

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ДОЗИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ КОМБИКОРМОВ

В статье разрабатывается имитационная модель системы автоматического управления технологическим процессом дозирования компонентов комбикормов. На основе модели исследуются переходные процессы на выходе системы.

В статті розробляється імітаційна модель системи автоматичного керування технологічним процесом дозування компонентів комбикормів. На основі моделі досліджуються перехідні процеси на виході системи.

The imitation model of the automatic system of control by the dispensing process of feed ingredients is developed in the article. On the basis of the model the transient processes are investigated.

**Вступление:** для предприятий пищевой и перерабатывающей промышленности производительность труда и эффективность производства во многом определяются степенью автоматизации технологических процессов. Повышение производительности и эффективности производства достигается за счет частичного или полного исключения человеческого фактора, благодаря чему реализуется более точное управление технологическим процессом на основе сбора и анализа информации о сырьевых потоках и качестве продукции.

Система автоматического управления технологическим процессом дозирования компонентов комбикормов является частью АСУ ТП производства комбикормов. Система выполняет функцию автоматического управления процессом заполнения бункера-дозатора дозируемым материалом. Приемлемыми считаются следующие показатели работы системы [1]:

- относительная ошибка дозирования компонентов комбикормов не должна превышать 0,7%;
- с целью повышения производительности труда длительность переходного процесса должна быть минимальной.

**Последние достижения:** в статье [1] разработана имитационная модель системы автоматического управления технологическим процессом дозирования компонентов комбикормов, которая реализована в приложении математического пакета Matlab «Simulink». На основе данной имитационной модели проведены исследования переходных процессов на выходе системы. Однако, в статье [1] рассмотрен только случай падения дозируемого материала с питателя в бункер-дозатор в виде «падающего столба», недостаточно обоснованы зависимости параметров модели от конструктивных параметров питателя и бункера-дозатора, а также не исследовано влияние изменения параметров модели на качество переходного процесса на выходе системы.

В связи с этим авторами статьи **поставлена цель:**

- усовершенствовать имитационную модель системы автоматического управления технологическим процессом дозирования компонентов комбикормов, добавив новый конструктивный компонент «трубу» между питателем и

бункером-дозатором и введя в модель дополнительную транспортную задержку при транспортировании материала по трубе;

- рассчитать параметры имитационной модели системы с учетом конструктивных параметров элементов системы и особенностей их режимов работы;
- провести исследование зависимости качества переходного процесса от изменений параметров имитационной модели системы.

**Изложение основного материала исследований.** Элементами системы автоматического управления (САУ) технологическим процессом дозирования компонентов комбикормов являются: блок управления на базе микропроцессора (см. рис.1), преобразователь частоты напряжения питания электродвигателя привода питателя, привод питателя, шнековый питатель, труба, бункер-дозатор, тензодатчики, сумматор-усилитель сигналов от тензодатчиков.

В шнековый питатель материал подается из расходного бункера через его регулируемый затвор. Далее он транспортируется лопастями шнека и выгружается в трубу, через которую попадает в бункер дозатор. В местах крепления бункера-дозатора установлены три тензодатчика, с помощью которых фиксируется масса дозируемого материала в бункере. После усиления в блоке «сумматор-усилитель» усредненный сигнал с тензодатчиков вводится в микропроцессор блока управления.

