

В данной работе проведено исследование функционирования предприятия, выполняющего следующие работы: – изготовление воздухопроводов, комплектующих изделий к ним, калориферов и других вентиляционных и сантехнических изделий и оборудования; – монтаж и автоматизация систем вентиляции, отопления и кондиционирования воздуха; – пуско-наладка, обязательным условием которой является испытание вентиляционных систем на эффективность с использованием автоматизации и всех систем сигнализации и оповещения в случае аварийной или чрезвычайной ситуации. Численность работников предприятия составляет более 200 человек, которые являются высококвалифицированными и профессиональными специалистами. Для моделирования процессов изготовления и монтажа вентиляционного и сантехнического оборудования, выделим следующие виды работ: – вентиляционные; – сантехнические; – электромонтажные; – пуско-наладочные. После всех операций, производится контроль. Замечания, выявленные в результате проверки, должны быть устранены до окончания срока договорных работ. Первыми к работе на объекте приступают вентиляционщики. В их задачу входит изготовление и монтаж систем воздухопроводов, установка вентиляционных агрегатов и сетевого вентиляционного оборудования. Сантехники занимаются системой холода или теплоснабжения. Основная их работа состоит в том, что бы подвести трубы с теплофикационной водой к приточной установке (установке подачи воздуха). После завершения работ по монтажу систем вентиляции и отопления к работе приступают электромонтажники (автоматчики). Они выполняют работу по подключению систем вентиляции, отопления и кондиционирования воздуха к системе автоматизации, пожаротушения и систем сигнализации. Завершение работ по монтажу и автоматизации систем вентиляции отопления и кондиционирования происходит на стадии пуско-наладки. Наладчики настраивают программное обеспечение, которое позволяет без участия человека определять температуру подаваемого в помещение воздуха, автоматически переходить на зимний или летний режим работы оборудования и в случае чрезвычайной ситуации автоматически переходить в аварийный режим. Например, в случае пожара приточная и вытяжная вентиляция автоматически отключаются, а система дымоудаления начинает работать. Целью исследования является повышение эффективности процессов изготовления и монтажа вентиляционного и сантехнического оборудования за счет: – сокращения стоимости выполнения работ; – обеспечения выполнения работ в договорные сроки; – повышения уровня занятости работников. Для достижения поставленных целей предложена методика, являющаяся дальнейшим развитием работ [1-4] обеспечивающая корректность получаемых результатов, которая состоит из следующих этапов. 1. Постановка задач. 2. Разработка программной имитационной модели в системе GPSS W. 3. Построение стратегического плана проведения экспериментов и проведение имитационных

экспериментов по стратегическому плану. 4. Оценка достоверности результатов. 5. Построение математической модели производственных процессов, состоящей из совокупности уравнений регрессии. 6. Вывод формул для вычисления оптимальных значений количества работников на выделенных операциях производственного процесса. Далее последовательно рассмотрим все этапы исследования в соответствии с предложенной методикой. Математическая постановка задач Ставится задача разработки математической модели производственных процессов, состоящей из совокупности уравнений регрессии, функционально представляемых в следующем виде: (1) где j -й результативный показатель эффективности производственного процесса; x_i – i -й фактор, влияющий на производственный процесс; k – количество результативных показателей эффективности. В качестве результативных показателей эффективности производственных процессов выбраны переменные, приведённые в таблице 1; в качестве оптимизируемых факторов переменные, приведённые в таблице 2; в качестве объективных факторов переменные, приведённые в таблице 3.

Таблица 1 № Код Наименование

1	у1	Доход от выполненных работ в тыс. руб.
2	у2	Количество договоров, выполненных за три года
3	у3	Среднее время выполнения работ по договору в рабочих днях
4	у4	Вероятность выполнения работ в договорные сроки
5	у5	Среднее время срыва договорных работ в рабочих днях
6	у6	Коэффициент занятости вентиляционщиков в долях от 1000
7	у7	Коэффициент занятости сантехников в долях от 1000
8	у8	Коэффициент занятости электромонтажников в долях от 1000
9	у9	Коэффициент занятости пуско-наладчиков в долях от 1000
10	у10	Стандартное отклонение времени выполнения договорных работ в рабочих днях

Таблица 2 № Код Наименование

1	х1	Количество вентиляционщиков
2	х2	Количество сантехников
3	х3	Количество электромонтажников
4	х4	Количество пуско-наладчиков
5	х5	Количество контролеров

Таблица 3 № Код Наименование

1	х6	Среднее время между поступлением заказов на проведение договорных работ в рабочих днях
2	х7	Плановое время выполнения работ по договору в рабочих днях

На показатели качества получаемых уравнений регрессии накладываются следующие ограничения [5].

