

А.Е. Балев, А.И. Михалёв, Р.В. Кирия

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ПЕРЕГРУЗОЧНЫМИ УЗЛАМИ  
ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

*Анотація. Проведено дослідження адаптивного налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора які показали, що для управління трикутним дільником (ТДП) потоку найбільш кращим є адаптивний ПІ-регулятор, але при цьому такий регулятор не дозволяє проводити ефективно налаштування коефіцієнтів через складність врахування впливу всіх можливих параметрів на динаміку управління ТДП в умовах поточної невизначеності. Подальшим напрямком у розвитку питань вирішення завдань адаптивного налаштування ТДП в умовах впливу негаусовських збурень, апріорної та поточної невизначеностей може з'явитися включення в контур управління нейро-нечіткого регулятора, який має більш гнучкі параметри налаштування.*

*Ключові слова: Ключові слова: Моделювання, адаптивне налаштування, керування, гірничий транспорт, ПІД-регулятор, трикутний дільник потоку*

В настоящее время развитие горной промышленности связано с повышением уровня автоматизации и с внедрением современных компьютерных технологий управления, в частности, перегрузочными узлами ленточных конвейеров [1, 2]. При этом в качестве управляемых исполнительных элементов интерес представляет треугольный делитель потока (ТДП) для распределения выработанной породы по бункерам. В то же время существует проблема, заключающаяся в том, что из-за неравномерности поступающего груза на ТДП происходит неравномерное его распределение. В связи с этим необходимо управлять текущим положением ТДП в условиях неопределённости, постоянно анализировать взаимодействие горной породы с ТДП, оптимизировать параметры регулятора.

Поставленную задачу предлагается решать путём построения адаптивного ПИД-регулятора.

Целью работы является моделирование адаптивной системы управления перегрузочными узлами горнотранспортных машин. Для чего ставится и решается задача построения математической модели процесса управления ТДП с адаптивной настройкой коэффициентов ПИД-регулятора.

Для реализации поставленной задачи необходимо проанализировать силы, действующие на ТДП, построить математическую модель ТДП и сконструировать для него адаптивный ПИД - регулятор.

Работу ТДП можно описать следующим образом: вертикальный поток насыпного груза взаимодействует с равнобедренным ТДП с длиной боковой стороны  $l$  и углом  $\alpha$  ее наклона к основанию (рисунок 1). Скорость и ширина потока насыпного груза равны, соответственно,  $V_0$  и  $h_0$ . При этом ось потока не совпадает с осью треугольника. В результате образуются два потока, движущиеся по левой и правой боковой стенке треугольника, глубиной  $h_1$  и  $h_2$ , соответственно.

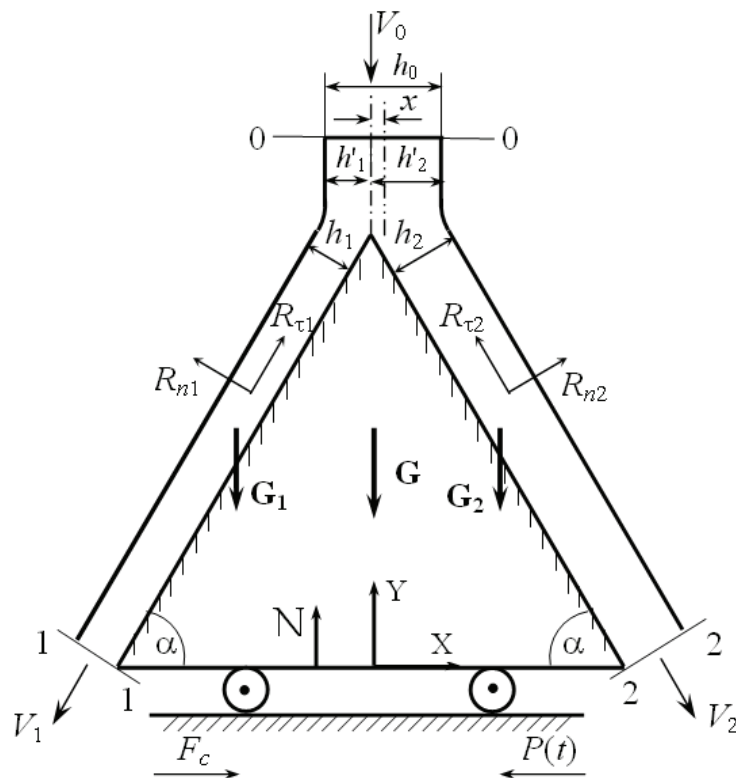


Рисунок 1 - Схема взаимодействия насыпного груза с треугольным делителем потока

Обозначим через  $V_1$  и  $V_2$  скорости потоков насыпного груза на выходе из треугольника. Выделим тремя перпендикулярными сече-

