

УДК 62-112.83

**ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГИБКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ СБОРКИ СИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ НА МЕЛИТОПОЛЬСКОМ МОТОРНОМ ЗАВОДЕ****В. М. Липка, В. Я. Копп, Ю. Л. Рапачский**

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 99053, Украина. E-mail: u.l.rapatskiy@mail.ru

При автоматизированной сборке силовых агрегатов для легковых автомобилей «Сенс», «Ланос», «Forza», «Vida» на Мелитопольском моторном заводе (МемЗ, г. Мелитополь, Украина) острой проблемой является недостаточная надежность сборочного процесса, что в современных условиях приводит к снижению эффективности производства. На МемЗ в сборочном цехе было выполнено экспериментальное исследование и построена полумарковская математическая модель процесса функционирования гибкой автоматизированной линии сборки силовых агрегатов. По результатам исследований было предложено изменить структуру гибкой автоматизированной линии сборки и использовать часть емкости трех межоперационных накопителей в качестве ремонтных ячеек для устранения брака, возникающего, во многих случаях, при сборке резьбовых соединений в силовых агрегатах. Математическое моделирование в среде Maple показало, что предлагаемая структура гибкой автоматизированной линии сборки обеспечивает повышение её производительности на 2,8 % и позволяет без существенных затрат дополнительно выпустить до 2000 силовых агрегатов в год.

**Ключевые слова:** автоматизированная сборка, силовой агрегат, математическое моделирование.

**ВИБІР І ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ГНУЧКОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ЛІНІЇ СКЛАДАННЯ СИЛОВИХ АГРЕГАТІВ НА МЕЛІТОПОЛЬСЬКОМУ МОТОРНОМУ ЗАВОДІ****В. М. Липка, В. Я. Копп, Ю. Л. Рапачський**

Севастопольський національний технічний університет

вул. Університетська, 33, м. Севастополь, 99053, Україна. E-mail: u.l.rapatskiy@mail.ru

При автоматизованому складанні силових агрегатів для легкових автомобілів «Сенс», «Ланос», «Forza», «Vida» на Мелітопольському моторному заводі (МемЗ, м. Мелітополь, Україна) гострою проблемою є недостатня надійність складального процесу, що у сучасних умовах призводить до зниження ефективності виробництва. На МемЗ у складальному цеху було проведено експериментальне дослідження та побудована напівмарковська математична модель процесу функціонування гнучкої автоматизованої лінії складання силових агрегатів. За результатами досліджень було запропоновано змінити структуру гнучкої автоматизованої лінії складання і використати частину місткості трьох міжопераційних накопичувачів як ремонтних комірок для усунення браку, що виникає у багатьох випадках, під час складання різьбових з'єднань у силових агрегатах. Математичне моделювання у середовищі Maple показало, що запропонована структура гнучкої автоматизованої лінії складання забезпечує підвищення її продуктивності на 2,8 %, що дозволяє без істотних витрат додатково виробити до 2000 силових агрегатів на рік.

**Ключові слова:** автоматизоване складання, силовий агрегат, математичне моделювання.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Сборочное производство характеризуется большой сложностью, высокой стохастичностью и недостаточной надежностью [1–6], что в современных условиях неизбежно приводит к необходимости изыскания резервов для повышения его эффективности [2–6].

На Производственном предприятии (ПП) Мелитопольскому моторному заводу (МемЗ) в сборочном цехе было выполнено экспериментальное исследование [2, 3] и математическое моделирование процесса функционирования гибкой автоматизированной линии сборки силовых агрегатов (ГАЛС) для легковых автомобилей «Сенс», «Ланос», «Forza», «Vida».

Цель работы – синтез рациональной структуры ГАЛС, позволяющей без существенных материальных затрат повысить надежность сборочного процесса и фактическую производительность линии.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Исходная структура ГАЛС представлена на рис. 1. Основные характеристики исследуемой ГАЛС: длина 180 м, ширина 5 м, проектная производительность после перехода на выпуск двигателей МемЗ–

307, МемЗ–317 45 СА в час (150 000 в год) при плановой нормативной загрузке 75 % и двухсменной работе, 75000 в год – при односменной.