- Количество степеней свободы: (2) где n – количество вариантов; m – количество переменных в уравнении регрессии.
- Отношение стандартной ошибки к среднему значению должно быть не более 0,10: (3)
- Уровень значимости множественного коэффициента детерминации, показывающий в долях от единицы насколько изменение переменных, вошедших в уравнение регрессии, определяет изменение результативного показателя, не должен превышать 0,05: (4)
- Уровень значимости уравнения регрессии по критерию Фишера должен быть не менее 0,05: (5)
- Все коэффициенты уравнения регрессии должны иметь уровень значимости по критерию Стьюдента не более 0,05. (6)

Кроме того, требуется, чтобы во все уравнения регрессии входили все отобранные факторы, хотя бы в виде каких-

либо математических функций от факторов или произведений факторов между собой. По зависимостям (1) можно произвести оценку степени влияния производственно-экономических факторов на результативные показатели эффективности производственных процессов по их удельным весам и коэффициентам эластичности. 1. По математической модели (1) ставится задача оптимизации. Целевая максимизируемая функция выбирается из перечня результативных показателей эффективности. Наиболее целесообразно в качестве целевой функции принять доход от производственной деятельности. (7) При ограничениях на переменные (8) Объективные факторы x_6 и x_7 в процессе оптимизации не меняются, им присваиваются значения, которые они принимают в конкретных вариантах реализации производственного процесса. 2. Ставится задача вывода формул для вычисления оптимальных значений оптимизируемых показателей по значениям объективных факторов (9) Формулы (9) являются уравнениями регрессии и при их получении учитываются ограничения (2)-(6). Разработка программной имитационной модели на языке GPSS Программная имитационная модель на языке GPSS [5] строго сегментирована по функциональному принципу. Главный сегмент – имитация самого производственного процесса включает в себя четыре модуля по выполнению четырёх производственных и контрольных операций, имитирующих выполнение вентиляционных, сантехнических, электромонтажных и пусконаладочных работ. После выполнения каждой производственной операции производится контроль качества исполнения и в случае обнаружения брака с заданной вероятностью производится возврат на доработку. Возможно, что по каждой операции будет более одного возврата. Контроль качества производится и после полного завершения работ. Отдельные сегменты для каждой категории работников имитируют возможные процессы заболевания работников и их выздоровления. Для имитации вероятностных процессов используются экспоненциальные, равномерные и треугольные. Общее количество операторов в имитационной модели 221, из них 161 блок и 60 команд. Календарный период моделирования – три года. Построение стратегического плана моделирования В качестве ядра стратегического плана примем план дробного факторного эксперимента (ДФЭ). В качестве основных факторов возьмем пять оптимизируемых факторов $x_1 - x_5$ и в качестве дополнительных два объективных фактора x_6 и x_7 . Для построения плана полного факторного эксперимента (ПФЭ) для пяти основных факторов используем вершины пятимерного куба, количество которых равно $2^5=32$. Дополнительный фактор x_6 будем менять по закону изменения произведения основных факторов $x_6=x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$, а дополнительный фактор $x_7=x_3 \cdot x_4 \cdot x_5$. К вершинам куба добавляется центральная точка и $2 \cdot k=14$ звездных точек. В кодированном виде в звёздных точках один фактор принимает значения: -1 или +1, а остальные факторы значения 0. Таким образом, общее количество вариантов будет: $N=1+2k+2 \cdot k =$

$1+25+2\cdot 7 = 47$. Фрагмент стратегического плана имитационных экспериментов в кодированном виде представлен в таблице 4. При имитационном моделировании по стратегическому плану в программную модель значения факторов вводятся в натурном виде. Перевод кодированных значений факторов в натуральный вид отображён в таблице 5.

