

СТАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦИКЛОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПОДШИПНИКОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2014 М.И. Гераськин, В.В. Егорова*

Ключевые слова: производственный цикл, незавершенное производство, готовая продукция, оптимизация, спрос и предложение, норматив производственных расходов.

Рассматривается проблема оптимизации потоков товарно-материальных ценностей в производственном процессе предприятий подшипниковой промышленности. Разработана статическая модель оптимизации производственных заказов по критерию длительности производственного цикла с учетом ограничений, обусловленных функциями спроса покупателей на продукцию и функциями предложения поставщиков материалов, а также нормативами производственных расходов. Сформированы аналитические механизмы оптимизации, на основе которых проведено моделирование планов выпуска продукции, а также заказов и отпуска материалов в производство.

Введение

В условиях стабильной динамики роста ВВП в последнее десятилетие (среднегодовой темп роста составлял 103%¹) наметилась тенденция повышения роли машиностроения в структуре производственного сектора российской экономики: удельный вес продукции машиностроения в объеме промышленного производства в 2000-2013 гг. возрос с 21 до 35%². Развитие машиностроения как основного потребителя продукции подшипниковой промышленности (в структуре рынка подшипников машиностроение составляет 24% в 2012 г.³) генерирует производный спрос на подшипники, вследствие чего в 2006-2012 гг. рост физических объемов произ-

водства достиг 130% по подшипникам качения, 136% по подшипникам скольжения (рис. 1). В стоимостном выражении объем рынка подшипниковой отрасли возрос в 2006-2012 гг. на 38%⁴. В дальнейшем будем анализировать показатели подшипниковой промышленности на примере крупнейших производителей Самарской области: ООО «Завод приборных подшипников» и ОАО «Самарский подшипниковый завод», охватывающих 11% объема рынка подшипников РФ⁵.

Специфической чертой организации бизнес-процесса в подшипниковой промышленности является многономенклатурное мелкосерийное производство на основе позаказного квартального планирования, обус-

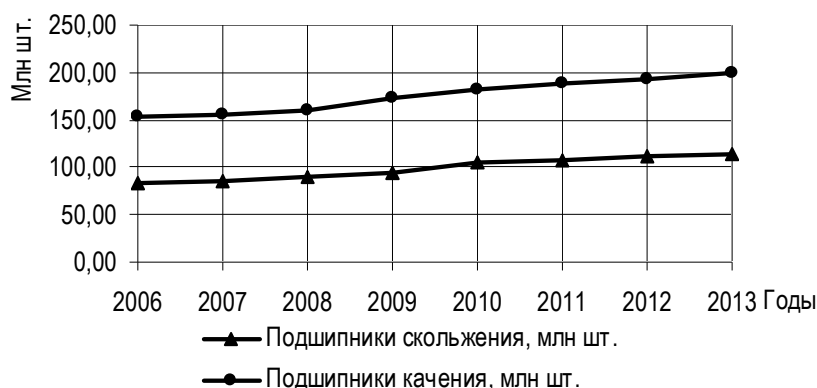


Рис. 1. Динамика производства подшипников в РФ в 2006 - 2013 гг.

Источник: Материалы сайта Росстата РФ. URL: <http://www.gks.ru>.

* Гераськин Михаил Иванович, доктор экономических наук, профессор, зав. кафедрой математических методов в экономике. E-mail: innovation@ssau.ru; Егорова Виктория Викторовна, аспирант. E-mail: egorova.ssau@gmail.com. - Самарский государственный экономический университет.

ловливающее вследствие повышательной динамики цен на сырье⁶ возникновение значительных остатков товарно-материальных ценностей (ТМЦ). В результате происходит⁷ замедление оборачиваемости ресурсов и нарастание продолжительности производственных циклов, приводя к накоплению упущенной прибыли (рис. 2), как потенциальной прибыли, иммобилизованной в остатках ТМЦ.

запасов ограничивает расширение производства вследствие повышения чувствительности финансовых результатов к росту цен на сырье и усиления риска возникновения простоев.

Следовательно, для предприятий подшипниковой промышленности актуальной является проблема оптимизации производственных циклов за счет варьирования системы управления заказами ТМЦ.