ниями 0-0, 1-1, 2-2 (рисунок 1) объем насыпного груза и применим к нему теорему об изменении количества движения в форме Эйлера:

$$M_0 \bar{V}_0 - M_1 \bar{V}_1 - M_2 \bar{V}_2 + \sum_i \bar{F}_{\text{пов}}^i + \sum_j \bar{F}_{\text{об}}^j = 0, \quad (1)$$

где  $M_0, M_1, M_2$  – массовые расходы входящего и выходящих потоков насыпного груза выделенного объема, [кг/с];  $\sum_i \bar{F}_{\text{пов}}^i + \sum_j \bar{F}_{\text{об}}^j$  – суммы поверхностных и объемных сил, действующих на выделенный объем, [Н].

Спроектируем векторное равенство (1) на оси координат с учетом сил, действующих на выделенный объем (рисунок 1), получим ОХ:

$$M_1 V_1 \cos \alpha - M_2 V_2 \cos \alpha + R_{\tau 1} \cos \alpha - R_{\tau 2} \cos \alpha - R_{n1} \sin \alpha + R_{n2} \sin \alpha = 0; \quad (2)$$

$$\text{ОУ: } -M V_0 + M_1 V_1 \sin \alpha + M_2 V_2 \sin \alpha + R_{\tau 1} \sin \alpha - R_{\tau 2} \sin \alpha + R_{n1} \cos \alpha + R_{n2} \cos \alpha - P_1 - P_2 = 0 \quad (3)$$

Здесь  $R_{n1}, R_{n2}$  – нормальные составляющие сил со стороны потока насыпного груза, действующих на левую и правую боковые стенки треугольника, соответственно, [Н];  $R_{\tau 1}, R_{\tau 2}$  – касательные составляющие сил, действующих на левую и правую боковые стенки треугольника со стороны потока насыпного груза, соответственно, [Н];  $P_1, P_2$  – силы веса левых и правых потоков насыпного груза, [Н].

Предположим, что средние скорости левого и правого потоков насыпного груза не изменяются вдоль боковых поверхностей треугольника. Тогда для равномерного движения потока насыпного груза по наклонной плоскости, в силу равенства сил трения и составляющей веса насыпного груза, имеем:

$$R_{\tau 1} = \rho_c g h_1 l b \sin \alpha = G_1 \sin \alpha; \quad R_{\tau 2} = \rho_c g h_2 l b \sin \alpha = G_2 \sin \alpha, \quad (4)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – силы веса левого и правого потоков насыпного груза, [Н];  $\rho_c$  – средняя плотность насыпного груза, [кг/м<sup>3</sup>],  $b$  – ширина ТДП, [м];  $\alpha$  – угол наклона боковой грани ТДП к горизонту, [рад].

Поток насыпного груза, взаимодействуя с плоскостями треугольника, поворачивается, как на полках. Поэтому скорости левого и правого потока в конце зоны поворота можно определить по формулам:

$$V_1 = V_0 e^{-\mu \psi_1}; \quad V_2 = V_0 e^{-\mu \psi_2}. \quad (5)$$

Здесь  $\psi_1, \psi_2$  – углы поворота потока насыпного груза на левой и правой плоскостях треугольника соответственно, [рад];  $\mu$  – коэффициент потерь энергии насыпного груза на повороте;  $V_0$  – скорость входного потока насыпного груза к треугольному делителю потока, [м/с].

Так как скорости потока насыпного груза вдоль плоскостей движения практически не изменяются, то скорости  $V_1$  и  $V_2$  на выходе из треугольника совпадают со скоростями  $V_{01}$  и  $V_{02}$  потока насыпного груза в конце зоны поворота и определяются соответственно по формулам (5).