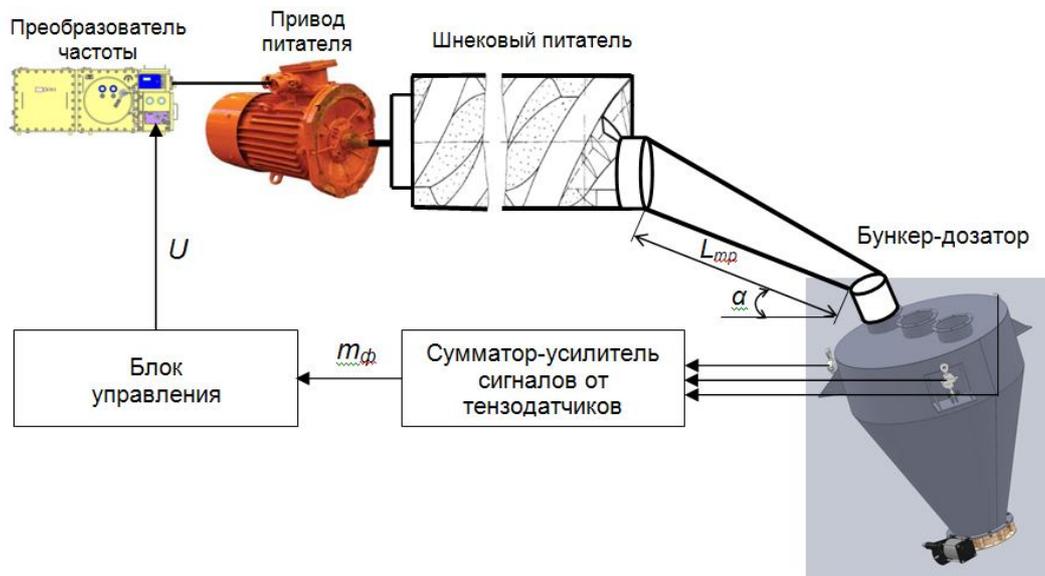


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления технологическим процессом дозирования компонентов комбикормов

Таким образом, по замкнутому контуру происходит автоматическое управление процессом заполнения бункера дозируемым материалом посредством регулирования скорости вращения шнека питателя. Управляющий сигнал с блока управления на преобразователь частоты формируется в функции отклонения фактической массы дозируемого материала в бункере от заданной (см. рис. 1):

$$U = f(m_3 - m_\phi)$$

где  $U$  – управляющий сигнал с блока управления, Гц;  $m_3$  и  $m_\phi$  – соответственно заданная и фактическая масса дозируемого материала в бункере, кг.

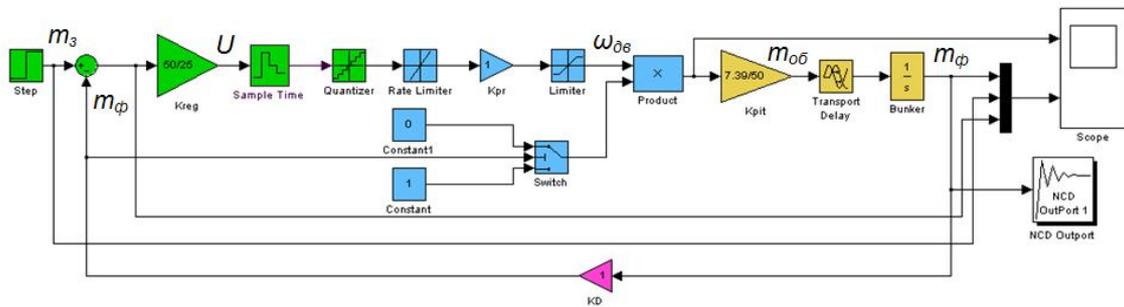


Рис. 2. Имитационная модель системы автоматического управления технологическим процессом дозирования компонентов комбикормов в приложении «Simulink»

Зеленым цветом представлены блоки, имитирующие работу блока управления (с позиции исследования динамических свойств). В блоке «Kreg» задается коэффициент усиления регулятора (используется П-регулятор). Блоки «Sample Time» и «Quantizer» осуществляют квантование управляющего сигнала соответственно по времени (шаг квантования принят 1 с) и по уровню (шаг квантования принят 1 Гц), реализуя дискретное управление двигателем питателя. С помощью блока «Step» формируется заданное значение массы дозируемого материала в бункере  $m_3$ .

