

УДК 62-503.51

Торопов А.В., Зубчевский Т.Ю.

НТУУ «КПІ», ІЕЕ, кафедра АУЕК, м.Київ, Україна

Оптимизация контура стабилизации мощности резания роторного экскаватора с применением систем автоматизированного проектирования.

Эксплуатация электроприводов роторных экскаваторов характеризуется значительными перегрузочными режимами работы, обусловленных изменениями толщины среза и плотности породы и неравномерностью углов захвата ковшей. Для работы с максимальной производительностью и обеспечения минимального износа оборудования возникает необходимость стабилизации мощности резания породы за счет изменения скорости поворота стрелы, а также увеличения скорости вращения двигателя роторного колеса. При этом использование стандартных методик настройки регулятора для внешнего контура технологического параметра является неэффективным. Это, в первую очередь обусловлено тем, что усилие срезания породы является нелинейной функцией вида:

$$P_z = f(\omega, \rho, t_{sp}, 1/V), \quad (1)$$

где P_z - тангенциальная составляющая мощности срезания, обуславливающая основную нагрузку на механизмы экскаватора; ρ, t_{sp} - плотность и толщина среза породы, соответственно; V - линейная скорость вращения роторного колеса. Отметим, что настройка контура регулирования скорости осуществляется таким образом, чтобы обеспечить максимальную жесткость характеристики электропривода роторного колеса. При этом колебания линейной скорости V при изменении нагрузки в широких пределах являются минимальными. Нелинейность изменения толщины срезаемой породы при снятии слоя грунта компенсируется косинусоидальной зависимостью снижения скорости вращения двигателя стрелы, в зависимости от угла поворота. В свою очередь изменение плотности грунта является величиной случайной, неизмеряемой, изменяющейся в широких пределах, что приводит к отсутствию возможности создания системы регулирования мощности резания по возмущению. Это, в свою очередь, приводит к необходимости создания замкнутой системы с обратной связью, обеспечивающей прямое или косвенное измерение мощности резания, без внесения значительных изменений в конструкцию роторного экскаватора.

Одним из возможных подходов к реализации замкнутой системы регулирования мощности резания является измерение тока двигателя роторного колеса, при постоянной линейной скорости резания и скорости поворота стрелы экскаватора. При этом обеспечивается косвенное определение тангенциальной составляющей мощности резания, составляющей порядка 70% от общей мощности. К тому же такой подход не приводит к необходимости внесения значительных изменений в конструкцию станка и применения дорогостоящих датчиков мощности.

Поскольку мощность резания при формировании косинусоидальной зависимости изменения скорости поворота является функцией плотности породы и максимальной скорости поворота стрелы, то формула (1) преобразуется к виду:

$$P_z = f(\omega_{\max}, \rho). \quad (2)$$

Поскольку изменения плотности во время одного прохода стрелы роторного колеса являются незначительными, то можно осуществить линеаризацию выражения (2) в рабочей

точке:

$$P_z = K_{рез} \omega + K_{сп} \rho, \quad (3)$$

где $K_{рез} = \frac{\partial P_z}{\partial \omega}$, $K_{сп} = \frac{\partial P_z}{\partial \rho}$ - частные производные по аргументам функции мощности

резания.

С учетом инерционности процесса резания и датчика тока двигателя роторного экскаватора контур стабилизации мощности резания примет вид, изображенный на рис.1. При этом контур регулирования скорости поворота стрелы представлен колебательным звеном.