Глубины левого и правого потоков  $h_1$  и  $h_2$ , согласно рисунка 1, равны:

$$x = h'_2 - h'_1; \quad (6)$$

$$h_0 = h'_1 + h'_2.$$

Проекция суммарной силы, действующей на треугольник со стороны потока насыпного груза (рисунок 1), равны:

$$R_x = (R_{n2} - R_{n1}) \sin \alpha + (R_{\tau1} - R_{\tau2}) \cos \alpha; \quad (7)$$

$$R_y = (R_{n1} + R_{n2}) \cos \alpha + (R_{\tau1} + R_{\tau2}) \sin \alpha. \quad (8)$$

После преобразования, получим следующие выражения:

$$R_x = x \rho_c V_0^2 b e^{-\mu\alpha/2} \cos \alpha; \quad (9)$$

$$R_y = \rho_c b h_0 \left[ V_0^2 (1 - e^{-\mu\alpha/2} \sin \alpha) + g l e^{\mu\alpha/2} \right], \quad (10)$$

где  $x$  – горизонтальная координата центра ТДП [м],  $g$  – ускорение свободного падения, [м/с<sup>2</sup>].

Проведенные исследования влияния коэффициентов ПИД-регулятора на динамику системы показали, что дифференциальная составляющая регулятора раскачивает систему (рисунок 2) и, следовательно, в уравнении управления движением должны присутствовать силы сопротивления.

Динамика движения ТДП по горизонтальной координате  $x$  описывается следующим уравнением:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = P(t) - R_x - F_c, \quad (11)$$

где  $P(t)$  – горизонтальная управляющая сила, действующая на ТДП со стороны привода [Н];  $M$  – масса насыпного груза, [кг];  $F_c$  – сила сопротивления, [Н].

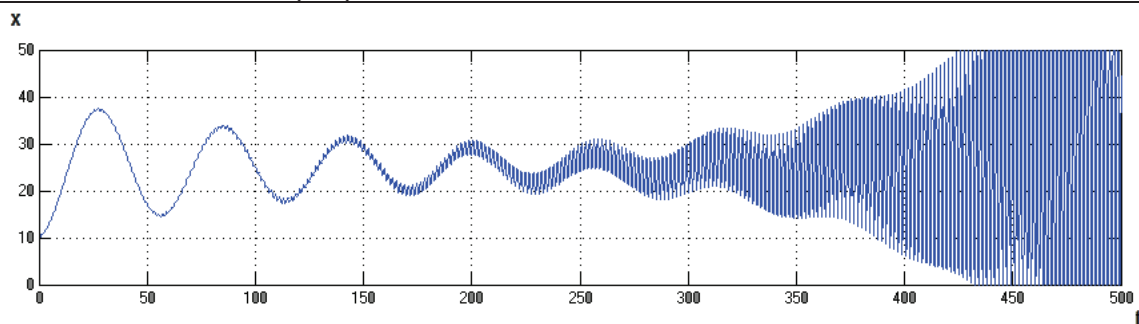


Рисунок 2 – Положение горизонтальной координаты центра тяжести ТДП при моделировании без включения сил сопротивления (по оси ординат - условные границы параметра  $x$  (рисунок 1)  $[0; h_0]$ ; по оси абсцисс - время моделирования  $t$ )

При рассмотрении процессов, протекающих во время взаимодействия ТДП с потоком насыпного груза, можно выделить следующие силы сопротивления: силу трения качения и силу, действующую на ТДП со стороны потока насыпного груза из-за изменения динамики струи [3].

В формульном виде их можно представить следующим образом:

Сила трения качения представима формулой Кулона:

$$F_t = \frac{N}{R} \delta, \quad (12)$$

где,  $F_t$  – сила трения качения [Н],  $N$  – вес [Н],  $R$  – радиус колеса [м],  $\delta$  – коэффициент трения качения [м].

Сила динамики струи представима в виде:

$$F_d = \beta \frac{dx}{dt}, \quad (13)$$

где,  $F_d$  – сила воздействия струи [Н],  $\beta$  – экспериментальный коэффициент затухания струи [кг/с].