Таблица 4 № x0 x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 1 1 0
 0 0 0 0 0 2 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 3 1 1 -1 -1 -1 -1 1 -1 ... 46 1 0 0 0 0 0 0 -1 47 1 0 0 0
 0 0 0 1 Таблица 5 Натур- Ко- ный дири- вид ванный вид x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 -1 5 5
 4 2 1 15 60 0 7 9 7 4 2 25 70 1 8 12 9 5 3 35 80 Фрагмент результатов

моделирования приведён в таблице 6. Таблица 6 y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10
 47484 31 62,14 0,74 10,28 496 403 189 169 14,61 77130 43 196,9 0,05 143,7 962
 948 415 206 82,65 33790 22 66,54 0,41 13,76 276 478 209 112 10,84 ... 47404 31
 62,14 0,48 13,09 496 403 189 169 14,61 47534 31 62,14 0,90 11,62 496 403 189 169
 14,61 Оценка достоверности результатов имитационного моделирования Оценка достоверности результатов имитационного моделирования проведена по времени выполнения работ по договору. Принято условие, чтобы доверительная вероятность по каждому из 47 вариантов была не меньше 0.9. Для вычисления доверительной вероятности использована формула, полученная на основании неравенства Чебышева [3].

(10) где $Q = 900$ – количество транзактов зарегистрированных в таблице; y_3 – среднее время выполнения работ по одному договору; y_{10} – стандартное отклонение времени выполнения работ по одному договору. Фрагмент результатов расчёта доверительной вероятности представлен в табл. 7.

Таблица 7 № y3 y10 β 1 62,141 14,613 0,975422 2 196,879 82,65 0,921674 3 66,546 10,837 0,988213 46 62,141 14,613 0,975422 47 62,141 14,613 0,975422 По полученным результатам отметим, что доверительная вероятность во всех вариантах превышает принятый уровень 0,9, что вполне приемлемо.

Построение математической модели производственных процессов, состоящей из совокупности уравнений регрессии Так как все переменные, отобранные для исследования являются случайными, количественными и непрерывными величинами, то в этом случае наиболее целесообразно применение регрессионного анализа [5], основанного на методе наименьших квадратов (МНК), который требует, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от вычисленных по аппроксимирующей зависимости была минимальной: где экспериментальное значение j -го результативного показателя эффективности в i -ом варианте; значение j -го результативного показателя эффективности в i -ом варианте, вычисленное по аппроксимирующей зависимости; N – количество вариантов модели по стратегическому плану; m – количество изменяемых факторов; k – количество результативных показателей эффективности. В формуле (11) факторы могут входить в составе некоторых функций от факторов, либо в составе произведений от нескольких факторов. Уравнения регрессии, связывающие результативные показатели эффективности производственных процессов с

влияющими на них факторами, получены с помощью процедуры пошаговой регрессии пакета прикладных программ Statistica 8.0 [6]. Приведем таблицу 8 регрессионного анализа результативного показателя эффективности y_1 – дохода предприятия от производственной деятельности. По таблице 8 составим полученное уравнение множественной регрессии для переменной y_1 :

$$y_1 = 308969493 - 24017849 \cdot x_1 - 3527922 \cdot x_2 + 13194944 \cdot x_3 + 12711254 \cdot x_4 - 13660204 \cdot x_5 - 7213850 \cdot x_6 - 3303245 \cdot x_7 + 2248336 \cdot x_{12} + 396496 \cdot x_{22} - 1006031 \cdot x_{32} - 3335095 \cdot x_{42} - 647249 \cdot x_{52} + 113127 \cdot x_{62} + 23027 \cdot x_{72} - 124552 \cdot x_1 \cdot x_6 - 4412 \cdot x_1 \cdot x_7 - 85573 \cdot x_2 \cdot x_6 - 7782 \cdot x_2 \cdot x_7 + 105351 \cdot x_3 \cdot x_6 - 6288 \cdot x_3 \cdot x_7 + 18406 \cdot x_4 \cdot x_6 + 136462 \cdot x_4 \cdot x_7 +$$