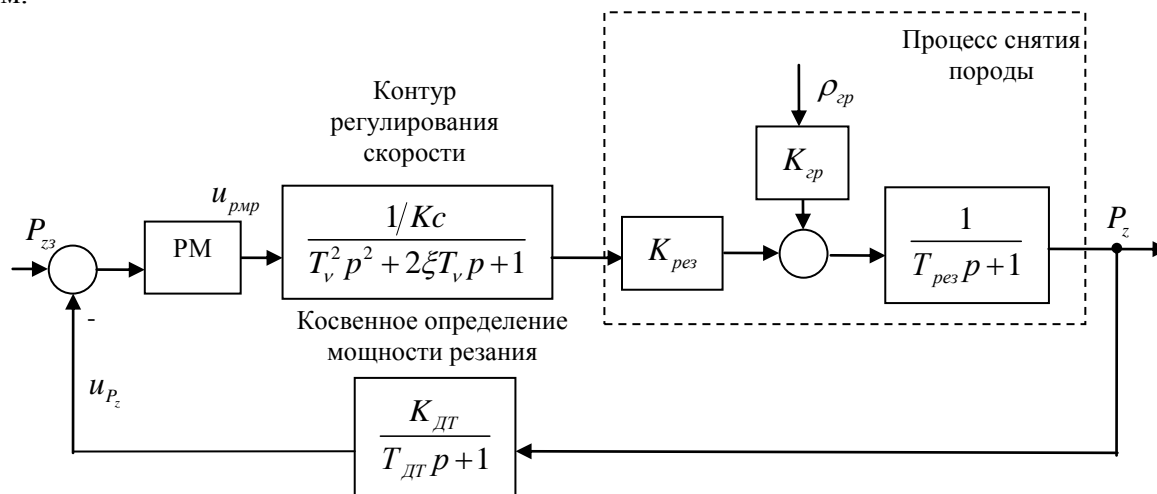


Рис.1. Структурная схема контура регулирования мощности резания породы роторного экскаватора.

На рис.1 введены следующие обозначения: K_c - коэффициент обратной связи по скорости; $K_{сп}$ - коэффициент усиления по скорости вращения двигателя; $K_{рез}$ - коэффициент усиления по глубине резания; $T_{рез}$ - постоянная времени резания, обусловленная временем набегания породы на ковш; P_z, P_z - заданное и текущее значение составляющей мощности резания, обусловленной нагрузкой на роторное колесо; T_v - постоянная времени контура скорости; ξ - показатель колебательности контура скорости; PM – регулятор мощности резания; $u_{рмр}$ - закон управления регулятора мощности резания; $K_{дт}, T_{дт}$ - коэффициент усиления и постоянная времени датчика технологического параметра; $u_{рз}$ - сигнал обратной связи по мощности резания.

При этом управляющим сигналом является задание по скорости поворота стрелы, а возмущающим воздействием – изменение плотности породы.

Осуществим процедуру синтеза регулятора мощности резания методом последовательной коррекции с учетом требований к переходному процессу. Для приближенной «грубой» настройки регулятора мощности на удовлетворительное качество переходных процессов используем настройку на модульный оптимум. Для этого осуществим приведение системы к единичной обратной связи. Тогда передаточная функция контура регулирования мощности, приведенного к единичной обратной связи, принимает вид:

$$W_{P_z}(p) = \frac{1/K_c}{T_v^2 p^2 + 2\xi T_v p + 1} \cdot \frac{K_{дт}}{T_{дт} p + 1} \cdot \frac{K_{рез}}{T_{рез} p + 1}. \quad (4)$$

Поскольку $T_{ДТ} < T_v < T_{рез}$ передаточная функция (4) может быть приближенно описана выражением:

$$W_{P_z}(p) \approx \frac{1/K_c}{2\xi T_v p + 1} \cdot \frac{K_{рез} \cdot K_{ДТ}}{T_{рез} p + 1}. \quad (5)$$

При этом желаемая передаточная функция разомкнутой системы при настройке на модульный оптимум запишется:

$$W_{жел}(p) = \frac{1}{2T_F p(T_F p + 1)}, \quad (6)$$

где $T_F = 2\xi T_v$ - некомпенсируемая постоянная времени, обусловленная инерционностью контура скорости.

В случае использования метода последовательной коррекции получаем передаточную функцию регулятора мощности, представляющую собой ПИ – регулятор:

$$W_{жел}(p) = \frac{K_c(T_{рез} p + 1)}{2T_F \cdot K_{рез} \cdot K_{ДТ} p} = K_p + \frac{K_I}{p}, \quad (7)$$

где $K_p = \frac{K_c \cdot T_{рез}}{2T_F \cdot K_{рез} \cdot K_{ДТ}}$, $K_I = \frac{K_c}{2T_F \cdot K_{рез} \cdot K_{ДТ}}$ - коэффициенты ПИ - регулятора.

