

УДК 658.51.012

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА

О.М. Пигнастый¹, В.Д. Ходусов²

¹НПФ Технология

61170, Харьков, ул. Котлова 10/12 к.16

E-mail: pom7@bk.ru

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина Физико-технический факультет

61108, Харьков, пр. Курчатова 31

E-mail: khodusov@pht.univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 12 апреля 2009 г.

В фазовом технологическом пространстве определено состояние производственной системы. Технология производства задана нормативной технологической траекторией. Технологический процесс на каждой технологической операции представлен технологическими факторами с нормативными параметрами производства и допустимыми отклонениями от них. С использованием целевой функции производственно-технической системы записано выражение для расчета длительности производственного цикла партии базовых продуктов. Получены условия синхронизации технологического процесса для непрерывного производственного процесса с членение периода производственного цикла на фазы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: синергетика, базовый продукт, микроскопическое описание, функция Лагранжа, уравнения Эйлера, производственный цикл, условия синхронизации производственного процесса.

TO THE QUESTION OF USE OF THE STATISTICAL THEORY FOR CALCULATION OF THE PRODUCTION CYCLE

О.М. Pignasty¹, V.D. Khodusov²

¹SPF Technology, street Kotlova 10/12 k.16, Ukraine, 61052, Kharkov

²V.N. Karazin Kharkov National University, Dept. of Physics and Technology, 31 Kurchatov, 61108 Kharkov, Ukraine

In phase technological space the condition of industrial system is certain. The "know-how" is set by a normative technological trajectory. Technological process on each technological operation is presented by technology factors with normative parameters of manufacture and maximum deviations from them. With use of criterion function of technological system expression for calculation of duration of a production cycle of a party of base products is written down. Conditions of synchronization of technological process for continuous production about partitioning the period of a production cycle on phases are received.

KEY WORDS: synergetics, base product, microscopic description, distribution function, engineering-production function, generating function, balances equation, production cycle, the terms of the synchronization process

ДО ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ СТАТИСТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВИРОБНИЧОГО ЦИКЛУ

О.М. Пігнастий¹, В.Д. Ходусов²

¹НПФ Технологія, вул. Котлова 10/12 к.16, 61170, Харків

²Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна Фізико-технічний факультет, пр. Курчатова 31, 61108, Харків

У фазовому технологічному просторі визначено стан виробничої системи. Технологія виробництва задана нормативною технологічною траєкторією. Технологічний процес на кожній технологічній операції представлений технологічними чинниками з нормативними параметрами виробництва і допустимими відхиленнями від них. З використанням цільової функції виробничо-технічної системи записано вираз для розрахунку тривалості виробничого циклу партії базових продуктів. Здобуті умови синхронізації технологічного процесу для безперервного виробничого процесу з розчленування періоду виробничого циклу на фази.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: синергетика, базовий продукт, мікроскопічний опис, функція Лагранжа, рівняння Ейлера, виробничий цикл, умови синхронізації виробничого процесу.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современное предприятие является сложной производственно-технической системой. Одним из основных календарно-плановых нормативов производственно-технической системы является продолжительность производственного цикла изготовления предмета труда (базового продукта) T_d [1]. Нормативную продолжительность производственного цикла изготовления базового продукта можно рассчитать либо на основе статистических данных, либо на основе сетевых моделей. Указанные методы имеют свои достоинства и недостатки. Так, например, одним из недостатков статистических методов является то, что они не учитывают особенности производственных участков и характера обрабатываемых продуктов. В свою очередь сетевые методы невозможно практически реализовать для технологических процессов, состоящих из большого числа технологических операций. Эти недостатки можно устранить, используя метод имитационного моделирования. Однако, наличие в производственном процессе большого количества базовых продуктов делает затруднительным применение этого метода. Для подобных производственно-технических систем

альтернативным методом расчета является метод, основанный на статистической теории систем с большим количеством элементов [2]. Целью настоящей работы является расчет производственного цикла этим методом.

РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОДУКЦИИ

Функционирование производственно-технической системы может быть представлено в виде стохастического процесса, в ходе которого элементы производственно-технической системы (базовые продукты или предметы труда) переходят из одного состояния в другое [3,4]. Состояние производственно-технической системы определяется как состояния всех базовых продуктов. Состояние j -го базового продукта в момент времени t может быть описано микроскопическими величинами S_j, μ_j в технологическом фазовом пространстве (S, μ) [2], где S_j (грн) и $\mu_j = \frac{dS_j}{dt}$ (грн/час) соответственно сумма общих затрат и затрат в единицу времени, перенесенные производственной системой на j -й базовый продукт ($0 < j \leq N$). Микроскопические величины S_j и μ_j определяют технологические траектории базовых продуктов $S_j = S_j(t)$ и $\mu_j = \mu_j(t)$ в окрестности центральной технологической траектории (S_ψ, μ_ψ) [5], которая является решением уравнения

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial J}{\partial \mu_\psi} - \frac{\partial J}{\partial S_\psi} = 0, \quad (1)$$

где J - целевая функция производственно-технической системы [5].

Центральная технологическая траектория представляет собой траекторию движения базового продукта со значениями микроскопических величин $S_\psi = S_\psi(t)$ и $\mu_\psi = \mu_\psi(t)$, равными нормативным технологическим параметрам процесса изготовления базового продукта. Для упрощения будем полагать, что j -й базовый продукт обрабатывается на каждой технологической операции с незначительными отклонениями от нормативных параметров обработки, заданных технологией производства, а именно

$$\left| \frac{S_j(t)}{S_\psi(t)} - 1 \right| \ll 1, \quad \left| \frac{\mu_j(t)}{\mu_\psi(t)} - 1 \right| \ll 1. \quad (2)$$

Тогда целевая функция производственно-технической системы J примет вид [5]:

$$J = J_{\psi 0}(S_\psi, \mu_\psi) = \frac{1}{2} \cdot \left(\mu_\psi - \alpha_{\psi r}(S_\psi) \cdot \frac{\vartheta_{1\psi}(S_\psi)}{\vartheta_0(S_\psi)} - \alpha_{\psi c}(S_\psi) \cdot k_{\psi c}(S_\psi) \right)^2, \quad (3)$$

где $\vartheta_{1\psi}(S_\psi)$ (шт/час) - производительность технологического оборудования; $\vartheta_0(S_\psi)$ (шт/грн) - плотность межоперационных заделов; $k_{\psi c}(S_\psi)$ (грн/час) - средняя интенсивность переноса условно-постоянных затрат от оборудования на базовые продукты; $\alpha_{\psi r}(S_\psi)$, $\alpha_{\psi c}(S_\psi)$ коэффициенты пропорциональности между интенсивностью передачи затрат производственным оборудованием на элементы производственной системы и интенсивностью потребления затрат базовыми продуктами в ходе их технологической обработки. Будем полагать, что все ресурсы от технологического оборудования переносятся на базовые продукты полностью (таким образом, отсутствует нарушение технологии и не допускается брак).

Будем полагать также, что условно-постоянные затраты, необходимые для функционирования производственно-технической системы и поддержания ее в работоспособном состоянии, много меньше условно-переменных затрат

$$\frac{\alpha_{\psi c}(S_\psi) \cdot k_{\psi c}(S_\psi)}{\alpha_{\psi r}(S_\psi) \cdot \frac{\vartheta_{1\psi}}{\vartheta_0}} \rightarrow 0. \quad (4)$$

С учетом допущений (4) целевая функция J производственно-технической системы может быть представлена в форме [5]:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \left(\mu_\psi - \alpha_{\psi r}(S_\psi) \cdot \frac{\vartheta_{1\psi}(S_\psi)}{\vartheta_0(S_\psi)} \right)^2. \quad (5)$$