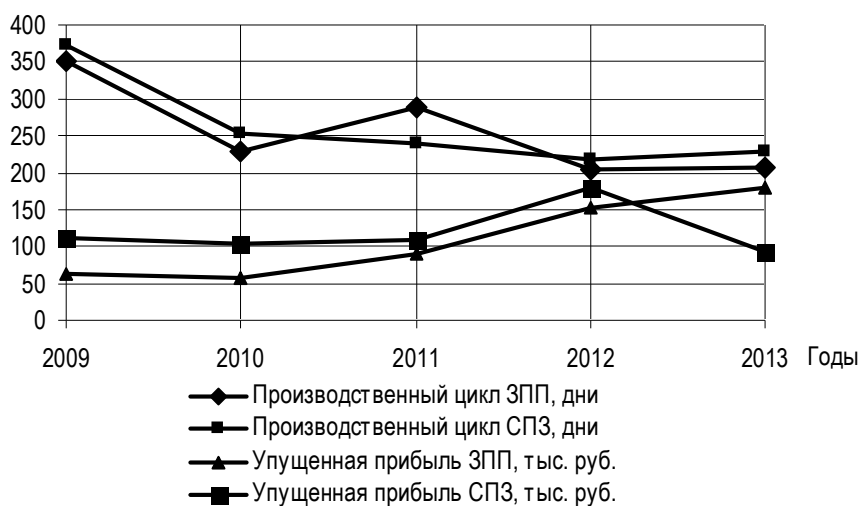


Рис. 2. Динамика продолжительности производственных циклов (дн.) и иммобилизованной в остатках ТМЦ прибыли (тыс. руб.) ООО “Завод приборных подшипников” (ЗПП), ОАО “Самарский подшипниковый завод” (СПЗ) в 2009-2013 гг.

В данной связи сокращение сроков изготовления заказов в подшипниковой отрасли путем оптимизации производственного цикла способствует повышению экономической эффективности предприятия за счет роста оборачиваемости материальных и финансовых ресурсов и повышения ресурсоотдачи, обуславливает сокращение издержек на заготовление и хранение материальных ценностей, предопределяет структурные изменения в системе планирования производства. Оптимизация производственного цикла обеспечивается на основе сбалансированного накопления и расходования ТМЦ на производство и реализацию продукции. При этом следует учитывать противоречивое влияние динамики изменения запасов на экономические показатели предприятия: с одной стороны, превышение запасов над минимально необходимым уровнем приводит к замораживанию оборотного капитала, замедлению его оборачиваемости, росту расходов на хранение, снижению ликвидности баланса; с другой стороны, недостаток производственных

Анализ подходов к моделированию производственных процессов

Оптимизация производственных процессов на современном этапе основана на моделировании одной или нескольких стадий бизнес-процессов предприятий, включающих в себя, как правило, агрегированные процессы заготовления, производства и сбыта на основе прибыли предприятия как критерия оптимальности.

Однопроцессные модели формулировались в виде задач объемно-календарного оперативного планирования⁸ производственной программы. Моделирование этапов заготовления и выпуска исследовалось на основе линейных статических моделей прибыли⁹ с учетом ограничений на складские остатки; анализировалось¹⁰ влияние функций спроса покупателей на заготовительные расходы; изучалась¹¹ взаимосвязь между остатками ТМЦ и заказами на продукцию с учетом ограничений на производственные мощности, а также влияние различных критериев (издержек, прибыли

и выручки) на выбор объемов заказов ТМЦ; оптимизировалась отпускная цена производителя¹² с учетом расходов на заготовку и хранение ТМЦ. Моделирование этапов заготовления и производства рассматривалось¹³ в форме моделей терминального управления по критерию минимума отклонений производственных расходов от плановых показателей производственной программы; оптимизировалась¹⁴ себестоимость товарной продукции по стадиям технологического процесса производства.

Комплексное моделирование процессов заготовления, производства и сбыта также в рамках линейных моделей прибыли проводилось¹⁵ путем оптимизации производственной программы при ограничениях на поставки сырья, производственные и складские мощности. Многопроцессные модели оптимизации формулировались в виде задач с несколькими критериями: рассматривалось календарное планирование с нечеткими ограничениями¹⁶ по критериям прибыли и затрат; оптимизировался ассортимент выпускаемой продукции¹⁷ по критериям объема продаж, прибыли, себестоимости и трудоемкости; оптимизировались проекты с точки зрения критериев времени и стоимости выполнения¹⁸.

