзывания натяжное усилие должно превышать максимальное тяговое усилие. Это приводит к чрезмерной деформации и износу конвейерной ленты;
- постоянство скорости и ее независимость от уровня нагружения привода приводит к излишнему холостому “пробегу” ленты и, как следствие, ее излишнему износу;
- необходимость обеспечения работы привода при максимальной нагрузке, с одной стороны, и широкий диапазон варьирования реальной нагрузки, с другой, приводят к недоиспользованию АД по моменту, чрезмерному потреблению энергии и невозможности работы приводного АД в энергоэффективном режиме (максимум КПД и коэффициента мощности), соответствующем определенному уровню момента сопротивления ( $0.9M_{ном}$ ) [2].

Указанное подтверждает актуальность проблемы стабилизации нагрузки привода ЛК.

**Анализ исследований и публикаций.** Вопросам повышения эффективности конвейеров за счет регулирования нагрузки на привод посвящены работы Л.Г.Шахмейстера [4], В.Т.Полунина [5], В.В.Дмитриевой [6], Н.В.Смирновой [7] и других исследователей. Основными направлениями исследований являются следующие:

1. Применение средств регулирования грузопотока за счет использования накопительных систем (промежуточные бункеры, конвейеры), а также за счет регулирования скорости движения ленты. Последний вариант более предпочтителен ввиду большей гибкости и меньших капитальных затрат. Однако его техническая реализация затруднена в связи с отсутствием эффективных, недорогих, имеющих взрывозащищенное исполнение преобразовательных устройств, способных обеспечить регулирование частоты вращения приводного АД в широких пределах.

2. Обоснование структуры и параметров средств автоматизированного регулирования для конвейерного транспорта. При этом основной решаемой задачей является определение динамических параметров конвейера как объекта регулирования с учетом его распределенности, нестационарности и нелинейности, с целью последующего обоснования характеристик регулирующих устройств.

Как показывает практика эксплуатации рудничного конвейерного транспорта, несмотря на значительный объем проводимых исследований, пока не удалось достичь видимых успехов в области реализации полученных научных результатов. Подавляющее большинство конвейеров остаются нерегулируемыми по скорости движения рабочего органа.

**Обоснование направления исследований**

Для повышения эффективности работы конвейера, как следует из соотношения (1), необходимо поддерживать неизменным соотношение между интенсивностью грузопотока и скоростью ленты. Одно из наиболее эффективных решений заключается в применении средств частотного регулирования скорости асинхронного короткозамкнутого электродвигателя совместно с системой автоматической стабилизации (рис.1). При этом в качестве контролируемого параметра может быть принята одна из следующих величин: интенсивность грузопотока  $Q$ , статический момент сопротивления  $M_c$  или момент двигателя  $M$ . С технической точки зрения контролировать параметры грузопотока сложнее, чем момент на валу двигателя, который, собственно, и является конечной целью процесса стабилизации.

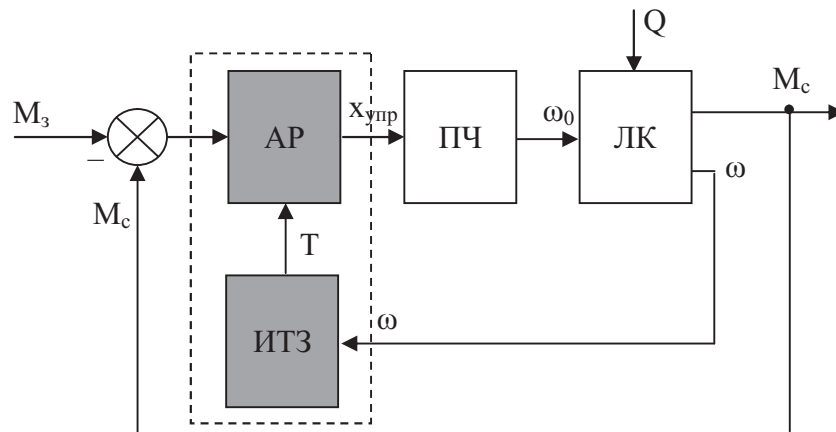


Рисунок 1 – Функциональная схема системы автоматической стабилизации нагрузки привода конвейера (АР – адаптивный регулятор; ИТЗ – идентификатор транспортной задержки; ЛК – ленточный конвейер; ПЧ – преобразователь частоты)