При получении значений коэффициентов, обеспечивающих удовлетворительное качество регулирования, осуществим уточненную настройку контура с использованием средств систем автоматизированного проектирования (САПР). Для этого используем математическое программное обеспечение Matlab, а также его приложение Simulink. Уточненную настройку регулятора произведем с помощью блока Signal Constraint, позволяющего методом последовательных приближений получить необходимое качество переходных процессов.

Математическая модель контура стабилизации мощности резания в Simulink имеет вид, изображенный на рис.2. При этом график переходного процесса по выходной координате при подаче ступенчатого сигнала задания представлен на рис.3.

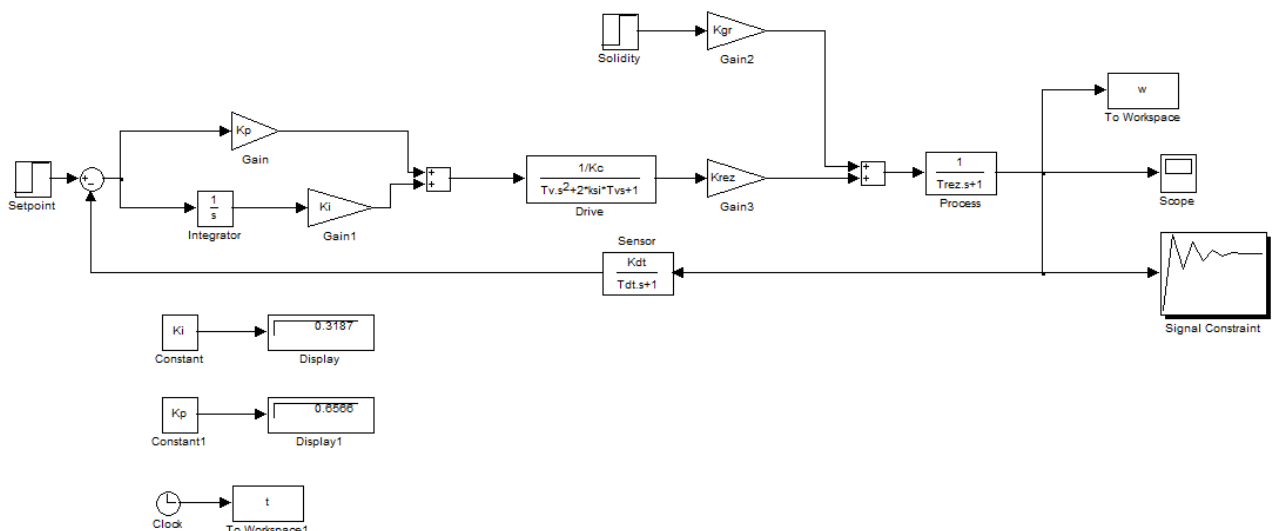


Рис.2. Математическая модель контура стабилизации мощности резания.

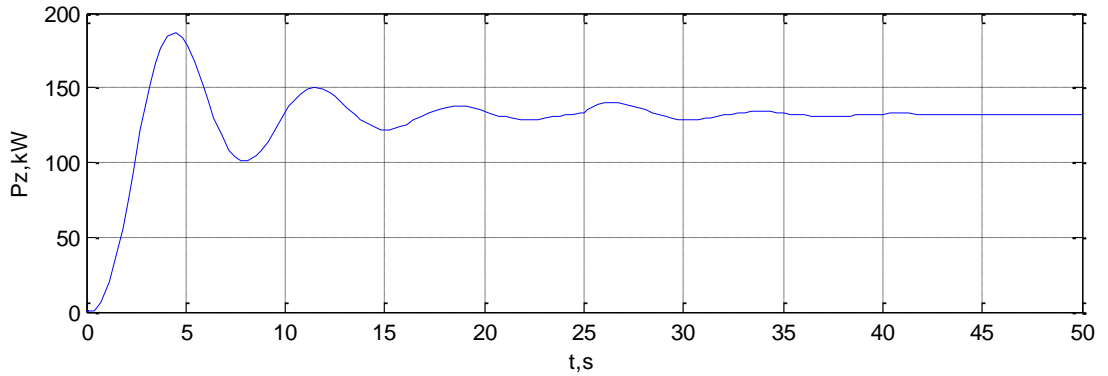


Рис.3. График переходного процесса по мощности резания при использовании ПИ – регулятора, синтезированного методом последовательной коррекции.