Таким образом, современный уровень экономико-математического моделирования производственных систем не отражает нелинейный характер динамики экономических показателей предприятий при многопроцессной системе производства, что обуславливает необходимость совершенствования моделей с учетом особенностей подшипниковой промышленности.

Модель оптимизации производственного цикла

Длительность производственного цикла характеризует соответствие динамики изменения остатков ТМЦ динамике расходования ТМЦ при выпуске продукции и определяется по формуле¹⁹

$$F(u) = \frac{T}{C} \cdot (\bar{u}_1 + \bar{u}_2 + \bar{u}_3), \quad (1)$$

где T - продолжительность периода (год, квартал), дн., C - себестоимость реализован-

ной за период T продукции, $\bar{u}_1 + \bar{u}_2 + \bar{u}_3$ - средние остатки материалов незавершенного производства (НЗП) и готовой продукции за период T .

В качестве параметров управления u при оптимизации производственного цикла будем рассматривать показатели заказов ТМЦ в производственном процессе в период T , определяемые по следующим балансовым соотношениям²⁰:

♦ объемы заказов основных материалов (металлов) на склад согласно плану заказов на производство подшипников определяются исходя из материального баланса

$$u_1 = u_1^T - u_1^0 + u_2; \quad (2)$$

♦ объемы наряд-заказов основных материалов со склада в цеха для производства заготовок подшипников согласно плану заказов на производство продукции формируются на основе производственного баланса

$$u_2 = u_2^T - u_2^0 + u_3 - P; \quad (3)$$

♦ объемы наряд-заказов на отпуск готовой продукции согласно заказам покупателей оцениваются исходя из товарного баланса

$$u_3 = u_3^T - u_3^0 + C, \quad (4)$$

где $u_1^0, u_2^0, u_3^0, u_1^T, u_2^T, u_3^T$ - остатки материалов, НЗП и готовой продукции на начало и конец периода T , соответственно; P - фактические производственные расходы за период T , за исключением стоимости материалов u_2 , отпущенных со склада на производство продукции, а именно расходы на оплату труда, социальные отчисления, амортизация и прочие расходы.

Определим средние значения остатков по формулам с учетом (2)-(4):

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= u_1^0 + \frac{u_1 - u_2}{2}, \\ \bar{u}_2 &= u_2^0 + \frac{u_2 + P - u_3}{2}, \\ \bar{u}_3 &= u_3^0 + \frac{u_3 - C}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Следовательно, суммарный объем заказов материалов

$$u_1 = \sum_{i=1}^I u_1^i$$

оптимизируется по критерию, полученному подстановкой (5) в (1):

$$\min F(u) = \frac{T}{C} \left(u_1^0 + u_2^0 + u_3^0 + \frac{u_1 + P - C}{2} \right), \quad (6)$$

где u_i - материал i -го наименования; I - номенклатура материалов.

Условия, выражающие связь динамики производственного процесса с системой планирования заказов материалов в периоде T , определяются, во-первых, материалоемкостью производства

$$P = P(u_1), \quad (7)$$

которая характеризует уровень производственных расходов предприятия за период (за исключением материальных расходов) на единицу материальных затрат; во-вторых, материалоемкостью продукции

$$C = C(u_1), \quad (8)$$

выражающей соотношение стоимости реализованной продукции и материальных затрат.

Параметры управления могут варьироваться в рамках следующих ограничений. Ограничение по нормативной потребности основных материалов (металлов) в зависимости от объема заказов покупателей определяется исходя из норм расхода основных материалов, а также наличных остатков готовой продукции и НЗП:

$$u_1 \geq u_1^{\min}(N), \quad u_1^{\min} = \sum_{i=1}^I u_1^{i \min}(N),$$

$$u_1^{i \min} = \rho_i \sum_{j=1}^J m_{ij} \cdot (N_j - u_{3j}^0 - k_{НЗПj} \cdot u_{2j}^0), \quad i = 1, \dots, I, \quad (9)$$

где m_{ij} - норматив расхода i -го металла на производство единицы продукции j -го

типа; N_j - объем заказов продукции j -го

типа; $k_{НЗПj}$ - коэффициент выхода готового изделия j -го типа из НЗП, определяемый на основе анализа ретроспективной информации как среднее значение в предыдущие годы; ρ_i - закупочная цена i -го металла (за тонну).