При поиске решения следует учесть ряд особенностей конвейера как объекта регулирования. Одной из них является то, что ЛК в динамическом отношении представляет собой звено запаздывания или, если воспользоваться представлением данного объекта в виде комбинации аperiodических звеньев [3], инерционный объект с постоянными времени, в сумме соответствующими транспортной задержке конвейера. Эффективное управление ЛК предполагает применение в составе системы автоматической стабилизации корректирующих устройств, компенсирующих влияние наиболее инерционных звеньев. При этом необходимо учесть, что конвейер с регулируемой скоростью движения ленты является нестационарным

объектом, поскольку его транспортная задержка определяется скоростью. Скорость же является измеряемой величиной, но не прогнозируемой, поскольку зависит от грузопотока – независимого случайного процесса. Таким образом, параметры регулятора должны корректироваться в процессе работы конвейера на основании данных о текущей скорости его рабочего органа (рис.1).

**Цель исследований.**

Конечная цель проводимых исследований - повышение эффективности ЛК путем стабилизации нагрузки привода. С учетом нестационарности объекта управления, а также с учетом использования для построения системы стабилизации средств микропроцессорной (МП) техники задача, ставящаяся в статье, может быть сформулирована следующим образом.

*Необходимо разработать методiku (алгоритм), позволяющую в реальном времени средствами МП-техники определять транспортную задержку конвейера на основании данных о его протяженности и текущей скорости ленты.*

**Методы и результаты исследований.**

Для конвейера транспортная задержка  $T$  определяется как продолжительность временного интервала, в течение которого поступивший груз находится на ленте. Величина  $T$  зависит от длины конвейера  $L$ , скорости движения  $v(t)$  и момента схода груза с ленты  $t_k$ . Указанные величины связаны между собой следующим соотношением:

$$\int_{t_k - T(t_k)}^{t_k} v(t) dt = L \tag{2}$$

Для определения транспортной задержки необходимо проинтегрировать соотношение (2). Аналитическое решение приводит к следующему алгебраическому уравнению:

$$x[t_k] - x[t_k - T(t_k)] = L \tag{3}$$

где  $x(t)$  – путь, пройденный грузом, определяемый, как первообразная функции  $v(t)$ .

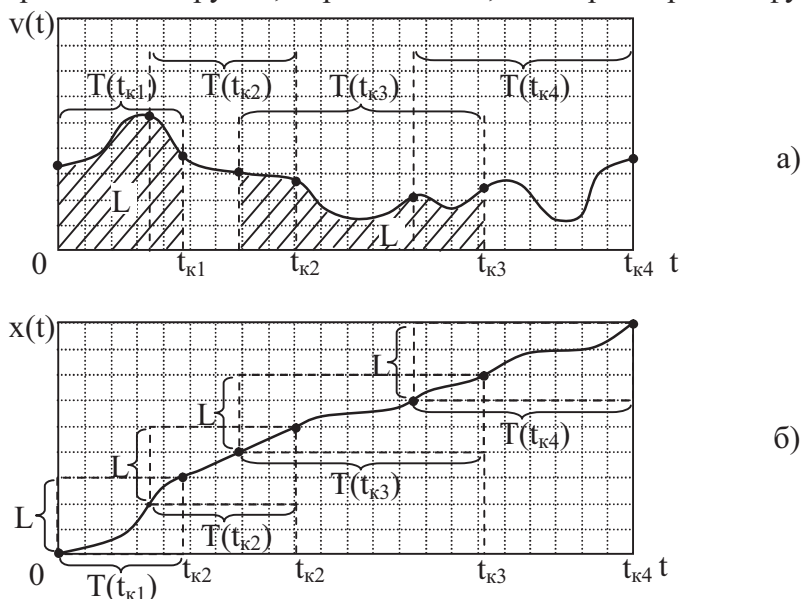


Рисунок 2 – Транспортная задержка конвейера с регулируемым приводом

Иллюстрацией данной взаимосвязи могут быть графики, представленные на рис.2. Рис.2.а соответствует временной зависимости скорости движения ленты. Расстоянию, пройденному грузом, соответствует площадь криволинейной трапеции, ограниченная сверху функцией  $v(t)$ , а слева и справа – моментами поступления и схода груза с ленты (одна из заштрихованных областей на графике). Постоянство пройденного пути (неизменная длина конвейера) означает фиксированную площадь данной фигуры. Данное ограничение означает, что при переменной скорости движения ленты с течением времени будет меняться длина

