УДК 338

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВАЛОВЫМ ВНУТРЕННИМ ПРОДУКТОМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ*

Докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т., канд. экон. наук, доц. НАГОРНОВ В. Н., канд. техн. наук, доц. КУЛАКОВ А. Т., канд. техн. наук ЦИЛИБИНА В. М.

Белорусский национальный технический университет,
Институт экономики Национальной академии наук Беларуси

Важнейшими показателями устойчивого инновационного социально-экономического развития Республики Беларусь являются валовой внутренний продукт (ВВП) и темпы его роста. За шесть лет номинальный ВВП в стране увеличился в 3 раза: с 12,33 млрд дол. США в 2000 г. до 36,95 млрд дол. США в 2006 г.

Успешное выполнение Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2006–2010 гг. при достигнутом темпе роста ВВП требует дальнейшего совершенствования государственной системы управления экономикой на основе анализа прошлых лет с разработкой различных сценариев кратко- и долгосрочных прогнозов.

В основу построения структурной схемы динамической модели эффективной системы управления ВВП Республики Беларусь положены теории ноосферного устойчивого социально-экономического развития [1] с использованием кибернетических основ управления экономикой [2, 3] и общей теорией оптимальных систем управления [4–6].

Для построения математической модели системы управления номинальным внутренним валовым продуктом Республики Беларусь с 1990 по 2006 г. с прогнозом до 2010 г. необходимо было определить динамику объекта, представленную безынерционной частью объекта управления и его инерционной частью с лагом (рис. 1).

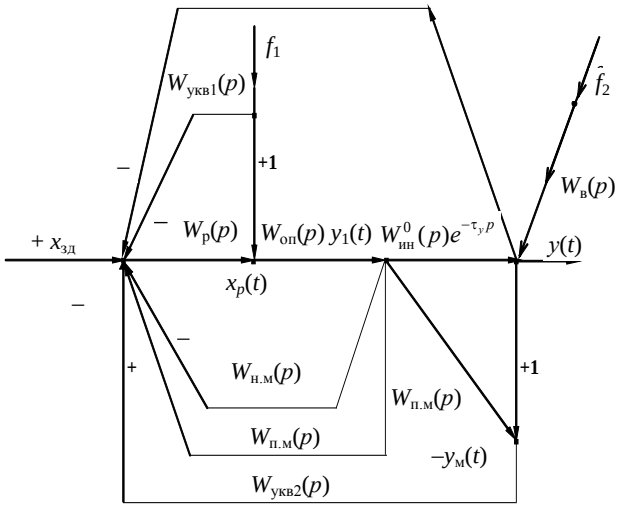

Рис. 1. Структурная схема динамической модели системы управления ВВП Республики Беларусь [4]: $y(t)$ – основная регулируемая величина (номинальный ВВП Республики Беларусь в млрд дол. США по курсу Национального банка); $y_{\text{м}}(t)$ – выходная переменная модели инерционного участка объекта регулирования; $x_{\text{зд}}$ – заданное (плановое) значение регулируемого параметра; f_1 – внутреннее возмущение; f_2 – крайнее внешнее возмущение; $W_{\text{оп}}(p)$ – передаточная функция опережающего участка объекта регулирования без лага (запаздывания); $W_{\text{ин}}(p) = W^0_{\text{ин}}(p)e^{-\tau_y p}$ – то же инерционного участка объекта с лагом; $W_{\text{п.м.}}(p)$ – полная модель инерционного участка объекта, равная передаточной функции инерционного участка $W^0_{\text{ин}}(p)e^{-\tau_y p}$; $W_{\text{н.м}}(p)$ – неполная модель инерционного участка объекта без запаздывания; τ_y – лаг (запаздывание) по каналу регулирующего воздействия; $W_{\text{в}}(p)$ – передаточная функция крайнего внешнего возмущения; $W_{\text{укв1}}(p)$, $W_{\text{укв2}}(p)$ – соответственно передаточные функции упредителей внутренних и внешних угроз; $x_p(t)$ – управляющее воздействие

* Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Для определения численных значений коэффициентов передаточных функций воспользуемся анализом событий (для выделения этапов и участков) и методами аппроксимации переходных характеристик [5, 6]. В качестве основной переходной характеристики объекта управления принимаем данные Министерства статистики и анализа Республики Беларусь номинального ВВП, выраженного в дол. США по курсу Национального банка Республики Беларусь, на 1990–2006 гг.