Ограничение по предельному уровню заготовительных издержек

$$u_1 \geq u_1^{\min}(\rho) \quad (10)$$

обусловлено наличием рыночной зависимости закупочной цены основных материалов от размера закупаемой партии

$$\rho_i = \rho_i(u_{1i}), \quad i = 1, \dots, I, \quad \rho'_{i u_i} < 0 \quad (11)$$

и определяется исходя из условия минимальных суммарных производственных расходов:

$$\min P_{\Sigma}(u) = \sum_{i=1}^I \rho_i(u_{1i}) u_{1i}(\rho) + P(u). \quad (12)$$

Моделирование оптимизации производственного цикла

Сформируем модель (6)-(12) на основе ретроспективной информации о квартальной динамике технико-экономических показателей ОАО "Самарский подшипниковый завод" за период 2011-2013 гг. Графический анализ (рис. 3) показывает целесообразность определения регрессионных зависимостей (7), (8), (11) в форме степенных функций вида

$$\begin{aligned} P(u_1) &= A_1 u_1^{\alpha}, \quad C(u_1) = A_2 u_1^{\beta}, \\ \rho_1(u_1) &= D_1 u_1^{b_1}, \quad \rho_2(u_1) = D_2 u_1^{b_2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $A_1, A_2, D_1, D_2, \alpha, \beta, b_1, b_2$ - коэффициенты регрессионных зависимостей.

Подставив регрессии (13) в (6), получим

$$\begin{aligned} F(u) &= \frac{T(u_1^0 + u_2^0 + u_3^0)}{A_2 u_1^{\beta}} + \\ &+ \frac{T}{2} \cdot \left(\frac{u_1^{1-\beta} + A_1 \cdot u_1^{\alpha-\beta}}{A_2} - 1 \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Исходя из необходимого и достаточного условий оптимальности цикла

$$F'_{u_1}(u) = \frac{T(u_1^0 + u_2^0 + u_3^0)}{A_2} \cdot (-\beta) \cdot u_1^{-\beta-1} + \frac{T}{2A_2} \cdot (1-\beta) \cdot u_1^{-\beta} + \frac{TA_1}{2A_2} \cdot (\alpha - \beta) \cdot u_1^{\alpha-\beta-1} = 0,$$

$$F''_{u_1}(u) = \frac{T(u_1^0 + u_2^0 + u_3^0)}{A_2} \cdot (-\beta) \times (-\beta - 1)u_1^{-\beta-2} + \frac{T}{2A_2} \cdot (1-\beta) \times (-\beta)u_1^{-\beta-1} + \frac{TA_1}{2A_2} \cdot (\alpha - \beta) \times (\alpha - \beta - 1)u_1^{\alpha-\beta-2} > 0$$

определим значение $u_1^{F \min}$, минимизирующее длительность производственного цикла без учета ограничений (9), (10) из следующего уравнения:

$$u_1^{F \min} (1 - \beta) + A_1 (\alpha - \beta) (u_1^{F \min})^\alpha = 2\beta(u_1^0 + u_2^0 + u_3^0). \quad (15)$$

В частном, но характерном для промышленных предприятий случае прямой пропорциональности производственных расходов материальным затратам ($\alpha \approx 1$) из (15) следует

$$u_1^{F \min} = \frac{2\beta(u_1^0 + u_2^0 + u_3^0)}{(1 - \beta)(1 + A_1)}.$$

Анализ достаточного условия оптимальности показывает, что условие $F''_{u_1} > 0$ выполняется в одном из следующих случаев:

$$\begin{cases} \alpha > \beta \cap \alpha > \beta + 1 \\ \alpha < \beta \cap \alpha < \beta + 1 \\ \alpha > \beta \cap \alpha < \beta + 1. \end{cases}$$

Для выполнения условия $\alpha > \beta \cap \alpha > \beta + 1$ темп роста $P(u)$ должен значительно опережать темп роста $C(u)$, что невозможно при наличии непроизводственных расходов. Случай,

когда выполняется условие $\alpha < \beta \cap \alpha < \beta + 1$, является наиболее характерным. При $\alpha > \beta \cap \alpha < \beta + 1$ должно выполняться условие

$$(u_1^0 + u_2^0 + u_3^0)\beta(\beta + 1) > |A_1(\alpha - \beta)(\alpha - \beta - 1)u_1^\alpha|, \quad (16)$$

что характерно для предприятий подшипниковой отрасли с большой продолжительностью циклов (рис. 3) имеющих вследствие этого значительные запасы ТМЦ.