+88093 · $x_5 \cdot x_6$ + 172593 · $x_5 \cdot x_7$. (12) Аналогично получены уравнения регрессии для результативных показателей y_2 – y_9 . Для y_{10} уравнение регрессии не получено, так как этот показатель имеет вспомогательное значение и использован для оценки достоверности результатов имитационного моделирования. (Если требуется привести все уравнения регрессии, то их надо отредактировать в стиле (12), но из-за экономии места в 3 страницы их можно и не приводить).

Приведём полученные уравнения регрессии для показателей эффективности y_2 – y_9 .

$$y_2 = 156,347382 - 11,773815 \cdot x_1 - 1,599865 \cdot x_2 + 6,832092 \cdot x_3 + 6,629289 \cdot x_4 - 6,522563 \cdot x_5 - 3,623815 \cdot x_6 + 1,683432 \cdot x_7 + 1,124986 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,200570 \cdot x_2 \cdot x_2 - 0,502782 \cdot x_3 \cdot x_3 - 1,669131 \cdot x_4 \cdot x_4 -$$

$$0,328458 \cdot x_5 \cdot x_5 + 0,056715 \cdot x_6 \cdot x_6 + 0,011715 \cdot x_7 \cdot x_7 - 0,061650 \cdot x_1 \cdot x_6 - 0,002184 \cdot x_1 \cdot x_7 - 0,042446 \cdot x_2 \cdot x_6 - 0,003973 \cdot x_2 \cdot x_7 + 0,052306 \cdot x_3 \cdot x_6 - 0,028286 \cdot x_3 \cdot x_7 + 0,009184 \cdot x_4 \cdot x_6 + 0,068649 \cdot x_4 \cdot x_7 + 0,043750 \cdot x_5 \cdot x_6 + 0,087500 \cdot x_5 \cdot x_7.$$

$$y_3 = 933,267127 - 31,357408 \cdot x_1 - 22,984901 \cdot x_2 + 1,303885 \cdot x_3 + 0,761016 \cdot x_4 - 111,995333 \cdot x_5 - 12,526209 \cdot x_6 - 9,829594 \cdot x_7 + 1,884579 \cdot x_1 \cdot x_1 +$$

$$+ 0,446830 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,989381 \cdot x_3 \cdot x_3 + 1,742706 \cdot x_4 \cdot x_4 + 4,931001 \cdot x_5 \cdot x_5 + 0,051165 \cdot x_6 \cdot x_6 + 0,077705 \cdot x_7 \cdot x_7 + 0,467342 \cdot x_1 \cdot x_6 - 0,142362 \cdot x_1 \cdot x_7 + 0,616418 \cdot x_2 \cdot x_6 - 0,116725 \cdot x_2 \cdot x_7 - 0,171440 \cdot x_3 \cdot x_6 - 0,135147 \cdot x_3 \cdot x_7 + 0,083008 \cdot x_4 \cdot x_6 -$$

$$0,210362 \cdot x_4 \cdot x_7 + 0,388847 \cdot x_5 \cdot x_6 + 1,520272 \cdot x_5 \cdot x_7.$$

$$y_4 = 8,985075 + 0,172802 \cdot x_1 + 0,325885 \cdot x_2 - 0,105957 \cdot x_3 + 0,002527 \cdot x_4 + 0,128251 \cdot x_5 + 0,037099 \cdot x_6 + 0,191187 \cdot x_7 - 0,000893 \cdot x_1 \cdot x_1 - 0,013033 \cdot x_2 \cdot x_2 - 0,0081947 \cdot x_3 \cdot x_3 - 0,001893 \cdot x_4 \cdot x_4 + 0,048743 \cdot x_5 \cdot x_5 - 0,000273 \cdot x_6 \cdot x_6 - 0,001203 \cdot x_7 \cdot x_7 - 0,002543 \cdot x_1 \cdot x_6 - 0,000753 \cdot x_1 \cdot x_7 - 0,000673 \cdot x_2 \cdot x_6 -$$