Так как время изменения технологического процесса существенно превышает время изготовления базового продукта (т.е. считаем, что на протяжении производственного цикла технологический процесс мало меняется), то будем полагать, что целевая функция J производственно-технической системы не зависит явно от времени t и следовательно [2]

$$\mu_{\psi} \cdot \frac{\partial J(S_{\psi}, \mu_{\psi})}{\partial \mu_{\psi}} - J(S_{\psi}, \mu_{\psi}) = \frac{1}{2} \cdot \mu_{\psi}^2 - \frac{1}{2} \cdot \left(\alpha_{\psi'}(S_{\psi}) \cdot \frac{\vartheta_{1\psi}(S_{\psi})}{\vartheta_0(S_{\psi})} \right)^2 = H, \quad H = \text{const}, \quad (6)$$

откуда

$$\mu_{\psi} = \frac{dS_{\psi}}{dt} = \sqrt{2 \cdot \left(H + \frac{1}{2} \cdot \left(\alpha_{\psi'}(S_{\psi}) \cdot \frac{\vartheta_{1\psi}(S_{\psi})}{\vartheta_0(S_{\psi})} \right)^2 \right)}, \quad (7)$$

и

$$dt = \frac{dS_{\psi}}{\sqrt{2 \cdot \left(H + \frac{1}{2} \cdot \left(\alpha_{\psi'}(S_{\psi}) \cdot \frac{\vartheta_{1\psi}(S_{\psi})}{\vartheta_0(S_{\psi})} \right)^2 \right)}}. \quad (8)$$

Константа интегрирования определяется начальными условиями технологического процесса обработки базовых продуктов

$$\mu_{\psi}|_{t=0} = \alpha_{\psi'}(S_{\psi}) \cdot \frac{\vartheta_{1\psi}(S_{\psi})}{\vartheta_0(S_{\psi})} \Big|_{t=0}, \quad S_{\psi}|_{t=0} = 0. \quad (9)$$

Считаем, что при изготовлении базового продукта учитываются только прямые затраты на всех операциях технологической цепочки изготовления базового продукта. Таким образом, можно положить в уравнении (6) $H=0$. Проинтегрировав вдоль всей технологической цепочки производственного процесса изготовления базового продукта, найдем длительность производственного цикла T_d

$$T_d = \int_0^{T_d} dt = \int_0^{S_d} \frac{\vartheta_0(S_{\psi}) \cdot dS_{\psi}}{\alpha_{\psi'}(S_{\psi}) \cdot \vartheta_{1\psi}(S_{\psi})}. \quad (10)$$

Заменяя процедуру интегрирования в выражении для расчета длительности производственного цикла T_d (10) суммированием по всем технологическим операциям $m=1..M$ (где M -общее количество технологических операций в технологическом процессе)

$$T_d \approx \sum_{m=1}^M \int_{S_{\psi m}}^{S_{\psi m+1}} \frac{\vartheta_0(S_{\psi}) \cdot dS_{\psi}}{\alpha_{\psi'}(S_{\psi}) \cdot \vartheta_{1\psi}(S_{\psi})} \approx \sum_{m=1}^M \frac{\vartheta_0(S_{\psi m}) \cdot \Delta S_{\psi m}}{\alpha_{\psi'}(S_{\psi m}) \cdot \vartheta_{1\psi}(S_{\psi m})} \quad (11)$$

и используя выражение для плотности межоперационных заделов

$$\vartheta_0(S_{\psi m}) \approx \frac{N_{\psi m}}{\Delta S_{\psi m}} \quad (12)$$

получаем

$$T_d \approx \sum_{m=1}^M \frac{\Delta S_{\psi m}}{\alpha_{\psi'}(S_{\psi m})} \cdot \left(\frac{\vartheta_0(S_{\psi m})}{\vartheta_{1\psi}(S_{\psi m})} \right) \approx \sum_{m=1}^M \frac{1}{\alpha_{\psi'}(S_{\psi m})} \cdot \frac{N_{\psi m}}{\vartheta_{1\psi}(S_{\psi m})}. \quad (13)$$

Через $N_{\psi m}$ обозначена величина межоперационных заделов между $(m-1)$ и m -ой технологической операцией. Известно [1], что для технологической операции производительность технологического