Динамику первого этапа моделирования (1990–1995 гг.), в пределах которого государственное управление практически отсутствовало (развал СССР можно рассматривать как скачок входного воздействия), хорошо аппроксимируют статистические данные Министерства анализа и статистики Республики Беларусь с помощью дифференциального уравнения второго порядка с запаздывающим аргументом (лагом)

$$61{,}9\frac{d^2y(t-\tau_y)}{dt^2}+6{,}9\frac{dy(t-\tau_y)}{dt}+ +y(t-\tau_y)=k_1x(t), \qquad (1)$$

где $y(t)$ – оригинал выходной переменной (номинальное значение ВВП в дол. США по курсу Нацбанка Республики Беларусь); $x(t)$ – скачок входной переменной, эквивалентный снижению ВВП из-за развала СССР на 43 млрд дол. США (k_1 = –43); τ_y – лаг, соответствующий одному году, принятый при моделировании в ускоренном масштабе времени равным 10 с.

Повышенная колебательность ВВП первого этапа обусловлена малым численным значением коэффициента демпфирования ξ = 0, 44, так как (1) можно записать в общем виде

$$T^2y''(t-\tau_y)+2T\xi y'(t-\tau_y)+y(t-\tau_y)=k_1x(t), \qquad (2)$$

где T^2 = 61,9 с^2, или T = 7,87 с.

Дифференциальное уравнение (1) представим в виде передаточной функции $W_1(p)$ разомкнутой системы управления

$$W_1(p)=\frac{Y(p)}{X(p)}=\frac{k_1e^{-\tau_y p}}{T^2p^2+2T\xi p+1}= =\frac{(-43)e^{-10p}}{61{,}9p^2+6{,}9p+1}, \qquad (3)$$

где $Y(p)$ – изображение выходной переменной; $X(p)$ – то же входной переменной; $p=\frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа как символ дифференцирования.

Второй этап моделирования (1996–2001 гг.) – этап стабилизации экономики Республики Беларусь – характеризуется тем, что государственная система управления начала функционировать более эффективно. Это позволило повысить устойчивость системы управления процессом стабилизации экономики, так как коэффициент демпфирования передаточной функции (4), описывающий динамику инерционного участка объекта управления этого этапа, стал равным единице $\xi=1$:

$$W_2(p)=\frac{k_2e^{-\tau_y p}}{T_1^2p^2+2T_1\xi p+1}= =\frac{1e^{-10p}}{46{,}24p^2+13{,}6p+1}=\frac{e^{-10p}}{(6{,}8p+1)^2}, \qquad (4)$$

где k_2 = 1,0; $2T_1\xi=13{,}6$, т. е. $\xi=\frac{13{,}6}{2T_1}= =\frac{13{,}6}{2\sqrt{46{,}24}}=1{,}0.$

Видно, что колебательное звено превратилось в инерционное звено второго порядка с равными постоянными времени 6,8 с.

Динамика третьего этапа (2001–2006 гг.) инерционного участка объекта – период активного роста номинального ВВП – характеризуется еще большей стабилизацией, так как описывается передаточной функцией вида

$$W_3(p)=\frac{k_3e^{-10p}}{116p^2+22{,}5p+1}= =\frac{e^{-10p}}{T_2^2p^2+2T_2\xi p+1}, \qquad (5)$$

где $2T_2\xi=22{,}5$, т. е. $\xi=\frac{22{,}5}{2T_2}=\frac{22{,}5}{2\sqrt{116}}=\frac{22{,}5}{2\cdot10{,}8}= =1{,}052>1{,}0;$ k_3 = 1,0.

Видно, что инерционное звено второго порядка с равными постоянными времени превратилось на третьем этапе в инерционное звено

второго порядка с различными постоянными времени $T_3 \neq T_4$

$$W_3(p) = \frac{e^{-10p}}{116p^2 + 22{,}5p + 1} = \\ = \frac{1e^{-10p}}{(14{,}5p^2 + 1)(8p + 1)}, \quad (6)$$

где $k_3 = 1$; $T_3 = 14{,}5$ с; $T_4 = 8$ с, т. е. система государственного управления на этом этапе не только стабилизировала экономику, но и организовала активный рост ВВП.