$$0,000673 \cdot x_2 \cdot x_7 + 0,002047 \cdot x_3 \cdot x_6 + 0,000961 \cdot x_3 \cdot x_7 + 0,000374 \cdot x_4 \cdot x_6 -$$

$$0,000253 \cdot x_4 \cdot x_7 + 0,000722 \cdot x_5 \cdot x_6 - 0,005316 \cdot x_5 \cdot x_7$$

$$y_5 = 762,195108 - 17,748626 \cdot x_1 - 17,663719 \cdot x_2 + 3,289009 \cdot x_3 + 7,381713 \cdot x_4 - 148,580510 \cdot x_5 - 10,240173 \cdot x_6 -$$

$$8,320945 \cdot x_7 + 0,639846 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,180803 \cdot x_2 \cdot x_2 + 0,772749 \cdot x_3 \cdot x_3 +$$

$$+ 1,410258 \cdot x_4 \cdot x_4 + 13,582496 \cdot x_5 \cdot x_5 + 0,006975 \cdot x_6 \cdot x_6 + 0,061540 \cdot x_7 \cdot x_7 + 0,484828 \cdot x_1 \cdot x_6 - 0,103395 \cdot x_1 \cdot x_7 + 0,613552 \cdot x_2 \cdot x_6 - 0,103564 \cdot x_2 \cdot x_7 - 0,207562 \cdot x_3 \cdot x_6 - 0,108610 \cdot x_3 \cdot x_7 + 0,111778 \cdot x_4 \cdot x_6 - 0,287570 \cdot x_4 \cdot x_7 -$$