нижнего основания – время транспортирования груза. Т.е. по мере равномерного скольжения вдоль оси времени криволинейная трапеция сохраняет свою площадь неизменной за счет сужения или расширения нижнего основания, а если более конкретно – за счет неравномерного скольжения левой границы трапеции. Таким образом, транспортная задержка конвейера определяется скоростью движения ленты на интервале транспортирования груза. Сама эта скорость также является величиной, зависимой от времени. В итоге, можно констатировать, что транспортная задержка  $T$  зависит от момента времени  $t_k$ , в который груз сходит с ленты.

Рис.2.б иллюстрирует зависимость пути, пройденного грузом, поступающим на ленту. Время транспортирования может быть определено как горизонтальная сторона прямоугольника, криволинейной диагональю которого является отрезок графика функции  $x(t)$ , ограниченный моментами поступления и схода груза с ленты. При этом по мере скольжения прямоугольника длина его вертикальной стороны остается неизменной и равной длине конвейера  $L$ . Данный график, как и предыдущий, подтверждает зависимость транспортной задержки от момента схода груза с ленты. Рис.2.б является графической интерпретацией соотношения (3).

Из соотношения (3) следует, что при наличии аналитической зависимости, может быть установлен закон изменения величины транспортной задержки  $T(t_k)$ . Однако получить зависимость  $v(t)$  в аналитическом виде практически невозможно, поскольку скорость конвейера в режиме стабилизации нагрузки является величиной, зависимой от случайного входного воздействия – интенсивности грузопотока, и наперед предсказана быть не может.

Идентификация транспортной задержки в реальном времени может быть осуществлена исключительно численным методом. Несмотря на ограниченность численного решения, оно обладает рядом преимуществ, среди которых: простота, возможность реализации доступными средствами цифровой программной схемотехники. Основная задача сводится к обоснованию алгоритма обработки входного непрерывного массива, содержащего информацию о текущей скорости ленты. При этом необходимо принять во внимание ограниченность памяти и вычислительных возможностей используемого цифрового устройства (возможность хранения относительно небольшого объема данных, а также быстрого и эффективного выполнения ограниченного набора простейших арифметических и логических операций).

Для составления требуемого алгоритма следует воспользоваться дискретным представлением определенного интеграла (3). Для этого интересующий промежуток времени разбивается на равные малые интервалы шириной  $\Delta t$ . Причем, на протяжении каждого интервала скорость движения ленты считается неизменной и равной  $v_i$  (где  $i$  - номер рассматриваемого интервала, рис.3). Таким образом, непрерывный аргумент  $t$  заменяется дискретным  $t_i = i \cdot \Delta t$ , а непрерывная функция  $v(t)$  – массивом дискретных значений  $v_i$ . При этом, в течение интервала  $\Delta t$  лента конвейера, а значит и груз, находящийся на ней, совершает перемещение  $\Delta x_i = v_i \cdot \Delta t$ , которому на рис.3 соответствует площадь элементарного прямоугольника. Результирующее перемещение груза конвейером в течение интервала времени  $t_j - t_k$  определяется как сумма элементарных перемещений  $\Delta x_i$ :