оборудования $\vartheta_{l\psi}(S_{\psi m})$ пропорциональна числу рабочих мест c_m , параллельно занятых на выполнении одной технологической операции, и обратно пропорциональна среднему операционному времени $\Delta\tau_{\psi O m}$

$$\vartheta_{l\psi}(S_{\psi m}) \approx \frac{c_m}{\Delta\tau_{\psi O m}}. \quad (14)$$

Для центральной технологической траектории в случае серийного или массового производства справедливо соотношение

$$\left(\frac{\Delta\tau_{\psi O m}}{c_m} + \Delta\tau_{\psi C m} \right) \approx N_{\psi m} \cdot \frac{\Delta\tau_{\psi O m}}{c_m}, \quad (15)$$

где $\Delta\tau_{\psi C m}$ время пребывания базового продукта в межоперационном заделе между $(m-1)$ и m -ой технологическими операциями. Подставляя (14) и (15) в равенство (13), получаем формулу для расчета длительности производственного цикла T_d технологического процесса:

$$T_d \approx \sum_{m=1}^M \frac{\frac{\Delta\tau_{\psi O m}}{c_m} + \Delta\tau_{\psi C m}}{\alpha_{\psi V}(S_{\psi m})} \approx \sum_{m=1}^{N_m} \frac{\left(\frac{\Delta\tau_{\psi O m}}{c_m} + \Delta\tau_{\psi C m} \right)}{K_{S_m} \cdot q_m} \cdot K_{нар m}, \quad (16)$$

где $K_{S_m} \left[\frac{1}{сутки} \right]$ - число смен в сутках, $q_m [сутки]$ - длительность рабочей смены, выраженной в единицах измерения - сутки, $K_{нар m}$ - коэффициент параллельности выполнения $(m-1)$ и m -ой технологической операции [1, 7]. Коэффициент пропорциональности $\alpha_{\psi V}(S_{\psi m})$ в выражении для целевой функции производственно-технической системы (3) несет следующий технологический смысл

$$\alpha_{\psi V m} = \frac{K_{S_m} \cdot q_m}{K_{нар m}}. \quad (17)$$

Таким образом, путем интегрирования уравнений движения производственно-технической системы с учетом допущений (2) и (4) получено выражение для производственного цикла T_d технологического процесса, которое совпадает с общепринятым выражением для расчета календарно-плановых нормативов производственно-технических систем [1, 7] при пренебрежении временем естественных процессов $\Delta\tau_{\psi ест m}$.

УСЛОВИЯ СТАЦИОНАРНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Для технологического процесса с серийным или массовым выпуском продукции количество базовых продуктов, находящихся в межоперационном заделе много больше единицы $N_{\psi m} \gg 1$. Принимая во внимание, что

$$\frac{\Delta\tau_{\psi O m}}{c_m} \ll \Delta\tau_{\psi C m}, \quad (18)$$

получим

$$\Delta\tau_{\psi C m} \approx N_{\psi m} \cdot \frac{\Delta\tau_{\psi O m}}{c_m}, \quad (19)$$

и, как следствие

$$T_d \approx \sum_{m=1}^{N_m} \frac{\Delta\tau_{\psi C m}}{s_m \cdot q_m} \cdot K_{нар m} \approx \sum_{m=1}^{N_m} \frac{\Delta\tau_{\psi O m}}{s_m \cdot q_m} \cdot \frac{N_{\psi m}}{c_m} K_{нар m}. \quad (20)$$

Таким образом, длительность производственного цикла технологического процесса T_d (20) определяется межоперационным временем $\Delta\tau_{\psi C m}$ (18) пребывания базового продукта на m -ой технологической операции.