$0,308369 \cdot x_5 \cdot x_6 + 1,509181 \cdot x_5 \cdot x_7$ $y_6 = 5694,246100 - 461,705695 \cdot x_1 -$
 $60,464617 \cdot x_2 + 114,480396 \cdot x_3 + 155,717092 \cdot x_4 - 98,578245 \cdot x_5 - 70,836842 \cdot x_6 -$
 $77,710823 \cdot x_7 + 29,842120 \cdot x_1 \cdot x_1 + 2,447913 \cdot x_2 \cdot x_2 - 4,913588 \cdot x_3 \cdot x_3 -$
 $28,234311 \cdot x_4 \cdot x_4 - 10,388004 \cdot x_5 \cdot x_5 + 0,710040 \cdot x_6 \cdot x_6 + 0,570600 \cdot x_7 \cdot$
 $x_7 + 1,382476 \cdot x_1 \cdot x_6 - 0,305047 \cdot x_1 \cdot x_7 + 0,403877 \cdot x_2 \cdot x_6 + 0,057701 \cdot x_2 \cdot x_7 +$
 $+ 0,261134 \cdot x_3 \cdot x_6 - 0,801316 \cdot x_3 \cdot x_7 + 0,257280 \cdot x_4 \cdot x_6 + 0,586241 \cdot x_4 \cdot x_7 -$
 $0,285578 \cdot x_5 \cdot x_6 + 2,104559 \cdot x_5 \cdot x_7$ Таблица 8 $y_7 = 3394,220398 - 154,345339 \cdot x_1 -$
 $228,157612 \cdot x_2 + 101,711063 \cdot x_3 + 138,162389 \cdot x_4 - 156,265033 \cdot x_5 - 57,231775 \cdot x_6 -$
 $25,085644 \cdot x_7 + 15,161139 \cdot x_1 \cdot x_1 + 9,427268 \cdot x_2 \cdot x_2 - 6,671977 \cdot x_3 \cdot x_3 -$
 $25,448596 \cdot x_4 \cdot x_4 + 0,555572 \cdot x_5 \cdot x_5 + 0,568176 \cdot x_6 \cdot x_6 + 0,205481 \cdot x_7 \cdot x_7 -$
 $0,567804 \cdot x_1 \cdot x_6 - 0,251042 \cdot x_1 \cdot x_7 + 1,307769 \cdot x_2 \cdot x_6 - 0,303927 \cdot x_2 \cdot x_7 + 0,264413 \cdot x_3 \cdot$
 $x_6 -$
 $0,356279 \cdot x_3 \cdot x_7 + 0,399183 \cdot x_4 \cdot x_6 + 0,476395 \cdot x_4 \cdot x_7 + 0,796834 \cdot x_5 \cdot x_6 + 1,834222 \cdot x_5 \cdot x_7$
 $y_8 = 2266,007305 - 42,782574 \cdot x_1 - 24,777844 \cdot x_2 - 43,723830 \cdot x_3 + 25,425024 \cdot x_4 -$
 $59,814855 \cdot x_5 - 23,164248 \cdot x_6 - 35,683193 \cdot x_7 + 4,402784 \cdot x_1 \cdot x_1 + 1,928305 \cdot x_2 \cdot x_2 -$
 $0,640466 \cdot x_3 \cdot x_3 - 8,871883 \cdot x_4 \cdot x_4 + 1,248126 \cdot x_5 \cdot x_5 + 0,239616 \cdot x_6 \cdot x_6 +$
 $+ 0,246001 \cdot x_7 \cdot x_7 - 0,662781 \cdot x_1 \cdot x_6 + 0,167640 \cdot x_1 \cdot x_7 -$
 $0,400214 \cdot x_2 \cdot x_6 + 0,088987 \cdot x_2 \cdot x_7 + 1,440923 \cdot x_3 \cdot x_6 -$
 $0,323429 \cdot x_3 \cdot x_7 + 0,038364 \cdot x_4 \cdot x_6 + 0,483661 \cdot x_4 \cdot x_7 +$
 $+ 0,785634 \cdot x_5 \cdot x_6 + 0,43529 \cdot x_5 \cdot x_7$ $y_9 = 1213,945166 - 57,625819 \cdot x_1 -$
 $0,247138 \cdot x_2 + 27,096790 \cdot x_3 + 49,419897 \cdot x_4 - 25,799627 \cdot x_5 - 13,522394 \cdot x_6 -$
 $23,825768 \cdot x_7 + 5,103495 \cdot x_1 \cdot x_1 + 0,673893 \cdot x_2 \cdot x_2 - 1,915651 \cdot x_3 \cdot x_3 -$
 $11,269358 \cdot x_4 \cdot x_4 - 2,580098 \cdot x_5 \cdot x_5 + 0,198039 \cdot x_6 \cdot x_6 + 0,167539 \cdot x_7 \cdot x_7 -$
 $0,304913 \cdot x_1 \cdot x_6 + 0,062349 \cdot x_1 \cdot x_7 - 0,198104 \cdot x_2 \cdot x_6 -$
 $0,046669 \cdot x_2 \cdot x_7 + 0,262540 \cdot x_3 \cdot x_6 -$
 $0,162064 \cdot x_3 \cdot x_7 + 0,030474 \cdot x_4 \cdot x_6 + 0,408936 \cdot x_4 \cdot x_7 +$
 $+ 0,134303 \cdot x_5 \cdot x_6 + 0,399522 \cdot x_5 \cdot x_7$

Показатели качества проведённого регрессионного анализа для результативных показателей приведены в таблице 9. По анализу таблицы 9 можно сделать выводы о корректности построенных уравнений регрессии для $y_1 - y_9$, так как они удовлетворяют требованиям (2) – (6). Вычисленные значения коэффициентов множественной детерминации имеют высокий уровень и показывают, что более 99 % изменения ; удалось объяснить полученными математическими зависимостями. По уравнениям регрессии произведем анализ влияния каждого фактора на результативные показатели по их удельным весам и коэффициентам эластичности. Коэффициент эластичности i -го фактора показывает, на сколько процентов изменится результативный показатель эффективности при изменении i -го фактора на один процент. В качественном плане знак плюс говорит о положительном влиянии фактора, то есть увеличение фактора приводит к увеличению результативного показателя, а знак минус указывает на отрицательное влияние фактора, то есть при увеличении фактора уменьшается результативный показатель.