Необходимое условие минимума суммарных производственных расходов

$$P'_{\Sigma u_i}(u) = D_i \cdot (1 + b_i) \cdot u_i^{b_i} + A_1 \cdot \alpha \cdot \left(\sum_{j=1}^I u_{ij} \right)^{\alpha-1} = 0, \quad i = 1, \dots, I$$

позволяет найти оптимальное значение заказа i -го материала с учетом влияния функций предложения поставщиков из следующей системы уравнений:

$$u_{ij}^{\min} = \left(\frac{A_1 \cdot \alpha \cdot \left(\sum_{j=1}^I u_{ij}^{\min} \right)^{\alpha-1}}{(1 + b_i) \cdot D_i} \right)^{\frac{1}{b_i}}, \quad (17)$$

$$i = 1, \dots, I,$$

а анализ достаточного условия

$$P''_{\Sigma u_i}(u) = D_i \cdot (1 + b_i) \cdot b_i \cdot u_i^{b_i-1} + A_1 \cdot \alpha \cdot (\alpha - 1) \left(\sum_{j=1}^I u_{ij} \right)^{\alpha-2} > 0, \quad i = 1, \dots, I$$

показывает, что минимум $P_\Sigma(u)$ имеет место при соотношении

$$b_i < -1 \cap |D_i(1 + b_i)b_i u_i^{b_i-1}| > |A_1 \cdot \alpha \cdot (\alpha - 1) \left(\sum_{j=1}^I u_{ij} \right)^{\alpha-2}|, \quad (18)$$

выполнение которого соответствует высокоэластичной кривой предложения поставщиков материалов. При невыполнении условия (18) ограничение (10) не играет роли, поскольку функция предложения поставщиков неэластична.

С учетом ограничений (9), (10) решение модели (6)-(12) имеет следующий общий вид:

$$u^* = \begin{cases} u_1^{Fmin}, & \text{если } u_1^{Fmin} \geq \\ & \geq u_1^{min}(N), u_1^{Fmin} \geq u_1^{min}(\rho), \\ u_1^{min}(N), & \text{если } u_1^{min}(N) \geq u_1^{Fmin}, \\ & u_1^{min}(N) \geq u_1^{min}(\rho), \\ u_1^{min}(\rho), & \text{если } u_1^{min}(\rho) \geq u_1^{Fmin}, \\ & u_1^{min}(\rho) \geq u_1^{min}(N). \end{cases} \quad (19)$$

Анализ статистических оценок (коэффициента детерминации, превышающе-го значение 0,98, и критерия Фишера, существенно превышающего критический уровень) подтверждает достоверность и адекватность сформированных моделей.

На рис. 4 представлены зависимость продолжительности цикла (14) от объема заказа материалов, рассчитанная с учетом коэффициентов регрессий (20), в которых коэффициенты A_1, A_2 приведены к среднегодовым значениям, а также предел ограничения (9); при этом ограничение (10) не учитывается в силу условия (18). По механизму (19) значение $u_1^{Fmin} = 189\ 103$ тыс. руб. оптимизирует критерий (14), достигающий при этом значения $F[u_1^{Fmin}] = 280$, поскольку $u_1^{min}(N) = 213\ 554$ тыс. руб., $F[u_1^{min}(N)] = 281$;