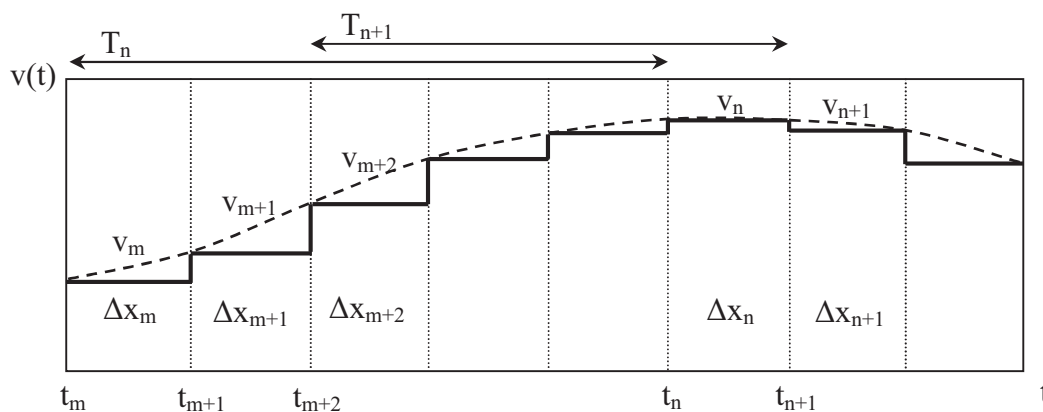


Рисунок 3 – К алгоритму определения транспортной задержки конвейера

$$X_{k,j} = \sum_{i=j}^{k-1} v_i \cdot \Delta t \quad (4)$$

Алгоритм определения транспортной задержки может быть сформулирован на основании анализа перемещения последовательных фрагментов груза с использованием дискретного представления рассматриваемого процесса.

Предположим, фрагмент груза, который покинул конвейер в момент времени  $t_n$ , поступил на ленту в момент  $t_m$ . При этом он преодолел расстояние  $X_{m,n}$ . Подсчет ведется с точностью до ближайшего левого (по отношению к рассматриваемому временному интервалу) элементарного перемещения  $\Delta x_m$ , пока сумма не превысит порогового значения  $L$ . Данной ситуации соответствует неравенство, являющееся дискретным представлением интеграла (2):

$$X_{m,n} - \Delta x_m < L \leq X_{m,n} \quad (5)$$

Транспортная задержка конвейера составит:

$$T_n = \sum_{i=m}^{n-1} \Delta t = (n - m) \cdot \Delta t \quad (6)$$

Т.е. подсчет транспортной задержки ведется параллельно с контролем перемещения - количество элементарных интервалов  $\Delta t$  в соотношении (6) определяется условием (5).

Следующий фрагмент груза, покинувший конвейер в момент времени  $t_{n+1}$ , поступил на ленту в момент  $t_{m+b}$ . Расстояние, пройденное им, по-прежнему составляет  $L$  и складывается из элементарных перемещений на интервале времени от  $t_{m+b}$  до  $t_{n+1}$ :

$$X_{(m+b),(n+1)} - \Delta x_{m+b} < L \leq X_{(m+b),(n+1)} \quad (7)$$

Или, если отталкиваться от пути, пройденного предыдущим фрагментом груза ( $X_{m,n}$ ):

$$X_{m,n} + \Delta x_n - \sum_{i=m}^{m+b} \Delta x_i < L \leq X_{m,n} + \Delta x_n - \sum_{i=m}^{m+b-1} \Delta x_i \quad (8)$$

Транспортная задержка конвейера в этот момент времени составит:

$$T_{n+1} = \sum_{i=m+b}^n \Delta t = (n - m - b + 1) \cdot \Delta t = T_n + (1 - b) \cdot \Delta t \quad (9)$$

Количество  $b$  лишних элементарных интервалов  $\Delta t$ , на которое необходимо уменьшить ранее полученное значение транспортной задержки ( $T_n$ ), определяется путем итераций - последовательного вычитания элементарных фрагментов пройденного пути, отвечающих началу рассматриваемого промежутка, и сравнения полученного значения с заданной величиной  $L$  после каждого вычитания (условие (9)).

Таким образом, вычисление текущего значения транспортной задержки при переменной скорости движения представляет собой циклическую рекуррентную последовательность. Алгоритм предполагает нахождение текущего значения транспортной задержки на основе использования информации о предыдущем значении ( $T_n$ ) и текущем значении скорости  $v_{n+1}$ .

Особенностью данного алгоритма является то, что в процессе вычисления необходимо хранить в оперативной памяти (ОЗУ) МП-устройства динамический массив переменной величины, содержащий информацию о мгновенных скоростях на временном интервале от  $t_m$  до  $t_n$  (от момента поступления до момента схода с ленты текущего фрагмента груза). Максимальный объем  $N$  массива зависит от длины конвейера  $L$ , минимально возможной скорости транспортирования и длительности элементарного временного интервала  $\Delta t$ :

$$N = L / (v_{\min} \cdot \Delta t) \quad (10)$$

В случае реализации предлагаемой методики средствами МП-техники, необходимо постоянно контролировать начало ( $m$ ) и конец ( $n$ ) массива мгновенных значений скорости во избежание выхода за пределы выделенного участка ОЗУ, предусмотрев в алгоритме соответствующие процедуры (рис.4).