Таким образом, уравнение управляемого ТДП можно представить в виде:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + \rho_c V_0^2 b e^{-\mu \alpha / 2} \cos \alpha \cdot x = P(t) - \frac{N}{R} \delta = \tilde{P}(t). \quad (14)$$

Схема контура адаптивной настройки ПИД-регулятора представлена на рисунке 3.

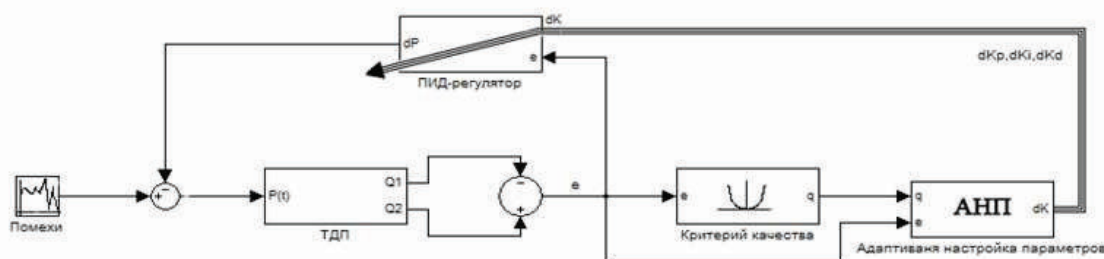


Рисунок 3 – Simulink-схема адаптивной настройки коэффициентов ПИД-регулятора для ТДП

Управляющей силой, воздействующей на ТДП, является  $\tilde{P}(t)$ . Выходом объекта является координата  $x$ , определяющая горизонтальное положение ТДП. Исходя из (14) можно составить передаточную функцию, исчерпывающим образом характеризующую поведение переменной  $x$ , на каждое воздействия управляющей силы:

$$\frac{\partial x}{\partial \tilde{P}} = \frac{1}{Ms^2 + \beta s + \rho_c V_0^2 b e^{-\mu \alpha / 2} \cos \alpha} \quad (15)$$

При этом уравнение (14) и передаточная функция (15) представляют собой математические модели во временной и частотном диапазонах. При этом единственным ограничением на состояние ТДП являются допустимые значения изменения  $x \in [0; h_0]$ , определяемые конструктивными особенностями ТДП.

Имея решение дифференциального уравнения, можно получить объёмные расходы потоков насыпного груза и сравнив их, получить критерий оценки эффективности адаптивного управления, которое как раз и состоит в уравнивании потоков насыпного груза.

$$Q_0 = Q_1 + Q_2. \quad (16)$$

Здесь  $Q_{1,2}$  – объёмные расходы потоков насыпного груза левого и правого бункеров [ $\text{м}^3/\text{с}$ ].

Объёмный расход основного потока можно выразить следующим образом:

$$Q_0 = b h_0 V_0, \quad (17)$$

При этом левый поток выражается относительно горизонтального положения ТДП:

$$Q_1 = b x V_0, \quad (18)$$

Подставив (17) и (18) в выражение (16), найдём объёмный расход правого потока:

$$Q_2 = bV_0(h_0 - x), \quad (19)$$

где  $b$  – ширина боковой стороны ТДП [м].

Соответственно ошибка или рассогласование регулирования  $e(x)$ , определяется как:

$$e(x) = Q_2 - Q_1 = bV_0(h_0 - 2x). \quad (20)$$

**Контур адаптивного управления ТДП.** Классический аналоговый ПИД-регулятор представляется законом управления вида

$$u(\tau) = K \left( e(\tau) + \frac{1}{T_I} \int_0^{\tau} e(l) dl + T_D \frac{\partial e(\tau)}{\partial \tau} \right), \quad (21)$$

где  $\tau$  - непрерывное время;  $u(\tau)$  - управляющий сигнал;  $K$  - коэффициент усиления;  $T_I$ ,  $T_D$  - постоянные интегрирования и дифференцирования соответственно.