Блоки синего цвета модулируют работу преобразователя частоты. Коэффициент усиления преобразователя частоты равен единице (задается в блоке «Kpr»), поскольку номинальная скорость вращения вала двигателя питателя (50 об/с) равна номинальной частоте напряжения в сети питания (50 Гц). С целью предотвращения резких перепадов моментов сопротивлений в механических частях редуктора привода питателя в переходных режимах в преобразователе частоты предусмотрено ограничение скорости изменения во времени управляющей величины (задано в блоке «Rate Limiter» на уровне 50 Гц/с). Блок «Limiter» ограничивает диапазон изменения скорости вращения вала двигателя питателя: от 0 до 50 об/с. Блок «Switch» имитирует отключение двигателя привода питателя от сети питания при уменьшении ошибки дозирования ниже заданного уровня (0%).

Блоки желтого цвета имитируют работу объекта управления: блок «Kpit» является динамической моделью питателя, блок «Transport Delay» имитирует транспортное запаздывание при транспортировании материала по трубе и его падении в бункер-дозатор. Блок «Bunker» на основе интегратора имитирует процесс накопления в бункере дозируемого материала.

Сумматор-усилитель сигналов от тензодатчиков и сами тензодатчики заданы в виде усилительного звена «KD» с коэффициентом усиления, равным единице.

Расчет коэффициента усиления регулятора веса  $K_{reg}$  осуществляется для минимальной заданной массы дозируемого материала в бункере  $m_{3,min}=25$  кг:

$$K_{reg} = \frac{U_{max}}{m_{з. min}} = \frac{50}{25}, \text{ Гц/кг},$$

где  $U_{max}$  – максимальное значение управляющей величины на выходе регулятора веса, Гц.

При увеличении заданной массы дозируемого материала в бункере на выходе регулятора веса сформируется управляющий сигнал больше 50 Гц, однако за счет блока ограничения диапазона «Limiter» скорость вращения вала двигателя питателя не превысит 50 об/с. Это приведет только к увеличению времени, в течение которого вал двигателя будет вращаться с максимальной скоростью, что соответствует работе питателя с максимальной производительностью.

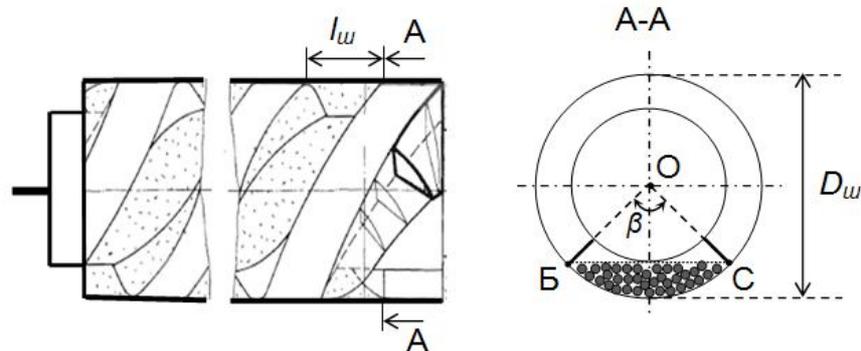


Рис. 3. Конструктивная схема шнекового питателя

Для вычисления коэффициента усиления шнекового питателя  $K_{pit}$  необходимо определить массу дозируемого материала, который выгружается в трубу за один оборот шнека. С этой целью определим объем пространства между лопастями шнека, которое заполняется дозируемым материалом. Чтобы коэффициент усиления питателя в течение переходного процесса не изменялся в широком диапазоне, необходимо угол поворота затвора расходного бункера изменять в функции скорости вращения шнека питателя (вала двигателя привода), обеспечивая постоянное значение усредненного угла заполнения пространства дозируемым материалом между лопастями шнека. Стабилизируемый усредненный угол заполнения пространства между лопастями шнека материалом  $\beta$  выбирается по максимальной транспортирующей и погрузочной способности питателя (для минимизации длительности переходного процесса). В статье для питателя диаметром  $D_w$ , равным 0,6 м., угол  $\beta$  выбран на уровне  $100^\circ$ .