Вычисленные значения удельных весов и коэффициентов эластичности факторов результативного показателя y_1 приведены в табл. 10. Таблица 9

Код	Среднее	Ошибка	Среднее/ ошибка	F	R	y_1
52046340	4294000	0,082503	8,6964	0,991128	y_2	32,95745
2,807	0,085170	8,7268	0,991285	y_3	85,8218	6,263
0,072977	5,0188	0,999544	y_4	0,583404	0,054125	0,092774
8,2818	0,998865	y_5	33,0304	3,154	0,095488	4,5860
0,993915	y_6	552,2866	43,726	0,079173	14,412	0,996382
y_7	495,1332	42,253	0,085337	28,263	0,994167	y_8
219,8709	15,373	0,069918	21,537	0,997375	y_9	164,1584
16,123	0,098216	7,6141	0,994747	Таблица 10		

Коды факторов Удельные веса Коэффициенты эластичности x_1 0,045958804 - 0,091120617 x_2 0,091120617 -0,132126489 x_3 0,146559258 0,546031383 x_4 0,132126489 0,396827067 x_5 0,156031383 0,446559258 x_6 0,589933360 - 0,889933360 x_7 0,406827067 0,723762758

По вычисленным значениям удельных весов влияния факторов на изменение результативного показателя эффективности y_1 , построена круговая диаграмма, представленная для на рис.1. Рис. 1 - Диаграмма влияния факторов на изменение результативного показателя эффективности y_1 , построенная по значениям удельных весов Оценка степени влияния факторов на результативный показатель эффективности по коэффициентам эластичности, представлена в виде гистограммы на рисунке 2. Рис. 2 - Гистограмма влияния факторов на изменение результативного показателя эффективности y_1 , построенная по коэффициентам эластичности

Полученная диаграммы (рис.2) позволяет сделать вывод, что сильное отрицательное влияние на доход предприятия оказывает x_6 - время между поступлением заказов. Чем меньше время между поступлением заказов, тем больше доход предприятия и это не противоречит здравому смыслу. Положительное влияние оказывают факторы x_3 , x_4 , x_5 и x_7 . Чем больше плановое время выполнения работ (x_7), тем больше доход, так как затраты на штрафы за просрочку работу сводятся к минимуму. Чем больше количество рабочих x_3 , x_4 , x_5 тем больше доход предприятия. Количество рабочих на вентиляционных и сантехнических работах x_1 и x_2 можно на немного уменьшить, так как их влияние на прибыль - отрицательное.

6. Вывод формул для вычисления оптимальных значений количества работников на операциях производственного процесса Решим задачу оптимизации (7), (8) как задачу нахождения максимального значения результативного показателя эффективности y_1 - дохода предприятия от производственного процесса, за вычетом расходов на покрытие штрафов за несвоевременно выполненные работы и на заработную плату работников в рублях, за счет выбора оптимального количества рабочих на производственных операциях и контролёров x_i , $i =$ при ограничениях на другие результативные показатели эффективности и факторы. Ограничения на показатели эффективности заданы так, что фактически не превышают лучшие результаты, достигнутые предприятием за последнее время, и представляют собой минимальные и

максимальные из ранее достигнутых значений. Для оптимизации выбран метод касательных и использована имеющаяся в ППП Excel соответствующая стандартная процедура оптимизации [2]. Фрагмент полученных оптимальных значений пяти факторов и результивных показателей эффективности у1 представлен в таблице 11. Таблица 11 №№ Исх. х1 Опт. х1 Исх. х2 Опт. х2 Исх. х3 Опт. х3 Исх. х4 Опт. х4 Исх. х5 Опт. х5 1 7 8 9 12 7 6 4 3 2 1 2 5 5 5 5 4 6 2 3 1 1 3 8 8 5 5 4 6 2 3 1 1 . . . 46 7 8 9 12 7 6 4 3 2 1 47 7 8 9 12 7 6 4 3 2 1

Оптимизируемый фактор х5 (количество контролеров) получился, равен 1. Это можно объяснить тем, что у контролеров сравнительно мало операций и на производстве вполне хватает и одного человека. По результатам оптимизации проведем регрессионный анализ с помощью стандартной процедуры программы Statistica 8.0 [6] и выведем формулы для вычисления значений оптимизируемых факторов по объективным факторам. Для примера приведём таблицу 12 регрессионного анализа оптимизируемого фактора х1. Таблица 12 В результате регрессионного анализа было получено следующее уравнение для вычисления х1опт: $x_{1opt} = -28,636076 + 0,33038 \cdot x_6 + 0,925063 \cdot x_7 - 0,006608 \cdot x_6^2 - 0,006608 \cdot x_7^2$.