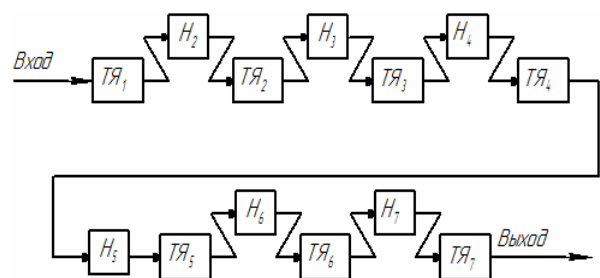


Рисунок 1 – Исходная структура однопоточной ГАЛС СА

ГАЛС состоит из семи сборочных технологических ячеек (ТЯ), на каждой из которых предусмотрен выборочный пооперационный технический контроль. Гибкая однопоточная связь между всеми ТЯ осуществляется посредством шести межоперационных накопителей  $H_2 \dots H_7$ , что обеспечивает асин-

хронний режим роботи обладнання. На ТЯ<sub>1</sub> здійснюється комплектування і попередня збірка блоку циліндрів, на ТЯ<sub>2</sub> мийка і сушка блоку, на ТЯ<sub>3</sub> – контроль герметичності і отбраковка негодних блоків, на ТЯ<sub>4</sub> – збірка блоку з коленчатим валом, на ТЯ<sub>5</sub> – збірка блоку з шатунно-поршневою групою, на ТЯ<sub>6</sub> – остаточна збірка, регулювання і комплектування двигача електрообладнанням, системою впрыску і іншими вузлами, на ТЯ<sub>7</sub> – установка коробки передач і стартера.

Основні матеріальні потоки організовані в ГАЛС по вертикально-замкнутій двурівневій схемі: по верхньому рівню на ТЯ подаються пристосування-спутники з збираними силовими агрегатами (СА), а по нижньому – проходить возврат пустих спутників к началу лінії. Переміщення базових деталей – блоків циліндрів – здійснюється порталним манипулятором “Пирин” (Болгарія). Структура і склад транспортно-накопительної і загрузочної системи однопоточної ГАЛС дозволяють при необхідності локально змінювати розташування існуючих ТЯ і встрайовувати нове обладнання, що забезпечує її структурно-організаційну і технологічну гнучкість. Управління всієї однопоточної ГАЛС здійснюється з допомогою промислової комп’ютерної мережі, побудованої на базі ІВМ – сумісних ПЕВМ на верхніх рівнях ієрархії і програмуємих контролерів фірми “Siemens” (Німеччина), що забезпечують роботу окремих ТЯ і Н на нижніх ієрархічних рівнях. Дані про продукцію, випущену на ГАЛС, з урахуванням варіантів конструктивних виконань окремих СА автомобілів і інформація про всі випадки браку накопичуються і зчитуються в ПЕВМ.

В ході виробничого експерименту було запропоновано організувати матеріальні потоки на однопоточної ГАЛС по схемі, зображеної на рис. 2.

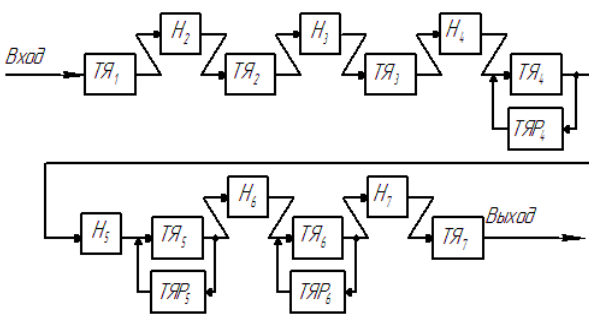


Рисунок 2 – Структура однопоточної ГАЛС збірки СА з трьома ремонтними ТЯ: ТЯ<sub>4</sub>...ТЯ<sub>6</sub>

В процесі збірки СА на окремих операціях може виникати потреба в возвраті до 10–15 % від загальної кількості СА після проміжного контролю для частинної розбирання і усунення виявленого браку різьбових з’єдинень (РС). В частності, якщо при установці в ТЯ<sub>6</sub> головки циліндрів на блок циліндрів в процесі затяжки РС буде виявлено недопустимо мале момент затяжки хоча

було одне з болтів або із-за виникнення натяга між різьбовими деталями (РД) затяжка буде автоматично зупинена до закінчення свинчування, або виникне якийсь інший дефект в збираним з’єдиненні, СА цілесобразно зняти з ГАЛС для виправлення браку. Аналогічні ситуації можуть виникати при затяжці інших відповідних різьбових з’єдинень: на ТЯ<sub>5</sub> при монтажі кришок коренних підшипників коленчатого вала і нижніх головок шатунов, на ТЯ<sub>7</sub> в процесі установки маховика і т.д. Представляється найбільш раціональним рішенням для виправлення браку в окремих одиницях продукції не зупиняти всю ГАЛС, ритм роботи якої відповідає випуску одного СА в середньому за 1,35 хвилини, а використовувати особливості конструктивного виконання ГАЛС, що дозволяє частину об’єму кожного з накопичувачів Н<sub>4</sub>, Н<sub>5</sub>, Н<sub>6</sub> задіювати як ремонтні технологічні ячейки (ТЯР<sub>4</sub>, ТЯР<sub>5</sub>, ТЯР<sub>6</sub>) для швидкого виправлення браку в СА, знятих з виходу відповідних ячеек – ТЯ<sub>4</sub>, ТЯ<sub>5</sub>, ТЯ<sub>6</sub>.