В блоке Signal Constraint устанавливаем ограничения по отклонениям переходного процесса при подаче единичного ступенчатого сигнала по заданию и записываем в окнах MATLAB, отображенных на рис.4. и рис.5. Ограничения по перерегулированию фактически определяются верхними пределами выходной переменной, представленными на рис.4, в то время как нижние пределы, указанные на рис.5, определяют время переходного процесса. Время оптимизации, как по верхнему, так и нижнему пределам принято равным 50с.

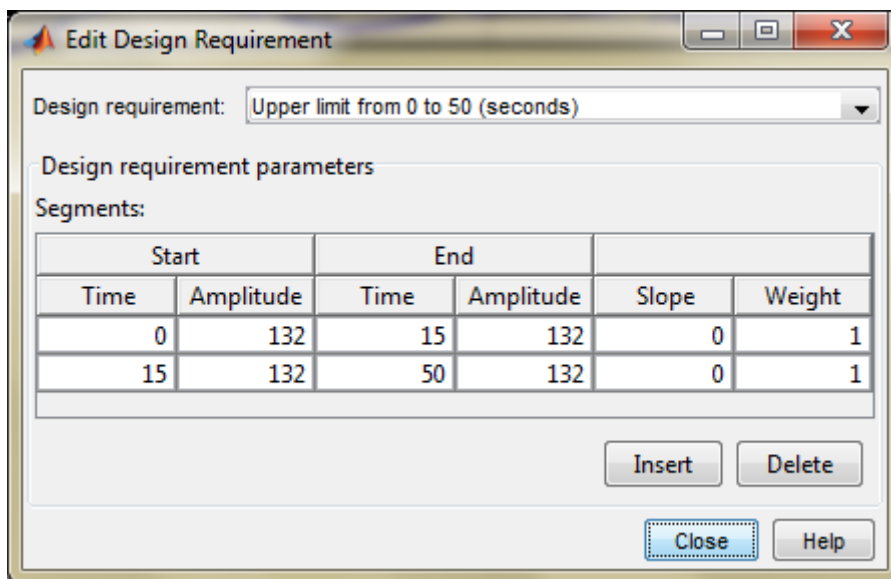


Рис.4. Окно ввода верхних пределов выходной переменной при использовании блока оптимизации Signal Constraint.

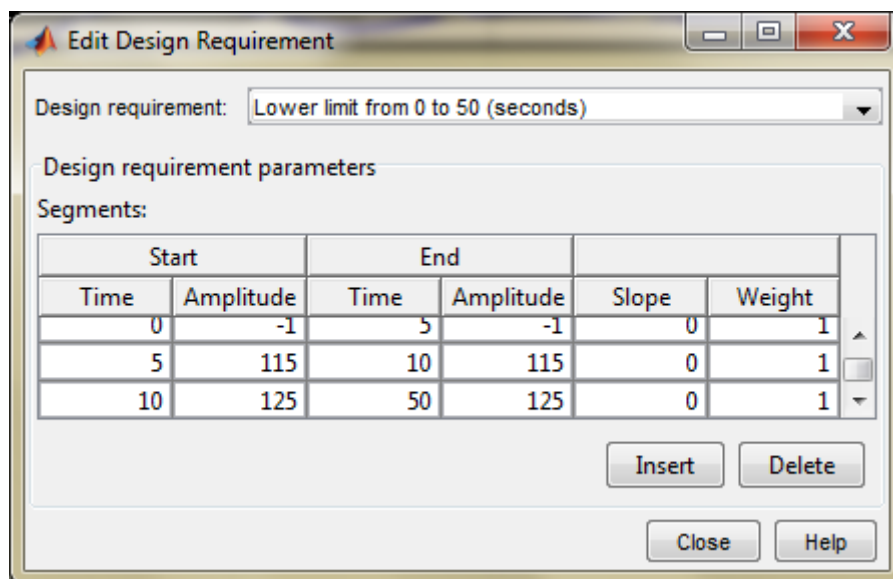


Рис.5. Окно ввода нижних пределов выходной переменной при использовании блока оптимизации Signal Constraint.