Рассчитаем площадь треугольника ОВС.

$$S_{\Delta} = \left(\frac{D_w}{2}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) = 0,044, \text{ м}^2.$$

Далее определим площадь поперечного сечения пространства между лопастями шнека питателя, заполненного дозируемым материалом:

$$S_3 = \pi \cdot \left(\frac{D_w}{2}\right)^2 \cdot \frac{\beta}{360} - S_{\Delta} = 0,034, \text{ м}^2.$$

Учитывая, что расстояние между лопастями шнека питателя  $l_{ш}$  равно 0,27 м, определим объем пространства между лопастями шнека, которое заполнено дозируемым материалом:

$$V_3 = S_3 \cdot l_{ш} = 0,00924, \text{ м}^3.$$

Приняв насыпную плотность дозируемого материала  $\rho$  равной 800 кг/м<sup>3</sup>, вычислим массу дозируемого материала, который выгружается в трубу за один оборот шнека:

$$m_{об} = V_3 \cdot \rho = 7,39, \text{ кг}.$$

С учетом коэффициента передачи редуктора привода питателя (шнек питателя вращается со скоростью 1 об/с), коэффициент усиления шнекового питателя будет равным:

$$K_{pit} = m_{об} \cdot \frac{1}{50} = \frac{7,39}{50}, \text{ кг} \cdot \text{с}.$$

Рассчитаем время задержки поступления материала в бункер-дозатор с питателя. Для нахождения времени, в течение которого материал перемещается по трубе, вычислим ускорение движения материала по трубе из формулы:

$$m_{об} \cdot a_{mp} = m_{об} \cdot g \cdot \cos(90 - \alpha) - m_{об} \cdot g \cdot \sin(90 - \alpha) \cdot k_{mp},$$

где  $\alpha$  – угол наклона трубы относительно поверхности земли ( $\alpha = 40^\circ$ );  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ );  $k_{mp}$  – коэффициент трения скольжения между дозируемым материалом и стальной поверхностью трубы (принят равным 0,35 [2]).

Тогда ускорение движения материала по трубе:

$$a_{mp} = g \cdot \cos(90 - \alpha) - g \cdot \sin(90 - \alpha) \cdot k_{mp} = 3,67, \text{ м/с}^2.$$

Время, в течение которого дозируемый материал перемещается по трубе, определится из формулы:

$$t_{mp} = \sqrt{\frac{L_{mp}}{a_{mp}}} = 1,044, \text{ с},$$

где  $L_{mp}$  – длина трубы ( $L_{mp} = 4 \text{ м}$ ).

Время падения материала с конечной части трубы в бункер-дозатор (усредненное значение высоты падающего столба  $h$  берется равным 1 м):

$$t_{пад} = \sqrt{\frac{h}{g}} = 0,319, \text{ с}.$$

С учетом того, что при запуске питателя внутри его по всей длине уже находится дозируемый материал, время задержки поступления материала в бункер-дозатор с питателя равно:

$$t_3 = t_{mp} + t_{пад} = 1,363, \text{ с}.$$

Коэффициент усиления интегратора, который имитирует процесс заполнения бункера-дозатора материалом, принимается равным единице, поскольку расчет коэффициента усиления шнекового питателя был привязан к временному отрезку 1 с (период оборота шнека).

В ходе разработки имитационной модели САУ технологическим процессом дозирования компонентов комбикормов были сделаны следующие допущения:

- статические характеристики элементов системы принимаются линейными;
- не учитывается начальная скорость транспортируемого материала при его выгрузке из питателя;

- принимается, что перемещаемая масса материала имеет форму части полого цилиндра, тогда как в действительности она имеет форму части усеченного полого конуса с различным углом заполнения пространства между лопастями транспортируемым материалом. При этом берется среднее значение угла заполнения материалом по всей длине пространства между лопастями. Поскольку нас интересует только масса выгружаемого материала за оборот шнека, а не динамика процесса транспортирования, это допущение правомерно;

- не учитывается сложный характер формирования коэффициента трения скольжения между материалом и стальной поверхностью – принимается, что он постоянен на всей площади контакта материала с поверхностью трубы;

- не учитывается изменение во времени задержки поступления материала в бункер-дозатор с трубы по причине падения материала из-за изменения высоты падающего столба. Берется усредненное значение высоты падающего столба.