Введя дискретное время с достаточно малым шагом дискретизации  $T_0$  и заменяя производную первой разностью, а интеграл суммой, по методу треугольника, получим:

$$u(\tau) = K \left( e(\tau) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=0}^t e(i-1) + \frac{T_D}{T_0} (e(t) - e(t-1)) \right), \quad (22)$$

где  $t = 1, 2, \dots$  - дискретное время.

Тогда в виде рекуррентного алгоритма:

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) = g_0 e(t) + g_1 e(t-1) + g_2 e(t-2), \quad (23)$$

где  $g_0 = K(1 + T_D T_0^{-1})$ ;  $g_1 = -K(1 + 2T_D T_0^{-1} - T_0 T_I^{-1})$ ;  $g_2 = K T_D T_0^{-1}$ .

Поскольку данный регулятор принадлежит к параметрически оптимизируемым дискретным регуляторам, он описывается  $Z$ -передаточной функцией

$$G_R(z^{-1}) = \frac{g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{N_R} z^{-N_R}}{1 - z^{-1}}, \quad (24)$$

При этом порядок регулятора  $N_R$  может быть ниже порядка модели объекта.

Рассмотрим задачу синтеза адаптивного ПИД-регулятора:

Пусть требуемое значение выходной величины равно  $y^*$ . Тогда уравнение ПИД - регулятора, минимизирующего ошибку  $e(k) = y^* - y(k)$ , имеет вид

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)], \quad (25)$$

где  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей соответственно.

$$\begin{aligned}\frac{\Delta \tilde{P}(k)}{\Delta K_p} &= e(k) - e(k-1) = 2bV_0(x(k-1) - x(k)); \\ \frac{\Delta \tilde{P}(k)}{\Delta K_i} &= e(k) = bV_0(h_0 - x(k)); \\ \frac{\Delta \tilde{P}(k)}{\Delta K_d} &= e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) = 2bV_0(2x(k-1) - x(k) - x(k-2));\end{aligned}\tag{26}$$

Задача синтеза ПИД-регулятора заключается в поиске коэффициентов  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  и сводится к минимизации некоторого выпуклого функционала от ошибки управления  $e(k)$ . Если в качестве целевой функции выбрать

$$q(e(k)) = \exp(-\gamma e(k)^2) \rightarrow \min,\tag{27}$$

где,  $\gamma$  – весовой коэффициент, то использование градиентного алгоритма приводит к следующим правилам настройки регулятора:

$$\begin{aligned}\Delta K_p &= -\gamma \frac{\partial q(k)}{\partial K_p} = -\gamma \frac{\partial q(k)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tilde{P}} \frac{\partial \tilde{P}(k)}{\partial K_p}; \\ \Delta K_i &= -\gamma \frac{\partial q(k)}{\partial K_i} = \gamma \frac{\partial q(k)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tilde{P}} \frac{\partial \tilde{P}(k)}{\partial K_i}; \\ \Delta K_d &= -\gamma \frac{\partial q(k)}{\partial K_d} = \gamma \frac{\partial q(k)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tilde{P}} \frac{\partial \tilde{P}(k)}{\partial K_d},\end{aligned}\tag{28}$$

где  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  – приращение каждого из коэффициентов ПИД-регулятора – пропорционального, интегрального и дифференциального, соответственно;  $y$  – выход объекта;  $\frac{\partial x}{\partial \tilde{P}}$  – градиент, который опре-

деляется передаточной функцией (15), а

$$\frac{\partial q(k)}{\partial x} = \frac{\partial q(k)}{\partial e} \frac{\partial e(k)}{\partial x} = 4\gamma e(k) \exp(-\gamma e(k)^2) bV_0.$$



Для анализа результатов было выбрано начальное значение для каждого коэффициента ПИД-регулятора, равное  $-1$ , а значение весового коэффициента  $\gamma = 0.1$ .