Базовым значением для данной вычислительной последовательности является на-

чальное условие в виде первоначального значения величины задержки  $T_0$ . Однако в момент времени  $t_0$ , о котором идет речь, ни один из фрагментов перемещаемого груза еще не успел сойти с конвейера (при условии, что на начало работы алгоритма груз на ленте отсутствовал), что означает отсутствие информации о фактической транспортной задержке. Для обеспечения корректной работы алгоритма предлагается воспользоваться понятием *мгновенной транспортной задержки* (в отличие от *фактической транспортной задержки*, о которой шла речь до этого момента).

Под мгновенной транспортной задержкой  $\tau(t)$  понимается интервал времени, который потребовался бы конвейеру для перемещения фрагмента груза на всю длину, при условии движения с постоянной скоростью, равной скорости ленты в момент поступления данного фрагмента:

$$\tau(t) = L/v(t) \tag{11}$$

В качестве начального условия используется мгновенная транспортная задержка, соответствующая начальному моменту времени  $t_0$ . Отталкиваясь от этой величины, в конечном итоге данная методика позволяет выйти на фактическую величину транспортной задержки.

Изложенные выше соображения положены в основу алгоритма, позволяющего определить в реальном времени величину фактической транспортной задержки конвейера на основе информации о текущей скорости ленты. Блок-схема алгоритма представлена на рис.5. Представленный алгоритм содержит две ветви. Основная (блоки 20 - 26) – соответствующая интервалу работы ЛК, начиная с момента схода с ленты первого поступившего на нее фрагмента груза и до конца работы – ведет подсчет фактической транспортной задержки (соотношение (9)), контролируя путь, пройденный грузом (неравенство (8)). Подготовительная ветвь (блоки 15 - 19) соответствует интервалу накопления груза на ленте до момента, когда первый поступивший фрагмент сойдет с конвейера. В этом режиме фактическая транспортная задержка пока не установлена – ни один фрагмент груза не дошел до конца ленты. Идет накопление необходимой информации – массива мгновенных значений скорости. При этом указатель на начало массива ( $m$ ) фиксируется на нулевой отметке, т.е. скорость ленты до начала работы конвейера (до момента  $t_0$ ) принимается неизменной и равной значению  $V_0$ . Указатель на конец массива ( $n$ ) увеличивается по мере накопления данных. В основном режиме оба указателя модифицируются в соответствии с реальным процессом перемещения груза на ленте. При этом массив «скользит» по выделенному пространству ОЗУ (рис.4). Переход от подготовительного к основному режиму осуществляется путем контроля флага состояния ( $f$ ).

На рис.6 представлены результаты применения данной методики для моделирования работы ЛК длиной 200м. Скорость ленты варьируется в диапазоне 1 - 4м/с. Для реализации модели использована программа MathCAD. Представленные диаграммы подтверждают корректность разработанного алгоритма идентификации транспортной задержки и возможность его использования при разработке системы стабилизации нагрузки привода ЛК.