Из-за трех последних допущений не учитывается изменение транспортной задержки в ходе переходного процесса. Поэтому в статье проводится исследование системы на робастность по этому параметру модели.

Кроме того, не учитываются переходные процессы в электроприводе питателя, преобразователе частоты, блоке управления, сумматоре-усилителе и тензодатчиках ввиду их быстротечности по сравнению с переходным процессом на выходе системы.

Проведем моделирование переходного процесса на выходе САУ при дозировании минимальной массы материала 25 кг, когда предъявляется повышенное требование к точности дозирования компонентов комбикормов.

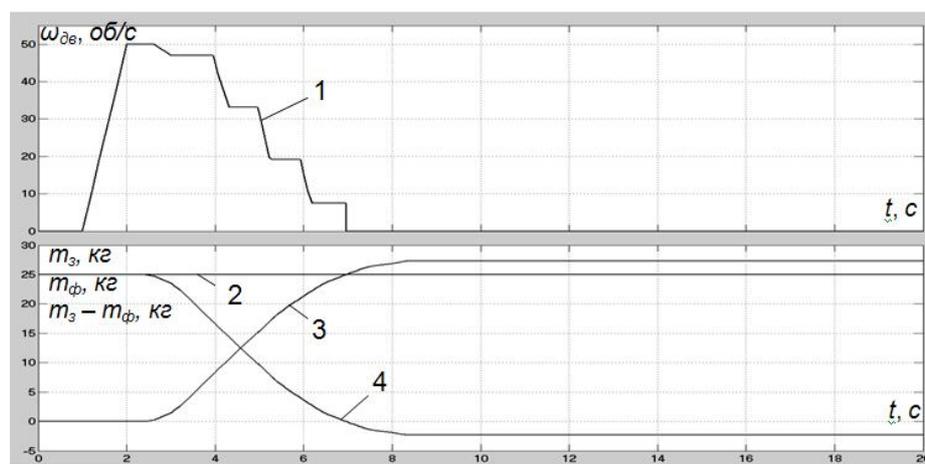


Рис. 4. Изменение во времени скорости вращения вала двигателя привода питателя (1), заданной  $m_z$  (2) и фактической  $m_\phi$  (3) массы дозируемого материала, ошибки дозирования  $m_z - m_\phi$  (4) при шаге квантования по времени управляющего сигнала 1 с

Из рис.4 видно, что высокий коэффициент усиления шнекового питателя при дозировании небольших масс материала приводит к появлению значительной статической ошибки дозирования на уровне 9,1%. С другой стороны, с позиции сокращения длительности переходного процесса нежелательно уменьшать угол заполнения пространства между лопастями дозируемым материалом и, соответственно, массу материала, выгружаемого за один оборот шнека. Поэтому предлагается уменьшить шаг квантования по времени управляющего сигнала с 1 с до 0,2 с, что позволит регулятору более точно обрабатывать отклонение фактической управляемой величины от заданной (результаты моделирования работы САУ с шагом квантования по времени управляющего сигнала 0,2 с представлены на рис. 5).

Как заметно из рис.5, уменьшение шага квантования по времени управляющего сигнала с 1 с до 0,2 с приводит к уменьшению относительной статической ошибки дозирования с 9,1 % до 0,52 %, что удовлетворяет поставленным требованиям к системе.