Заметим, что межоперационное время для технологического процесса с серийным или массовым выпуском продукции (19) является наиболее сложным элементом в расчете длительности производственного цикла T_d , устанавливается без должного обоснования [1, стр.170]. Последнее обстоятельство связано с тем, что количество базовых продуктов $N_{\psi m}$, находящихся в межоперационном заделе на m -ой технологической операции постоянно меняется [8]. Особенно это характерно для серийного производства. Изменение количества базовых продуктов, находящихся в межоперационном заделе, может быть представлено через производительность работы технологического оборудования (15)

$$\frac{\Delta N_{\psi m}(t)}{\Delta t} = \vartheta_{i\psi (m-1)} \cdot \Theta_{(m-1)}(t, t_{1(m-1)}, t_{2(m-1)}) - \vartheta_{i\psi m} \cdot \Theta_m(t, t_{1m}, t_{2m}), \tag{21}$$

где

$$\vartheta_{i\psi m} = \vartheta_{i\psi} (S_{\psi m}), \quad \frac{d\vartheta_{i\psi m}}{dt} \approx 0, \quad m = 1, N_m, \quad (0 \leq t_{1m} < t_{2m} \leq T_d)$$

с начальными условиями для количества базовых продуктов, находящихся в межоперационном заделе m -ой технологической операции

$$N_{\psi m}(0) = N_{\psi m0}. \tag{22}$$

Мы полагаем, что за время производственного цикла изготовления продукта, производительность работы технологического оборудования не изменяется во времени и соответствует паспортным данным работы оборудования. Функция $\Theta_m(t, t_{1m}, t_{2m})$ определяет членение периода производственного цикла T_d на фазы [1, с.206] с временем начала t_{1m} и окончания t_{2m} технологической обработки базового продукта на m -ой технологической операции:

$$\begin{aligned} \Theta_m(t, t_{1m}, t_{2m}) &= 1 \quad \text{при} \quad t_{1m} \leq t \leq t_{2m} \\ \Theta_m(t, t_{1m}, t_{2m}) &= 0 \quad \text{при} \quad 0 \leq t < t_{1m} \quad \text{или} \quad t_{2m} < t \leq T_d. \end{aligned} \tag{23}$$

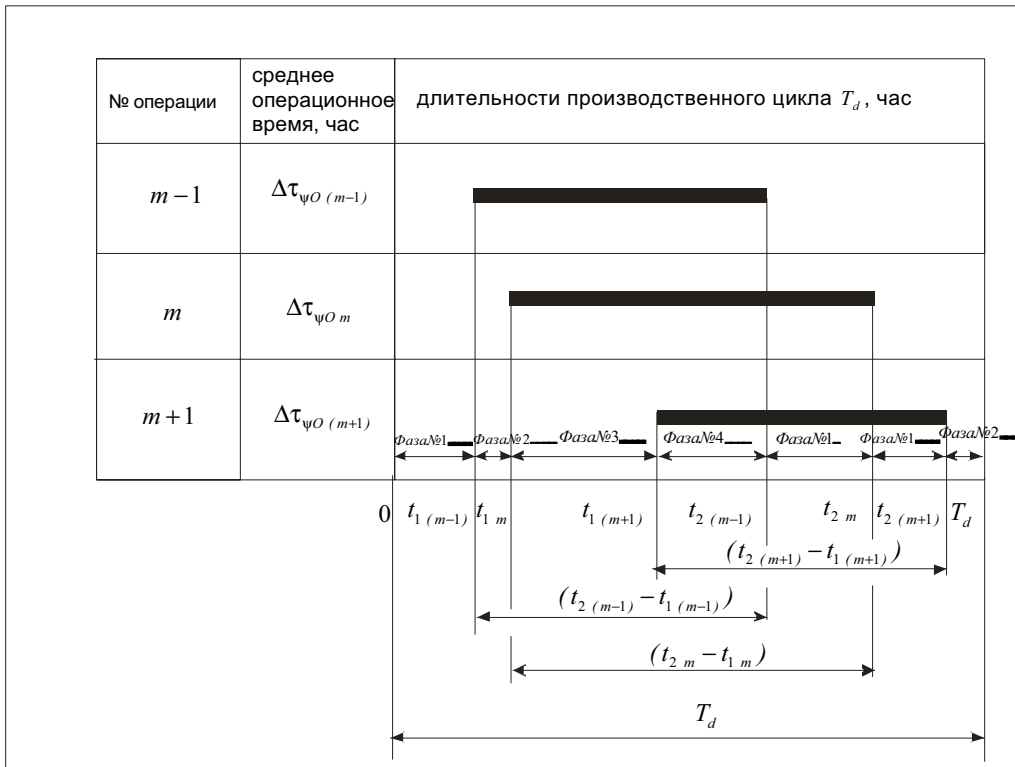


Рис.1. Разделение производственного цикла на фазы при расчете межоперационных заделов базовых продуктов