(13) Аналогично х1опт получены расчётные формулы для вычисления оптимальных значений других оптимизируемых факторов.

$x_{2opt} = -73,484177 + 0,770886 \cdot x_6 + 2,158481 \cdot x_7 - 0,015418 \cdot x_6^2 - 0,015418 \cdot x_7^2$. (14)

$x_{3opt} = 5,664757849 + 0,000000271 \cdot x_6 + 0,000000686 \cdot x_7 - 0,000000005 \cdot x_6^2 - 0,000000005 \cdot x_7^2$. (15)

$x_{4opt} = 3,174577187 + 0,000000061 \cdot x_6 + 0,00000021 \cdot x_7 - 0,000000001 \cdot x_6^2 - 0,000000001 \cdot x_7^2$. (16)

$x_{5opt} = -26,274293 - 0,188831 \cdot x_6 + 0,860097 \cdot x_7 + 0,003835 \cdot x_6^2 - 0,006165 \cdot x_7^2$. (17)

Полученные формулы (13) – (17) пригодны для вычисления конкретного количества работников в зависимости от значений объективных факторов. Вычислим оптимальные значения для трёх различных сценариев. Для наименее загруженного режима: $x_1=5$; $x_2=5$; $x_3=6$; $x_4=4$; $x_5=1$; $x_6=35$ дней; $x_7=60$ дней; $y_1=51199865$ руб. Для режима со средней загрузкой: $x_1=6$; $x_2=10$; $x_3=6$; $x_4=4$; $x_5=1$; $x_6=25$ дней; $x_7=70$ дней; $y_1=56298777$ руб. Для режима с максимальной загрузкой: $x_1=8$; $x_2=12$; $x_3=6$; $x_4=5$; $x_5=1$; $x_6=15$ дней; $x_7=80$ дней; $y_1=102624160$ руб. Заключение В данной работе проведено исследование производственных процессов изготовления и монтажа вентиляционного и сантехнического оборудования. Используя построенную математическую модель, мы максимизировали прибыль за счет определения такого количества рабочих, которое является оптимальным и позволяет выполнять работы в установленные сроки, с учетом объема и сложности работ. Внедрение разработанной модели повысит эффективность функционирования предприятия за счет выработки оптимальных управленческих решений. Одна из особенностей данной работы состоит в том, что авторами предложена методология и инструментальный комплекс, доступный и понятный для практического применения на любых производственных предприятиях. Проведенное

исследование подтверждает необходимость составления имитационных моделей, проведения статистического исследования работы предприятия и оптимизации его деятельности. В работе получены следующие основные результаты: 1. Разработана блок-схема алгоритма и имитационная программная модель производственных процессов изготовления и монтажа оборудования. 2. Построен стратегический план проведения имитационных экспериментов, который позволяет вычислить все коэффициенты степенного полинома, включая коэффициенты как при самих факторах, так и при всех сочетаний факторов между собой в виде их произведений. 3. Проведены имитационные эксперименты по стратегическому плану и составлены таблицы результатов для их анализа с целью разработки эффективных управленческих решений. 4. Проведена оценка достоверности результатов. Доверительная вероятность по 47 вариантам эксперимента выше 0,9. 5. Построена математическая модель процесса изготовления и монтажа оборудования, состоящая из совокупности уравнений регрессии, которые отображают взаимное влияние факторов на показатели эффективности процесса. Вычислены удельные веса и коэффициенты эластичности, показывающие степень влияния факторов на показатели эффективности. 6. Получены формулы для вычисления оптимального количества рабочих и контролёров производственных процессов, пригодные для практического применения на конкретном исследованном предприятии. 7. Предложенная методика пригодна для исследования широкого круга производственных процессов с дискретным характером производства.