Анализ процесса изменения значений коэффициентов адаптивного ПИД-регулятора показал, что значение экспериментального коэффициента затухания струи для оптимального регулирования должно быть не меньше 15 (рисунок 4)

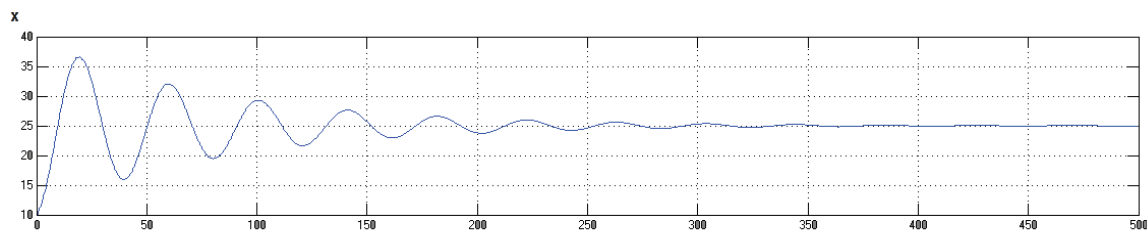


Рисунок 4 – Значение горизонтальной координаты центра тяжести ТДП ( $x$ ) при значении  $\beta = 15$ .

При этом приращение каждого из коэффициентов ПИД-регулятора показано на рисунке 5.

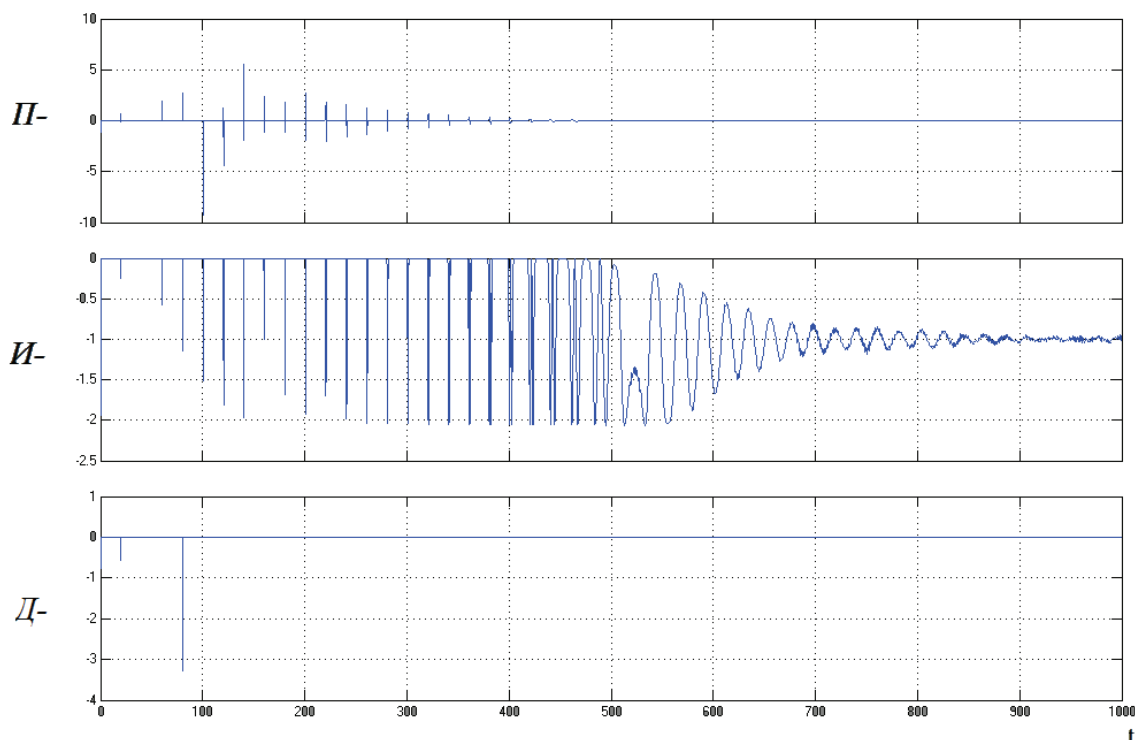


Рисунок 5 – Значения приращений коэффициентов ПИД-регулятора на отрезке  $t [0, 1000]$

В то же время, исследования показали, что при определенных режимах лучше использовать адаптивный ПИ-регулятор, т.к. дифференциальная составляющая может дополнительно раскачивать систему (рисунки 6, 7):