Для кількісної оцінки ефективності запропонованої організації матеріальних потоків на ГАЛС було використано метод побудови ітераційних полумарковських математических моделей, розглянутий в [7–9]. В [9] запропоновано полумарковські моделі, що дозволяють описати процес функціонування ГАЛС, побудованої по схемі, зображеної на рис. 2, а також існуючої структури з ремонтними ячейками ТЯР, встановленими паралельно кожній з основних ТЯ. В моделі [7] відсутнє обмеження на кількість  $m$  возвратів об’єктів виробництва на ТЯР і знову на ТЯ, що на практиці нецілесобразно, для умов МеМЗ пропонується обмежити  $m$  не більше 3. Таким чином, в нинішній час в вітчизняних і зарубіжних джерелах не існує готової математическої моделі для описання ГАЛС запропонованої структури, зображеної на рис. 2. Для дослідження ГАЛС, зображеної на рис. 2, цілесобразно побудувати полумарковську математическу модель на основі запропонованих в [7–9], але з урахуванням специфіки досліджуваного об’єкта. Довжина технологічних операцій на ячейках ТЯ<sub>1</sub>, ТЯ<sub>2</sub>, ...ТЯ<sub>n</sub>, будемо далі називати часами обслуговування СА. Функції розподілення (ФР) випадкових величин (СВ)  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ , відповідних часам обслуговування на ячейках ТЯ<sub>1</sub>, ТЯ<sub>2</sub>, ...ТЯ<sub>n</sub>, позначимо  $F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t)$ . Вероятність виходу годної продукції з ТЯ позначимо  $P$ .

Замінивши всі ячейки, охоплені зворотними зв’язками, т.е. ТЯР<sub>4</sub>, ТЯР<sub>5</sub>, ТЯР<sub>6</sub>, еквівалентними елементами, для яких ФР часу обслуговування продукції  $K_k(t)$ , ( $k = 1, n$ ).

Поскольку довжини повторного обслуговування СА на ТЯР<sub>4</sub>, ТЯР<sub>5</sub>, ТЯР<sub>6</sub> відрізняються друг від друга, то для еквівалентної заміни применимо вираження [9]

$$K_1(t) = pF(t) + p \sum_{m=1}^{\infty} (1-p)^m F^{(*)m}(t).$$

Тогда ФР времени  $\varphi_n(t)$  между событиями в выходном потоке ГАЛС имеет вид:

$$\begin{aligned} \overline{\varphi}_n(t) &= \sum_{k=1}^n \overline{K}_k^{\Sigma}(t) - \sum_{1 \leq k_1 < k_2 \leq n} \overline{K}_{k_1}^{\Sigma}(t) \overline{K}_{k_2}^{\Sigma}(t) + \\ &+ \sum_{1 \leq k_1 < k_2 < k_3 \leq n} \overline{K}_{k_1}^{\Sigma}(t) \overline{K}_{k_2}^{\Sigma}(t) \overline{K}_{k_3}^{\Sigma}(t) - \dots \\ &- \dots + (-1)^{n-1} \overline{K}_1^{\Sigma} \overline{K}_2^{\Sigma}(t) \dots \overline{K}_n^{\Sigma}(t). \end{aligned}$$

причем

$$\overline{K}_k^{\Sigma}(t) = 1 - K_k^{\Sigma}(t), \quad \overline{\varphi}(t) = 1 - \varphi(t).$$

В предлагаемой структуре ГАЛС, когда число повторных обслуживаний на  $TЯ_k$  ограничено и не может превышать значения  $m=3$ , времена повторных обслуживаний различны и описываются ФР  $F_k^g(t)$ , где  $k = (\overline{1, n})$  – номер ТЯ в ГАЛС, а  $g = (\overline{1, m})$  – номер повторного обслуживания.

Для того, чтобы определить ФР времени, затрачиваемого на один, два либо три повторных обслуживания, необходимо построить полумарковский процесс в дискретном фазовом пространстве с использованием графа состояний, представленного на рис. 3.