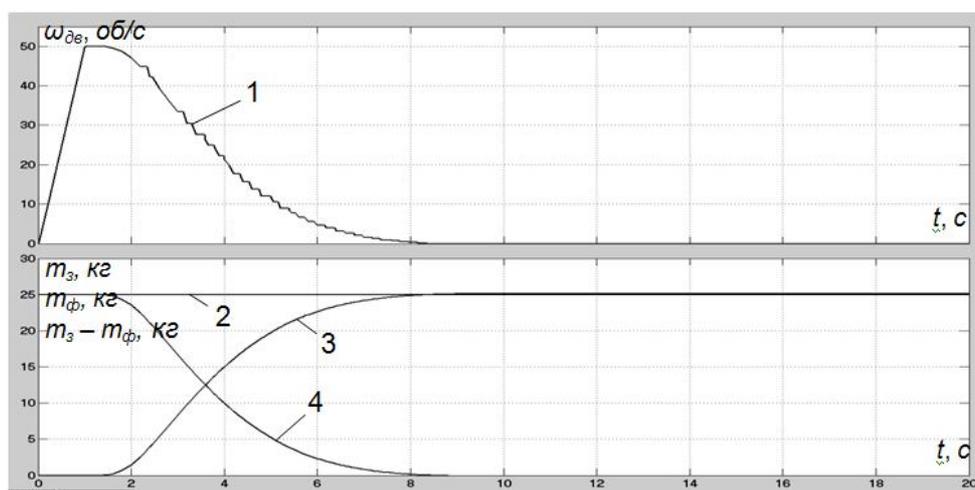


Рис. 5. Изменение во времени скорости вращения вала двигателя привода питателя (1), заданной  $m_з$  (2) и фактической  $m_ф$  (3) массы дозируемого материала, ошибки дозирования  $m_з - m_ф$  (4) при шаге квантования по времени управляющего сигнала 0,2 с

С помощью блока «Nonlinear control design» приложения «Simulink» проведено исследование САУ технологическим процессом дозирования компонентов комбикормов на робастность по транспортной задержке. При этом минимальное граничное значение транспортной задержки бралось для случая без трубы (с выхода питателя материал падает сразу в бункер-дозатор), максимальное – для коэффициента трения скольжения  $k_{тр}$ , увеличенного на 23% до 0,43.

Как видно из рис.6, отсутствие трубы приводит к увеличению длительности переходного процесса с 6,5 до 10 с из-за уменьшения временного интервала, в течение которого питатель работает с максимальной производительностью. Данное увеличение длительности переходного процесса является приемлемым для рассматриваемого технологического процесса.

Увеличение коэффициента трения скольжения  $k_{mp}$  на 23% (кривая 3 на рис.6) приводит к увеличению относительной статической ошибки дозирования с 0,52 % до 0,6 %. Дальнейшее увеличение коэффициента трения скольжения  $k_{mp}$  вызовет увеличение относительной статической ошибки дозирования до 1 %, что является неприемлемым согласно требованиям к системе. В связи с этим необходимо либо дальше уменьшать шаг квантования по времени управляющего сигнала, либо уменьшать угол заполнения дозируемым материалом пространства между лопастями шнека (коэффициент усиления питателя).

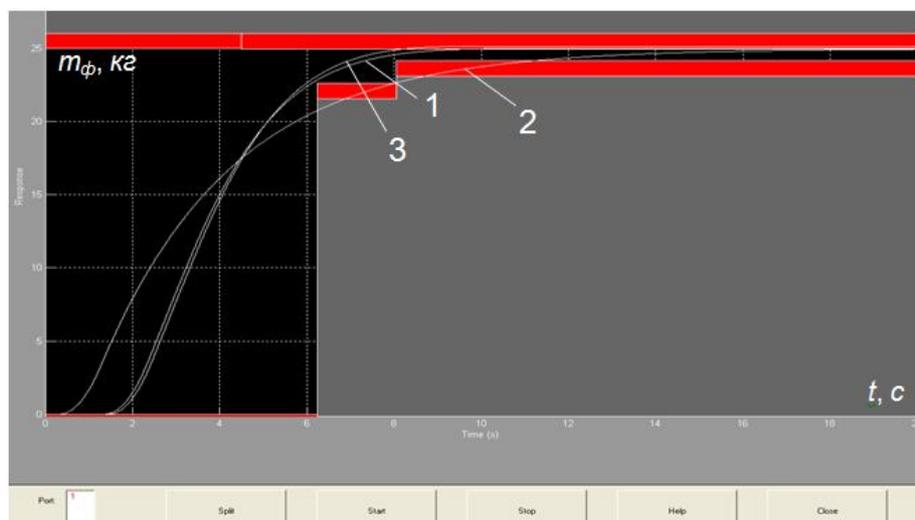


Рис. 6. Переходные процессы на выходе исследуемой САУ при исходной транспортной задержке (1), для случая без трубы (2) и при коэффициенте трения скольжения, увеличенном на 23% (3)