После запуска процедуры оптимизации методом последовательных приближений в САПР реализуется процедура поиска оптимального решения, удовлетворяющего требованиям к переходному процессу, заданному ограничениями на рис.4 и рис.5. При этом количество итераций в нашем конкретном случае равно двум. В конце второго пересчета коэффициентов ПИ – регулятора достигается необходимое качество переходных процессов. При этом параметры итераций последовательного поиска представлены на рис.6.

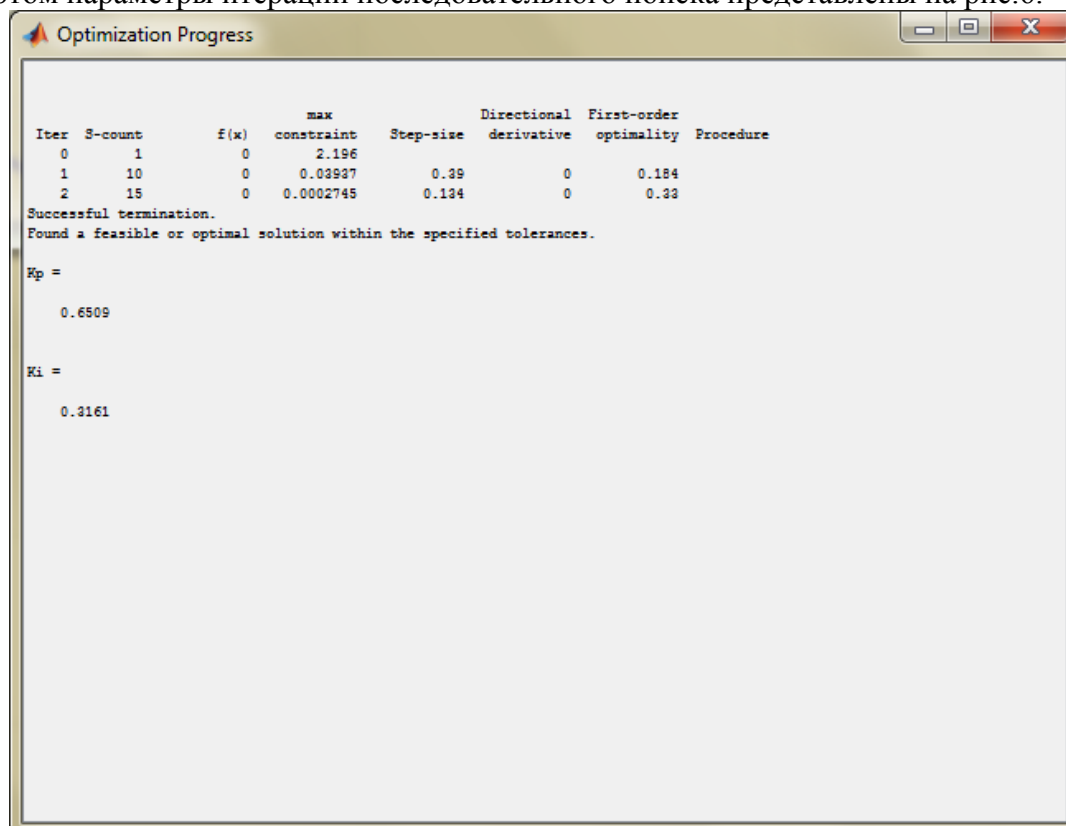


Рис.6. Окно параметров итераций последовательного поиска параметров ПИ – регулятора.

Графики переходных процессов, а также пределы зоны ограничений, при использовании метода последовательного поиска параметров ПИ-регулятора имеют вид, изображенный на рис.7.