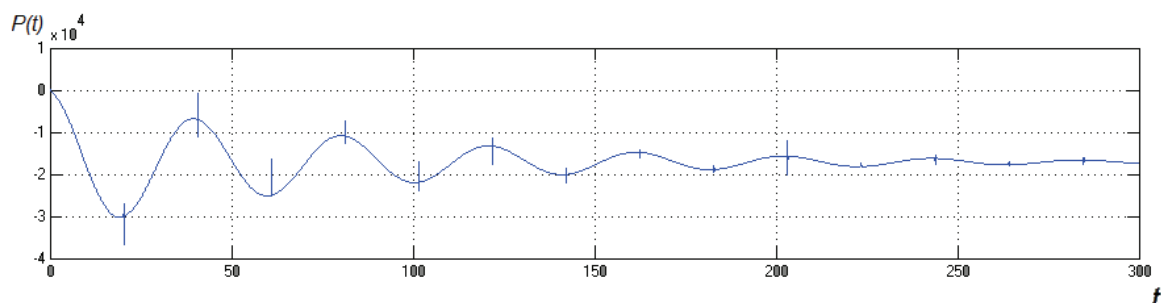


Рисунок 7 – Значения управляющей силы  $P(t)$  для адаптивного ПИД-регулятора при значении  $\beta = 15$

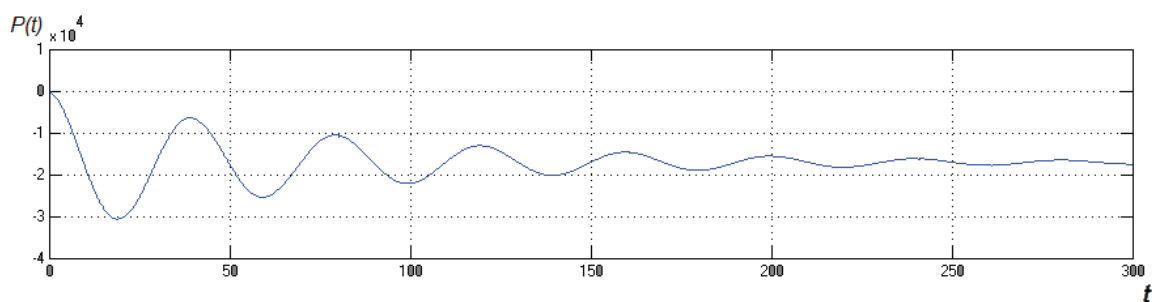


Рисунок 8 – Значения управляющей силы  $P(t)$  для адаптивного ПИ-регулятора при значении  $\beta = 15$

**Выводы.** Исследования адаптивной настройки коэффициентов ПИД-регулятора для управления ТДП показали, что наиболее предпочтительным является адаптивный ПИ-регулятор, но при этом такой регулятор не позволяет производить эффективную настройку коэффициентов из-за сложности учёта влияния всех возможных параметров на динамику управления ТДП в условиях текущей неопределенности. Дальнейшим направлением в развитии вопросов решения задач адаптивной настройки ТДП в условиях воздействия негауссовских возмущений, априорной и текущей неопределенностей может явиться включение в контур управления нейро-нечёткого регулятора, который имеет более гибкую настройку и является более предпочтительным в данной ситуации [4].

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Кирия Р.В., В.Ю. Максютенко, Т.Ф. Мищенко, Б.И. Мытовой О взаимодействии насыпного груза с отбойным щитом. // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. - Днепропетровск, 2009. – Вып. 83. - С. 246-252.
2. Кирия Р.В., Богданов В.М., Мостовец Б.И. Определение скорости и угла отрыва сыпучего груза при разгрузке с барабана ленточного конвейера // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. - Днепропетровск, 2000. – Вып. 18. - С. 113-118.
3. Балев А.Е, Михалёв А.И., Кирия Р.В. Моделирование адаптивных систем управления перегрузочными узлами горнотранспортных машин // Автоматизация: проблемы, идеи, решения / Материалы международной научно-технической конференции - Севастополь, 2011. – С. 202-203.
4. Балев А.Е, Михалёв А.И., Кирия Р.В. Моделирование систем интеллектуального регулирования перегрузочными узлами горнотранспортных машин // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта / Сборник научных трудов - Евпатория, 2012. – С. 21-22.