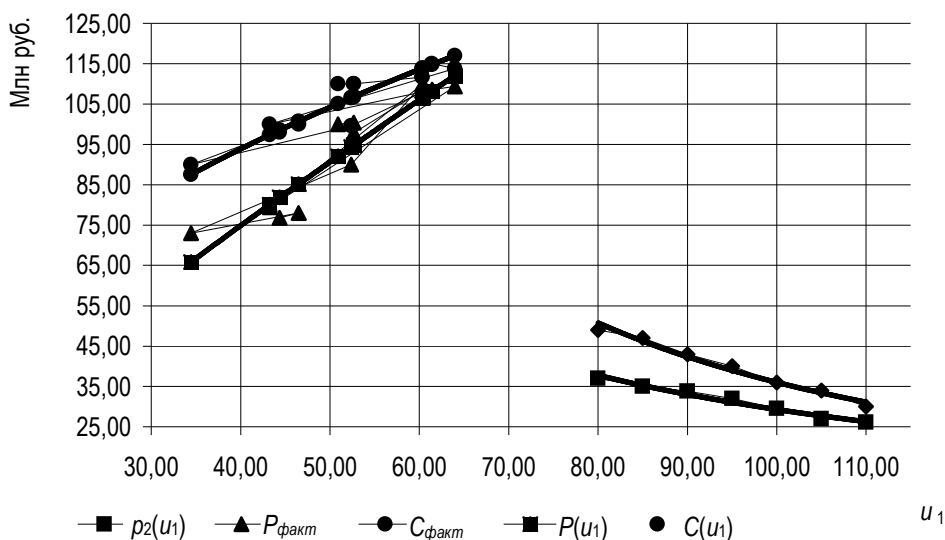


Рис. 3. Динамика изменения производственных расходов, себестоимости реализованной продукции, закупочных цен шарикоподшипниковой стали p_1 , нержавеющей стали p_2 (за тонну) в 2011-2013 гг.

Оценка параметров регрессий (13) алгоритмом метода наименьших квадратов, реализованным в процессоре Excel, позволила получить следующие уравнения:

$$\begin{aligned} P(u_1) &= 8,35u_1^{0,86}, \\ C(u_1) &= 657u_1^{0,47}, \\ p_1(u_1) &= 205,1u_1^{-0,31}, \\ p_2(u_1) &= 104,8u_1^{-0,23}. \end{aligned} \quad (20)$$

при этом условие (16) выполняется. По сравнению с показателем объема заказа материалов, достигнутым в 2013 г. (216 537 тыс. руб.), при котором продолжительность производственного цикла составляла 286 дн., оптимизация привела к сокращению средних сроков производства продукции (на 6 дн.).

Заключение

Разработана модель оптимизации производственных циклов предприятий подшипниковой промышленности, формализующая

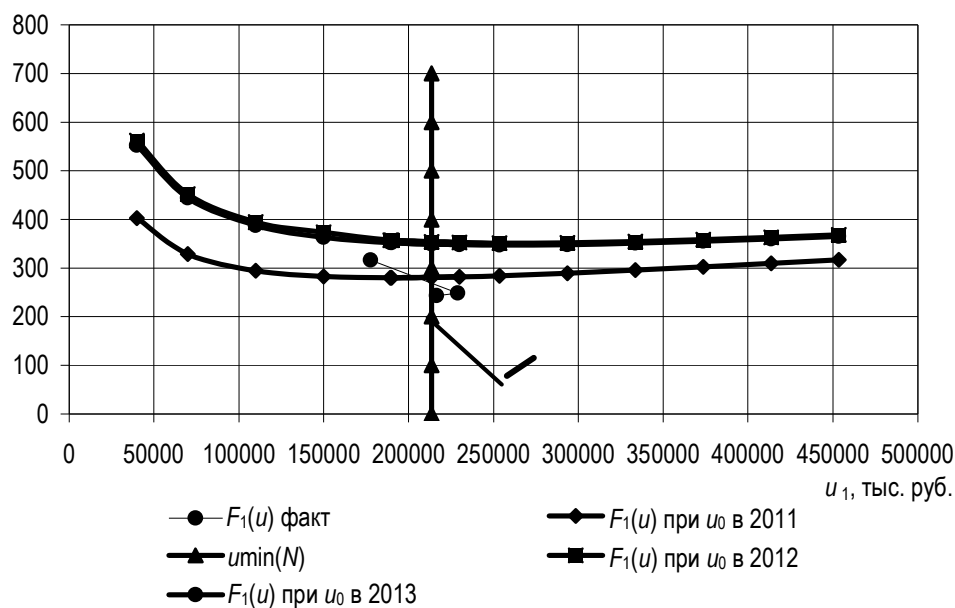


Рис. 4. Расчетные и фактические (при объемах заказов в 2011-2013 гг.) значения производственного цикла, дн.