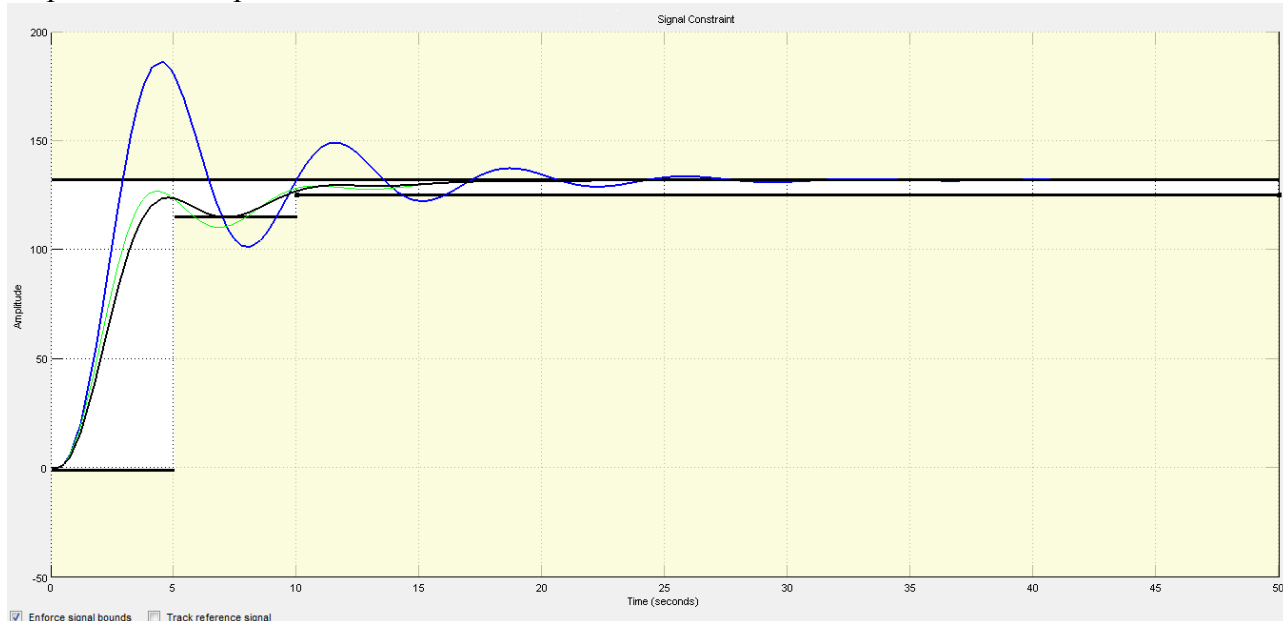


Рис.7. Графики переходных процессов при различных итерациях поиска параметров ПИ – регулятора.

После нахождения параметров корректирующего устройства методом цифрового моделирования исследована не только реакция системы на ступенчатое задание по мощности резания, а также влияние изменения плотности на мощность резания. График переходного процесса по мощности резания в скорректированной системе регулирования имеет вид, изображенный на рис.8. При этом осуществлялась подача ступенчатого сигнала на 25с с целью исследования реакции системы на возмущающее воздействие.

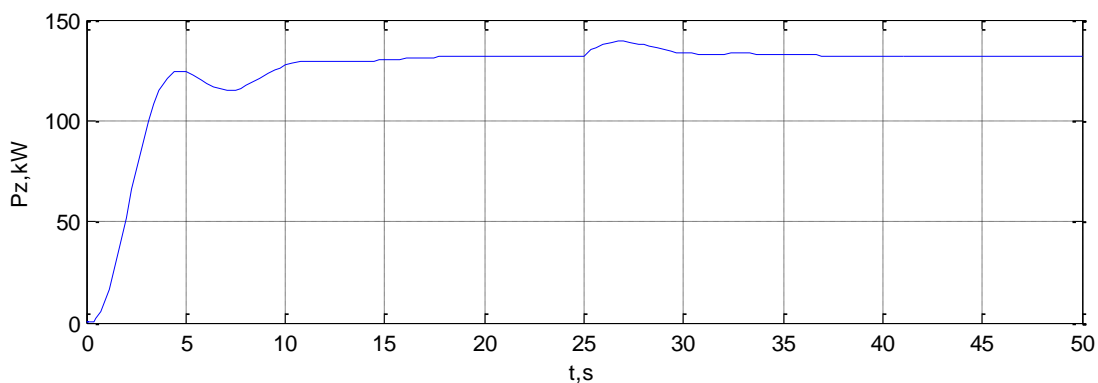


Рис.8. График переходного процесса по мощности резания при использовании регулятора, синтезированного с использованием САПР.

Очевидно, что с использованием САПР для корректировки параметров ПИ – регулятора, обеспечивается уменьшение времени переходных процессов в контуре управления, отсутствие перерегулирования при подаче сигнала задания, а также стабилизация мощности резания роторного колеса экскаватора при изменениях плотности срезаемой породы.