При моделировании динамики инерционного участка объекта на четвертом прогнозном этапе развития экономики Беларуси (2006–2010 гг.) использовалась передаточная функция инерционного участка объекта с коэффициентом демпфирования $\xi = 1{,}13$

$$W_4(p) = \frac{k_4 e^{-10p}}{176p^2 + 30p + 1} = \frac{e^{-10p}}{(22p + 1)(8p + 1)}, \quad (7)$$

где $k_4 = 1{,}0$; $\xi = \frac{30}{2T_2} = \frac{30}{2\sqrt{116}} = 1{,}13.$

При этом динамика опережающего участка объекта управления без лага на трех последних этапах аппроксимировалась передаточной функцией инерционного звена второго порядка

$$W_{\text{оп}}(p) = \frac{-0{,}43}{(0{,}2p + 1)(0{,}02p + 1)}. \quad (8)$$

Динамика инерционного участка объекта управления $W^0_{\text{ин}}(p)e^{-\tau_y p}$ представлена передаточной функцией разомкнутой системы (3) для первого этапа моделирования, соответственно (4) – для второго, (6) – для третьего и (7) – для четвертого этапа моделирования динамических процессов тенденций изменения номинального ВВП при двух прогнозных сценариях социально-экономического развития Беларуси: инновационно-прорывном (с максимальным ростом ВВП за счет максимального потребления ТЭР при максимальном снижении энергоемкости ВВП) и инновационно-экологическом (при умеренном росте ВВП с минимальным ростом потребления ТЭР и умеренном снижении энергоемкости ВВП).

Передаточная функция крайнего внешнего возмущения $W_{\text{в}}(p)$ принята равной

$$W_{\text{в}}(p) = \frac{k_{\text{в}}}{T_{\text{в}}p + 1} = \frac{-3}{3p + 1}, \quad (9)$$

где $k_{\text{в}} = -3$ млрд дол. США – снижение объема ВВП в Республике Беларусь в 1999 г. после дефолта в России 1998 г.

Передаточная функция регулятора $W_{\text{р}}(p)$ на втором и третьем этапах моделирования (1995–2006 гг.) соответствовала пропорционально-интегральному алгоритму принятия управленческих решений, а на четвертом этапе (2006–2010 гг.) – пропорционально-интегрально-дифференциальному (рис. 2).

При этом на втором этапе моделирования (1995–2001 гг.) применялась двухконтурная система управления: основной контур – $W_{\text{р}}(p) \to W_{\text{оп}}(p) \to W^0_{\text{ин}}(p)e^{-\tau_y p} \to \text{ГОС} \to W_{\text{р}}(p)$ (ГОС – главная обратная связь); внутренний контур – $W_{\text{р}}(p) \to W_{\text{оп}}(p) \to W^0_{\text{ин}}(p) \to W_{\text{р}}(p)$, где $W_{\text{н.м}}(p)$ – неполная модель, реализованная в виде реального дифференциатора (элемента предвидения последствий принятия управленческих решений).

На третьем и четвертом этапах моделирования использовалась полная структурная схема (рис. 2), где в качестве неполной модели третьего этапа (2001–2006 гг.) применялось пропорциональное звено с коэффициентом передачи, равным единице, а в четвертом этапе – часть передаточной функции (7), которая не содержит лага.

Модель упредителя внутренних возмущений $W_{\text{укв1}}(p)$ принималась согласно принципу инвариантности (независимости) равной обратной передаточной функции регулятора. Модель крайнего внешнего возмущения соответствовала реальному дифференцирующему звену с передаточной функцией

$$W_{\text{укв2}}(p) = \frac{k_{\text{д}}T_{\text{д}}p}{T_{\text{д}}p + 1}, \quad (10)$$

где $k_{\text{д}}$ – коэффициент передачи; $T_{\text{д}}$ – время дифференцирования. В качестве управляющего воздействия анализировались инвестиции в основные фонды.