Добавив систему уравнений (21) с начальными условиями (22) к выражению для определения длительность

производственного цикла T_d (20), получаем полную систему уравнений расчета длительности производственного цикла T_d

$$T_d \approx \sum_{m=1}^M \frac{N_{\psi m}}{\alpha_{\psi m} \cdot \vartheta_{1\psi m}}, \quad m = 1, N_m, \quad N_{\psi m}(0) = N_{\psi m0}, \quad (24)$$

$$\frac{dN_{\psi m}(t)}{dt} = \vartheta_{1\psi(m-1)} \cdot \Theta_{(m-1)}(t, t_{1(m-1)}, t_{2(m-1)}) - \vartheta_{1\psi m} \cdot \Theta_m(t, t_{1m}, t_{2m}).$$

Система уравнений (24) дает условия стационарности производственного процесса

$$\frac{dN_{\psi m}(t)}{dt} = \vartheta_{1\psi(m-1)} \cdot \Theta_{(m-1)}(t, t_{1(m-1)}, t_{2(m-1)}) - \vartheta_{1\psi m} \cdot \Theta_m(t, t_{1m}, t_{2m}) \approx 0, \quad (25)$$

которые могут быть выражены в виде равенств

$$N_{\psi m}(t) = const$$

или

$$\vartheta_{1\psi(m-1)} \cdot \int_0^{T_d} \Theta_{(m-1)}(t, t_{1(m-1)}, t_{2(m-1)}) dt - \vartheta_{1\psi m} \cdot \int_0^{T_d} \Theta_m(t, t_{1m}, t_{2m}) dt \approx 0. \quad (26)$$

Произведем интегрирование (26) по периоду производственного цикла T_d . Учитывая, что характеристики работы производственного оборудования $\vartheta_{1\psi(m-1)}$ и $\vartheta_{1\psi m}$ за период производственного цикла не меняются со временем, используем свойства функции $\Theta_m(t, t_{1m}, t_{2m})$ (23), получим приблизительное равенство

$$\vartheta_{1\psi(m-1)} \cdot (t_{2(m-1)} - t_{1(m-1)}) = \vartheta_{1\psi m} \cdot (t_{2m} - t_{1m}). \quad (27)$$

Условия стационарности производственного процесса (условия синхронизации производственного процесса) (27) можно выразить через основное операционное время. Принимая во внимание соотношение (15), условие стационарности представим в виде

$$\frac{c_{(m-1)}}{\Delta\tau_{\psi O(m-1)}} \cdot (t_{2(m-1)} - t_{1(m-1)}) = \frac{c_m}{\Delta\tau_{\psi O m}} \cdot (t_{2m} - t_{1m}). \quad (28)$$

Полученная формула (28) носит общий характер. В частности для технологического процесса с непрерывной работой оборудования (когда отсутствуют запланированные простои оборудования для синхронизации работы технологической линии)

$$(t_{2(m-1)} - t_{1(m-1)}) = (t_{2m} - t_{1m}) = T_d, \quad (29)$$

условие стационарности (или условие синхронизации) можно получить из формулы (28) в более привычном для управления производством виде [1, с.192, формула (XXXIV-5)]

$$\frac{\Delta\tau_{\psi O 1}}{c_1} = \frac{\Delta\tau_{\psi O 2}}{c_2} = \frac{\Delta\tau_{\psi O 3}}{c_3} = \dots = \frac{\Delta\tau_{\psi O m}}{c_m} = \dots = \frac{\Delta\tau_{\psi O N_m}}{c_m}. \quad (30)$$

Условие стационарности (30) используется для расчета работы поточных технологических линий. Для того, чтобы работа поточной линии осуществлялась бесперебойно в заданном темпе, необходимо насыщение всех стадий производственного процесса заделами, уровень которых должен быть строго регламентирован (26).