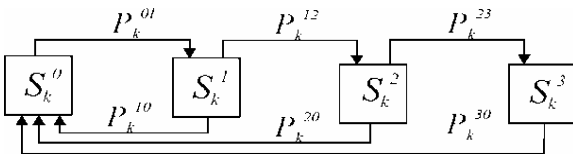


Рисунок 3 – Граф состояний k-й ТЯ при количестве повторных обслуживаний  $0 \leq m \leq 3$

Считаем, что процесс марковского восстановления задается двухкомпонентной цепью Маркова  $(S_n, \theta_n; n \geq 0)$  с вероятностями переходов:

$$P\{S_{n+1} = r, \theta_{n+1} \leq t / S_n = k\} = Q_{kr}(t).$$

В данном случае компоненты  $S_n$  и  $\theta_n$  условно независимы, т.е. выполняется равенство

$$\begin{aligned} P\{S_{n+1} = r, \theta_{n+1} \leq t / S_n = k\} &= \\ &= P\{S_{n+1} = r / S_n = k\} \cdot P\{\theta_{n+1} \leq t / S_n = k\}. \end{aligned}$$

Тогда компоненты полумарковской матрицы для дискретного фазового пространства состояний  $E = (\overline{1, n})$  равны:

$$Q_{kr}(t) = P_{kr} G_k(t), \quad k, r \in E,$$

где  $\sum_{r \in E} Q_{kr}(t) = P\{\theta_{n+1} \leq t / S_n = k\} = G_k(t), k \in E$ .

Определим стационарное распределение  $\pi = (\pi_k^g; g \in E)$  ПМП в фазовом пространстве  $E$  по формулам, приведенным в [7, 9]:

$$\pi_k^g = \rho_k^g M_k^g / M; \quad (1)$$

$$M = \sum_{g \in E} \rho_k^g M_k^g, \quad g \in E,$$

где  $\rho = (\rho_k^g; g \in E)$  – стационарное распределение вложенной цепи Маркова;  $M_k^g$  – средние времена пребывания в состояниях полумарковского процесса.

Величины  $\rho_k^g$  определяются решением системы уравнений [7, 9]:

$$\rho_k^g = \sum_{r \in E} \rho_r P_{rk}, \quad (2)$$

причем  $\sum_g \rho_k^g = 1$ .

Состояние графа:

$S_k^0$  – мгновенное состояние, соответствующее моменту окончания обслуживания и выдачи продукции;  $S_k^1$  – первое обслуживание с ФР  $F_k^1(t)$  и математическим ожиданием  $M_k^1$ ;  $S_k^2$  – второе обслуживание с ФР  $F_k^2(t)$  и математическим ожиданием  $M_k^2$ ;  $S_k^3$  – третье обслуживание с ФР  $F_k^3(t)$  и математическим ожиданием  $M_k^3$ .

Составим на основе (2) систему уравнений для определения  $\rho_k^g, g = (\overline{0, m})$ :

$$\begin{cases} \rho_k^0 = \rho_k^1 \cdot P_k^{10} + \rho_k^2 \cdot P_k^{20} + \rho_k^3 \cdot P_k^{30} + \dots \\ + \rho_k^g \cdot P_k^{g0} + \dots + \rho_k^m \cdot P_k^{m0} = \sum_{i=1}^m \rho_k^i \cdot P_k^{i0}; \\ \rho_k^1 = \rho_k^0 \cdot P_k^{01} \\ \rho_k^2 = \rho_k^1 \cdot P_k^{12} = \rho_k^0 \cdot P_k^{01} \cdot P_k^{12}; \\ \rho_k^3 = \rho_k^2 \cdot P_k^{23} = \rho_k^0 \cdot P_k^{01} \cdot P_k^{12} \cdot P_k^{23}. \end{cases} \quad (3)$$

Условие нормировки

$$\sum_{g=1}^m \rho_k^g = 1. \quad (4)$$

В случае, если вероятности выхода годной продукции при повторных обслуживаниях одинаковы, то:

$$\begin{cases} P_k^{10} = P_k^{20} = P_k^{30} = \dots = P_k^{g0} = \dots = P_k^{m-1,0} = p_k; \\ P_k^{m0} = 1; \\ P_k^{01} = 1; \\ P_k^{12} = P_k^{23} = (1 - p_k). \end{cases} \quad (5)$$

Подставив все значения для  $\rho_k^g, g = (\overline{0, m})$  из (3) в условие нормировки (4) получим

$$\rho_k^0 (1 + P_k^{01} + P_k^{01} \cdot P_k^{12} + P_k^{01} \cdot P_k^{12} \cdot P_k^{23}) = 1,$$

откуда

$$\rho_k^0 = (1 + P_k^{01} + P_k^{01} \cdot P_k^{12} + P_k^{01} \cdot P_k^{12} \cdot P_k^{23})^{-1}. \quad (6)$$