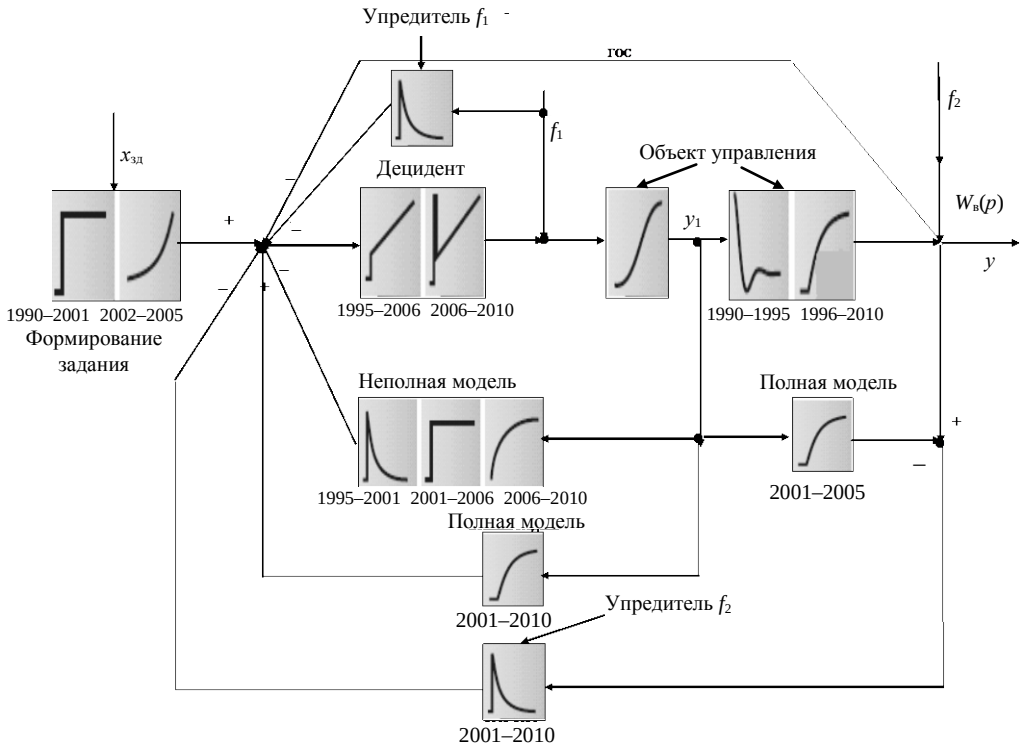

Рис. 2. Полная структурная схема динамической модели системы управления ВВП Республики Беларусь

Результаты численного моделирования динамической модели эффективной системы управления номинальным ВВП Республики Беларусь при отработке крайнего внешнего возмущения ($f_2(t)$ – дефолт 1998 г. в России) приведены на рис. 3.

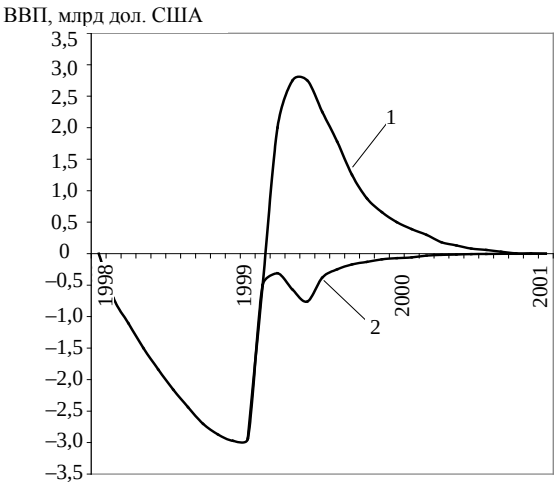

Рис. 3. Результаты численного моделирования динамической модели эффективной системы управления ВВП Республики Беларусь при отработке крайнего внешнего возмущения (дефолт в России в 1998 г.) при различных значениях времени принятия управленческих решений: 1 – при компенсации внешнего возмущения в виде дифференциатора первого порядка; 2 – то же второго порядка

Видно, что система управления с устройством компенсации крайнего внешнего возмущения в виде дифференциатора первого порядка инерционности отработала это возмущение весьма эффективно – за три года (кривая 1). Вместе с тем уменьшение времени принятия управленческих решений при использовании дифференциатора второго порядка инерционности приводит к повышению быстродействия в отработке крайнего внешнего возмущения на 30 %, т. е. на один год (кривая 2).

Применение упредителя внутренних возмущений $W_{укв1}(p)$ позволяет практически инвариантно отрабатывать последние (кривая 1, рис. 4), что существенно улучшает качество управления при минимальной динамической ошибке регулирования по сравнению с управлением без упредителя внутренних возмущений (кривая 2, рис. 4). При этом время отработки внутреннего возмущения сокращается примерно в два раза.