### Выводы:

- при дозировании малых масс материала (например, 25 кг) для обеспечения минимальной длительности переходного процесса на выходе системы с высокой точностью дозирования необходимо, чтобы шаг квантования по времени управляющего сигнала не превышал 0,2 с;

- отсутствие трубы между питателем и бункером-дозатором приводит к увеличению длительности переходного процесса с 6,5 до 10 с, что является приемлемым для рассматриваемого технологического процесса;

- превышение коэффициентом трения скольжения  $k_{mp}$  значения 0,43 приводит к появлению относительной статической ошибки дозирования до 1%, что является неприемлемым для рассматриваемого технологического процесса. Уменьшить ошибку можно за счет уменьшения шага квантования по времени управляющего сигнала, либо за счет уменьшения угла заполнения дозируемым материалом пространства между лопастями шнека (коэффициента усиления питателя).

### Список литературы

1. Букреев В. АСУ ТП производства комбикормов на базе контроллера Fastwel RTU 188-BS / В. Букреев, Н. Гусев, М. Нечаев, И. Краснов, Р. Гурьев, С. Кремис // Современные технологии автоматизации. — 2006. — № 1. — С. 74—79.

2. Зверев С.В. Физические свойства зерна и продуктов его переработки / С.В. Зверев, Н.С. Зверева. — М. : ДеЛи принт, 2007. — 176 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесаревим В.В.  
Надійшла до редакції 12.10.2012*

УДК 621.01.

© И.Н. Мацюк, Э.М. Шляхов

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШЕСТИЗВЕННОЙ ЧЕТЫРЕХПОВОДКОВОЙ СТРУКТУРНОЙ ГРУППЫ ТРЕТЬЕГО КЛАССА В ПРОГРАММЕ MATHCAD**

Рассмотрен метод решения задач кинематики плоских структурных групп третьего класса в среде Mathcad.

Розглянуто метод розв'язання задач кінематики плоских структурних груп третього класу у середовищі Mathcad.

The method of solving kinematics problems of the third class structural planar groups in Mathcad environment is investigated.

Долгое время применение в технике механизмов с более сложной структурой, чем у механизмов второго класса, сдерживалось отсутствием методов их исследования и, тем более, методов их синтеза. Причиной этому является то, что методы изучения механизмов базировались, в основном, на графических построениях. Для наиболее простых с точки зрения структуры механизмов второго класса эти методы разработаны давно и широко использовались длительный период в инженерной практике. Для механизмов третьего и более высоких классов графоаналитические методы значительно более сложны.

Например, только в начале текущего столетия [1,2] описаны графоаналитические методы кинематического и динамического анализа плоских четырех- и шестизвеной групп Ассура четвертого класса.

С развитием компьютерных технологий определяющую роль начинают играть аналитические методы. Для анализа и синтеза механизмов начинают широко использоваться математические пакеты Maple, Matlab и Mathcad.

Изучение литературных источников позволяет сделать вывод, что наиболее используемым для анализа и синтеза механизмов, является многофункциональный пакет прикладных программ Mathcad.

В работе [3] описано применение пакета Mathcad для выполнения кинематического и динамического анализов плоских рычажных механизмов второго класса. Причем, инструментом исследования принимается аппарат векторной алгебры, позволяющий сохранить алгоритм графического метода исследования и присущую последнему наглядность. Такой подход оправдан, например, в учебном процессе при изучении учащимися курса теории механизмов и машин.

Более эффективно для исследования кинематики сложных механизмов использовать Mathcad, как инструмент решения векторных уравнений, в которые входят свободные векторы и которые не имеют графического решения на плоскости. Это дает возможность сократить объем вычислений и получить относительно компактную программу. Такой подход к механизмам освещен в [4-6].