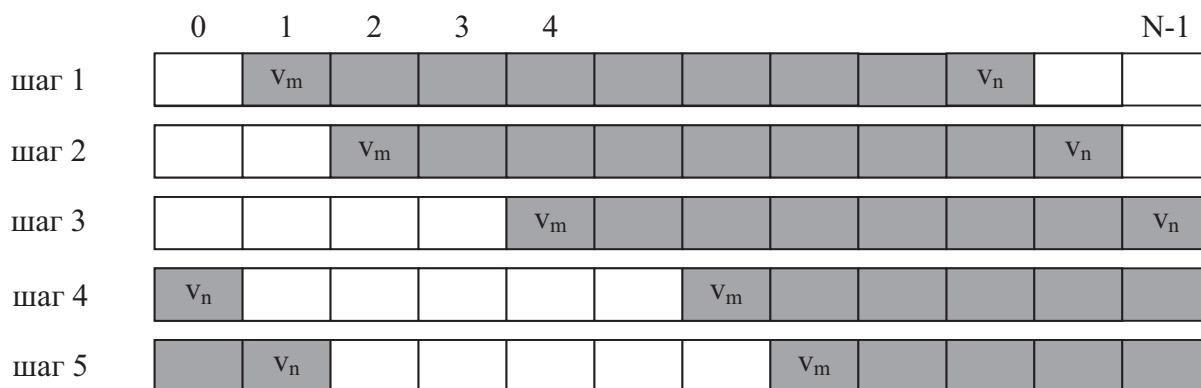


Рисунок 4 – Работа с указателями начала и конца динамического массива

**Выводы и направления дальнейших исследований.**

1. На основе анализа факторов, влияющих на динамику транспортного потока, предложена методика определения транспортной задержки при переменной скорости конвейера.
2. Данная методика реализована в виде циклического рекуррентного вычислительного алгоритма, учитывающего технические особенности современных МП-средств.
3. Предложенный алгоритм может быть использован при моделировании работы ЛК, а также при разработке цифрового адаптивного регулятора для системы автоматической стабилизации нагрузки электропривода.