Адекватность предложенной математической модели фактическому изменению номинального ВВП Республики Беларусь подтверждается достаточно хорошим совпадением расчетного и фактического изменений ВВП до 2006 г. (рис. 5): ⎯⎯ – фактическая; ◦◦◦● – расчет.

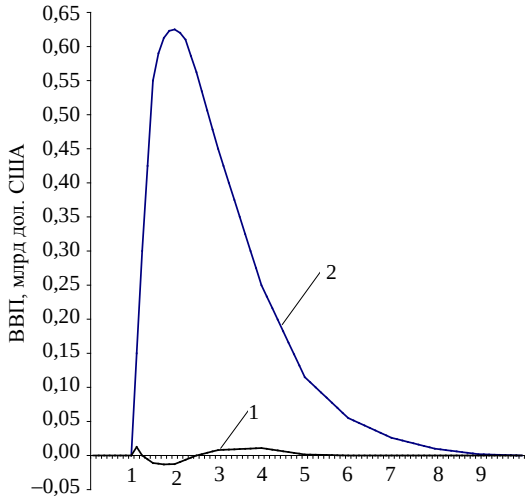

Рис. 4. Графики переходных процессов при единичном скачкообразном внутреннем возмущении динамической модели эффективной системы управления ВВП Республики Беларусь: 1 – с применением упредителя внутренних возмущений; 2 – без применения

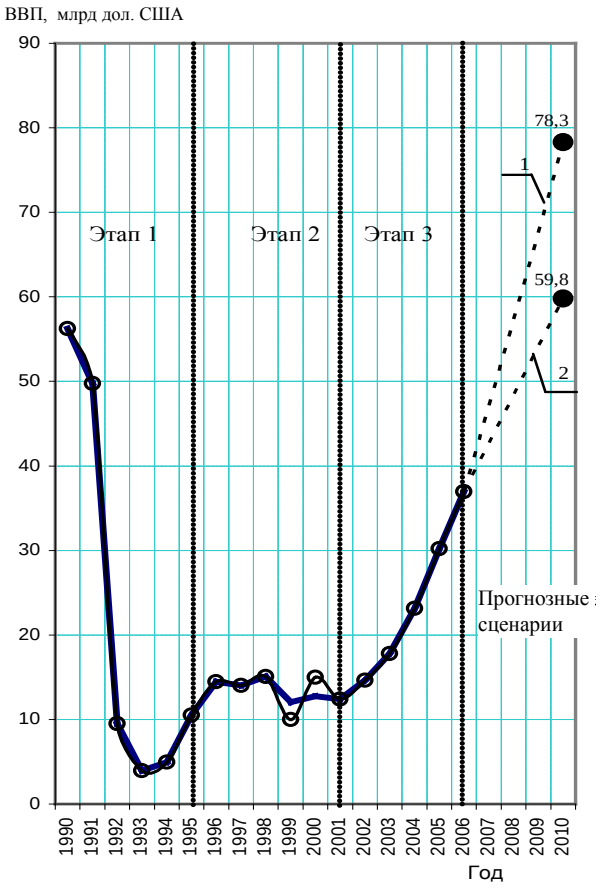

Рис. 5. График переходных процессов расчетного, прогнозного и фактического изменений номинального ВВП Республики Беларусь: ——— – факт; ○○○● – расчет; -·-·-·- – прогноз; 1 – инновационно-прорывной сценарий; 2 – инновационно-экологический

Ускоренные темпы прогнозного роста ВВП четвертого этапа (2006–2010 гг.) достигаются за счет использования пропорционально-интегрально-дифференциального алгоритма принятия управленческого решения и уменьшения инерционных свойств упредителем внешних возмущений. При инновационно-прорывном сценарии (линия 1, рис. 5) ВВП Беларуси достигнет 78,3 млрд дол. США, при инновационно-экологическом сценарии (линия 2, рис. 5) – 59,8 млрд дол. США. Это позволит в первом сценарии к 2011 г. поднять уровень среднемесячной заработной платы в республике до 700 дол. США, во втором – до 550 дол. США.