Значение операционных заделов должно быть постоянно ($N_{\psi m}(t) \approx const$) (26) в течение всего

производственного цикла, что позволяет без особых трудностей определить длительность производственного цикла T_d (13). Величина межоперационных заделов $N_{\psi m}$ определяется ограничениями, связанными с особенностями технологического процесса, размерами транспортных партий, страховыми заделами и т.д. Условие стационарности (30) в общем случае построения технологического процесса производственных систем трудно реализуемо. В производственной практике используется методика членение периода

производственного цикла T_d на фазы [1, с.206].

ВЫВОДЫ

С использованием целевой функции партии базовых продуктов производственно-технической системы выражение для расчета длительности производственного цикла T_d (16) получено в аналитическом виде с учетом предположений:

- 1) все ресурсы от технологического оборудования переносятся на базовые продукты полностью (отсутствует нецелевое или непроизводительное использование ресурсов, брак);
- 2) условно-постоянные затраты, необходимые для функционирования производственно-технической системы много меньше условно-переменных затрат;
- 3) время естественных процессов $\Delta\tau_{\text{ест } m}$ много меньше длительности производственного цикла T_d .

Показано, что данного выражения, записанного с учетом указанных выше допущений, вытекают, как частные случаи, общепринятые выражения для расчета календарно-плановых нормативов производственно-технических систем [1, 7].

Используя методику расчета длительности производственного цикла T_d (17) для технологического процесса с серийным или массовым выпуском продукции (количество базовых продуктов, находящихся в межоперационном заделе, много больше единицы $N_{\psi m} \gg 1$) получены условия синхронизации непрерывного производственного процесса и производственного процесса с членением периода производственного цикла T_d на фазы. Условия синхронизации, полученные в настоящей работе в общем виде, обобщают общепринятое выражение [1, с.192, формула (XXXIV-5)].

Материалы статьи проработаны в Харьковском национальном университете им.В.Н. Каразина на совместных семинарах кафедр «Экономической кибернетики и прикладной экономики», «Теоретической ядерной физики» и Производственного Отдела НПФ Технология ООО в рамках гранта №14-08 Фонда фундаментальных исследований ХНУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Летенко В.А., Родионов Б.Н. Организация, планирование и управление машиностроительным предприятием. Часть 2, Внутризаводское планирование. - М.: Высшая школа, 1979. – 232 с.
2. Демуцкий В.П., Пигнастая В.С., Пигнастый О.М. Стохастическое описание экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции //Доповіди Національної академії наук України. - 2005. –№7. – С.66-71.
3. Занг З.В.-Б. Синергетическая экономика. – М.: Мир, 1999. - 335с.
4. Прыткин Б.В. Техничко-экономический анализ производства. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. - 399с.
5. Пигнастый О.М. О построении целевой функции производственной системы //Доповіди Національної академії наук України. - 2007. –№5 – С.50-55.
6. Интрилигатор М. Математические методы оптимизации и экономическая теория. – М.: Прогресс, 1975. - 605 с.
7. Савицкая Г.В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия. - Мн: Новое знание, 2002. – 704 с.
8. Демуцкий В.П., Пигнастый О.М., Ходусов В.Д., Азаренкова М.Н. Использование методов статистической физики для исследования экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции //Вісник ХНУ, серія фізична «Ядра, частинки, поля». - 2005. – №710 – С.128-134.
9. Демуцкий В.П., Пигнастый О.М., Ходусов В.Д., Азаренкова М.Н. Применение методов статистической физики для описания стационарного функционирования производственных систем //Вісник ХНУ, серія фізична «Ядра, частинки, поля». - 2006. –№732– С.79-86.