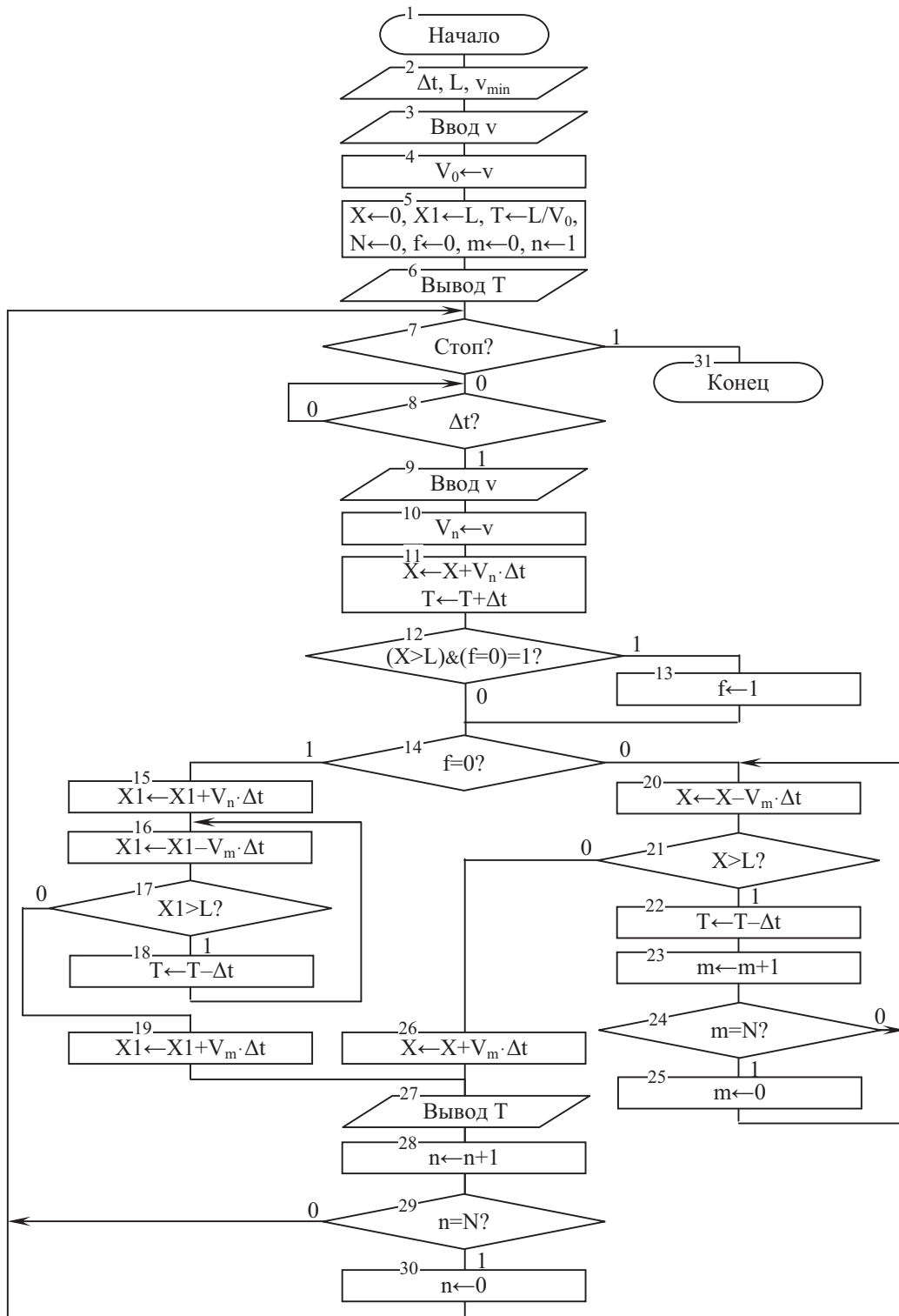


Рисунок 5 – Алгоритм определения транспортной задержки конвейера

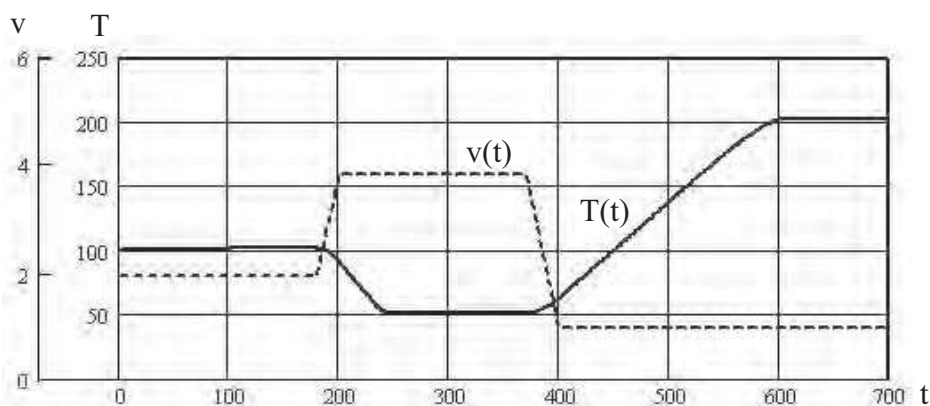


Рисунок 6 – Использование разработанного алгоритма при моделировании работы конвейера с регулируемым приводом.

### Литература

1. Малиновский А.К. Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников: [учебник для вузов] / А.К. Малиновский. – М.: Недра, 1987. – 277 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины: [учебник для вузов] / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2002. – 607 с.
3. Лукас В.А. Теория автоматического управления: [учебник для вузов] / В.А. Лукас. – М.: Недра, 1990. – 416 с.
4. Шахмейстер Л.Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости ленточных конвейеров / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев, А.К. Лобочева. – М.: Машиностроение, 1972. – 160 с.
5. Полуниин В.Т. Эффективность регулирования скорости шахтных конвейеров / В.Т.Полуниин // Научные труды МГИ. – 1968. – № 53. – С. 87 – 95.
6. Дмитриева В.В. Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера: дис. ... кандидата техн. наук: 05.13.06 / Валерия Валерьевна Дмитриева. – М., 2005. – 162 с.
7. Смирнова Н.В. Динамічні характеристики стрічкового конвеєра та методи їх оцінки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.06 / Н.В.Смирнова. – Дніпропетровськ, 2000. – 17 с.

Надійшла до редакції:  
13.01.2011

Рекомендовано до друку:  
канд. техн. наук, доц. Маренич К.Н.

### Abstract

**Stavitskiy V.N.** *The algorithm of identification of a transport delay of the conveyor. The results of analysis of factors affecting the dynamics of cargo transportation by the tape conveyor are presented. The method of transport delay determining is grounded.*

**Keywords:** conveyor, transport delay, controler, system of the automatic stabilizing.

### Анотація

**Ставицький В.М.** *Алгоритм ідентифікації транспортної затримки конвеєра. Представлені результати аналізу факторів, що впливають на динаміку транспортування вантажів стрічковим конвеєром. Обґрунтовано методику визначення транспортної затримки.*

**Ключові слова:** конвеєр, транспортна затримка, регулятор, система автоматичної стабілізації.

© Ставицький В.М., 2011