основные бизнес-процессы отрасли с учетом ограничений, обусловленных объемами заказов покупателей и ценовой политикой поставщиков материалов. Модель позволяет определить объем закупок основных материалов, оптимизирующий продолжительность производственного цикла, с учетом взаимосвязей процессов заготовления, производства и сбыта при ограничениях на объемы выпуска продукции и объемы закупаемых партий материалов. Модель основана на предположении о независимости производственных расходов от динамики начальных остатков, базируется на прогнозах показателей расходов на производство и себестоимости выпуска в зависимости от объемов заказов материалов по ретроспективной информации и адекватна при стабильном уровне остатков ТМЦ в динамике.

¹ Материалы сайта Росстата РФ. URL: <http://www.gks.ru>.

² Материалы сайта Минпромторга РФ. URL: <http://www.minpromtorg.gov.ru>.

³ Материалы сайта Правительства РФ "О мерах по защите российских производителей подшипников". URL: <http://www.government.gov.ru>.

⁴ Материалы сайта Минпромторга РФ. URL: <http://www.minpromtorg.gov.ru>.

⁵ Материалы сайта ООО "Завод приборных подшипников". URL: <http://www.mbf-samara.ru>.

⁶ Горлач Б.А., Савельев Г.Л. Прогнозирование и оптимизация процесса поставок в условиях колебания спроса // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (Национального исследовательского университета). 2011. № 4. С. 48-57.

⁷ См.: Материалы сайта ООО "Завод приборных подшипников". URL: <http://www.mbf-samara.ru>; Материалы сайта ОАО "Самарский подшипниковый завод". URL: <http://www.spzgroup.ru>.

⁸ См.: Бражников М.А. Моделирование календарных планов сборочных процессов в условиях машиностроительного производства // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия "Физико-математические науки". 2004. № 26. С. 165-173; Панюков А.В. Подходы к формированию производственной программы для предприятий с дискретным механосборочным типом производства // Вестник Пермского университета. Серия "Экономика". 2011. № 4 (11). С. 74-83; Ружанская Н.В. Методика оптимизации запасов торговой организации: модели и возможности применения // Корпоративное управление и инновационное развитие Севера. Вестник научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета. 2008. № 3. С. 107-115.

9 Толысбаев Б.С. Экономико-математическое моделирование процесса поставки сельскохозяйственной продукции // Вестник ОГУ. 2006. № 5. С. 85-88.

¹⁰ Кузнецов Л. А., Черных М.В. Новый подход к решению задачи планирования производственной деятельности организации // Управление предприятием. 2005. № 1. С. 66-76.

¹¹ Ткач В.Р. Экономико-математические модели оперативного планирования камнеобрабатывающего производства : доклад на симпозиуме "Неделя горняка-2001". М. : МГТУ, 2001.

¹² Пижурин А.А., Муращенко Д.Д. Оптимизационная математическая модель задачи оперативного планирования и управления лесопильно-деревообрабатывающим производством в условиях рыночной экономики // Лесной вестник. 2008 № 3. С. 32-35.

¹³ Григорьев В.П., Калюта В.Н., Киселев К.А. Модель оптимального распределения ресурсов в производство // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 5. С. 179-181.

¹⁴ Зубкова Н.В. Применение экономико-математических моделей при формировании затрат машиностроительного предприятия на стадии планирования // Вектор науки ТГУ. 2010. № 2(12). С. 166-169.

¹⁵ Федорин В.Ю. Проблема рынка природного камня в России // Камень и бизнес. 2000. № 2. С. 76-80.

¹⁶ Вожаков А.В., Гитман М.Б. Модель календарного планирования с нечеткими ограничениями // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2008. № 4. С. 79-82.

¹⁷ Шориков А.Ф. Динамическая оптимизация комплексного управления технологическими процессами на предприятии // Известия Уральского государственного экономического университета. 2007. № 1(18). С. 254-266.

¹⁸ Кононеко В.Н., Мироненко И.Л. Анализ финансового состояния предприятия (экспресс-оценка) // Менеджмент в России и за рубежом. 2008. № 34. С. 26-37.

¹⁹ Экономико-математические методы и модели: учеб. пособие / под ред. С.И. Макарова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : КНОРУС, 2009. 240 с.

²⁰ Зубкова Н.В. Указ. соч.

Поступила в редакцию 09.09.2014 г.