ВЫВОДЫ

1. Распад Советского Союза, воспринимаемый как скачок входного воздействия на объект управления – экономику Республики Беларусь (на примере ВВП), позволил экспериментально определить динамические характеристики объекта в виде колебательного звена, которое при усилении системы государственного управления валовым внутренним продуктом, начиная с 1995 г., превратилось в инерционное звено с большей устойчивостью.

2. Моделирование различных вариантов принятия управленческих решений в системе государственного регулирования позволило установить, что для сохранения высоких темпов роста номинального ВВП Беларуси имеются потенциальные возможности.

3. Адекватность разработанной динамической модели фактическому изменению ВВП Республики Беларусь с 1990 по 2006 г. позволила сформировать два сценария прогноза роста ВВП до 2010 г. Реализация конкретного сценария будет зависеть от темпов снижения энергоемкости ВВП в условиях неуклонного роста стоимости природного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никитенко, П. Г.** Модель устойчивого социально-экономического развития Беларуси: проблемы формирования и эволюции / П. Г. Никитенко. – Минск: Право и экономика, 2000. – 312 с.

2. **Национальная** безопасность Республики Беларусь. Современное состояние и перспективы / М. В. Мясникович [и др]. – Минск: Право и экономика, 2003. – 562 с.

3. **Кулаков, Г. Т.** Общие принципы управления экономической безопасностью государства с точки зрения экономической кибернетики / Г. Т. Кулаков, Е. Г. Моисеенко // Социально-экономическая безопасность государства: оценка, обеспечение: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11–12 дек. 2001 г.: в 2 т. – Минск: ИНБ Республики Беларусь, 2003. – Т. 1. – С. 120–126.

4. **Никитенко, П. Г.** Динамическая модель системы управления валовым внутренним продуктом Республики Беларусь с прогнозом до 2010 г. / П. Г. Никитенко, Г. Т. Кулаков, В. М. Цилибина // Белорусская модель социально-экономического устойчивого инновационного развития: формирование и пути реализации: сборник материалов междунар. науч.-практ. конф., Минск 19–22 апр. 2006 г. / Право и экономика; науч.-ред. совет: М. В. Мясникович [и др.]. – Минск, 2006. – С. 522–525.

5. **Кулаков, Г. Т.** Анализ и синтез систем автоматического регулирования: учеб. пособие / Г. Т. Кулаков. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 135 с.

6. **Кузмицкий, И. Ф.** Теория автоматического управления: учеб. пособие / И. Ф. Кузмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2006. – 486 с.

Поступила 6.11.2007

УДК 658.51

ФОРМИРОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

БАРМУЦКИЙ Р. И.

Белорусский национальный технический университет

Устойчивое развитие предприятия (УРП) представляет собой траекторию совершенствования производства и повышения эффективности управления, которая отличается от достигнутой точки равновесия экономического состояния и сложившейся структуры хозяйствования. Смена точки равновесия производственной системы заключается в смене траектории или направления ее совершенствования и устойчивого развития.

На современном этапе динамичного развития экономики Республики Беларусь предприятия становятся перед выбором: продолжить свое развитие в рамках индустриальных технологий или переходить на использование инновационных технологий. Новый информационный экономический уклад характеризуется быстрым устареванием капитала, а также определенными финансовыми потерями за риск, инновации, повышение качества продукции и проведение сервиса. Однако даже при такой экономической ситуации упущенная выгода вследствие неиспользования возможностей перехода на выпуск продукции нового поколения перекрывает минимизацию издержек, достигнутых за счет эффективного использования устаревших технологий и изношенного оборудования.

Основным экономическим условием, способствующим УРП, является расширение рынка продаж продукции, своевременное обеспечение сырьем и материалами, научная организация труда и заработной платы, формирование финансовой стратегии и улучшения социального положения работников. Повышение эффективности производства и управления обеспечивает положительную обратную связь, которая стимулирует экономический рост, процесс развития рынка продаж и повышения заработной платы работников предприятий. Положительная обратная связь оказывает стимулирующее действие на увеличение результатов работы предприятия. Развитие рынков продаж выпускаемой продукции играет ведущую роль для устойчивого функционирования процесса производства.

На основе емкости рынка синхронизируется движение потоков материальных трудовых и денежных ресурсов, согласовываются интересы потребителя, производителя и поставщика материалов и комплектующих, определяется величина экономического эффекта и прибыли.