Подставив выражения (6) в (3) и (5) окончательно имеем:

$$\begin{cases} \rho_k^0 = [2 + (1 - p_k) + (1 - p_k)^2 + \dots + (1 - p_k)^{m-1}]^{-1}; \\ \rho_k^1 = \rho_k^0; \\ \rho_k^2 = \rho_k^0 \cdot (1 - p_k); \\ \rho_k^3 = \rho_k^0 \cdot (1 - p_k)^2. \end{cases} \quad (7)$$

На основе (1) и (7) определяем стационарное распределение полумарковского процесса:

$$M = \sum_{i=0}^m \rho_k^i \cdot M_k^i = \sum_{i=0}^m [\rho_k^0 (1 - p)^{i-1}] \cdot M_k^i + \rho_k^0 \cdot M_k^0; \quad (8)$$

$$\pi_k^i = \frac{\rho_k^i \cdot M_k^i}{M}$$

Задачу определения ФР времени обслуживания на ТЯ с возвратом продукции на ТЯР на повторное обслуживание, как и в [9], будем решать, используя формулу полной вероятности.

Для этого примем следующие гипотезы:

$H_1$  – выполняется первое обслуживание;

$H_2$  – выполняется второе обслуживание

$H_3$  – Выполняется третье обслуживание.

Вероятности этих гипотез с учетом (8) равны:

$$\begin{cases} P(H_1) = \pi_k^1 = \frac{\rho_k^1 \cdot M_k^1}{M}; \\ P(H_2) = \pi_k^2 = \frac{\rho_k^2 \cdot M_k^2}{M}; \\ P(H_3) = \pi_k^3 = \frac{\rho_k^3 \cdot M_k^3}{M}. \end{cases} \quad (9)$$

Введем событие  $A$ , под которым будем понимать обслуживание продукции на ячейке. Условные вероятности события  $A$  при выполнении гипотез  $H_1, H_2, H_3$  равны

$$\begin{cases} P(A / H_1) = p\{t_1 < t\} = F_{k,1}(t); \\ P(A / H_2) = p\{t_1 + t_2 < t\} = F_{k,2}(t) = F_{k,1,2}^{(*)2}(t); \\ P(A / H_3) = p\{t_1 + t_2 + t_3 < t\} = \\ = F_{k,3}(t) = F_{k,1,2,3}^{(*)3}(t). \end{cases} \quad (10)$$

где  $(*)m$  – обозначение операции  $m$  – кратной свертки;  $t_i, (i = \overline{1, m})$  – случайные величины, являющиеся временами повторных обслуживаний.

ФР времени между заявками в прореженном потоке событий определяется по формуле полной вероятности с учетом (9), (10):

$$K_k(t) = P(A) = \sum_{g=1}^m P(H_g)P(A / H_g) = \sum_{g=1}^m \pi_k^g \cdot F_{k,1,\dots,g}^{(*)g}(t) \quad (11)$$

В модели нужно учесть, что некоторые СА после  $m$  обслуживаний остаются бракованными и снимаются с ГАЛС для полной разборки. Вероятность того, что СА после  $m$  обслуживаний на одной из ТЯ будет исправным, равна [1]:

$$p_k^{zod} = p \sum_{g=1}^m (1 - p)^{g-1} = 1 - (1 - p)^m \quad (12)$$

Соответственно вероятность брака СА определяется из выражения:

$$p_k^{6p} = 1 - p_k^{zod} = (1 - p)^m$$

Далее необходимо осуществить разрежение потока продукции, выходящего с ТЯ<sub>k</sub>, что позволит окончательно получить ФР  $K_k^\Sigma(t)$  времени между событиями в потоке годной продукции, выходящей с  $k$ -ой ячейки, охваченной обратной связью. Для этого необходимо в формулу

$$K_1(t) = pF(t) + p \sum_{m=1}^{\infty} (1 - p)^m F^{(*)m}(t)$$

подставить значения величин  $K_k(t)$  и  $p_k^{zod}$  из выражений (11) и (12):

$$K_k^\Sigma(t) = p_k^{zod} K_k(t) + p_k^{zod} \sum_{i=1}^{\infty} (1 - p_k^{zod})^i K_k^{(*)i}(t) \quad (13)$$

Выражение (13) позволяет ячейку, охваченную обратной связью, заменять эквивалентным простейшим элементом – ячейкой с двумя возможными состояниями: отказовым и рабочим.

Подставляя (13) в (11), окончательно получаем ФР  $\overline{\varphi}_n(t)$  времени обслуживания единицы продукции (ФР времени между событиями в выходном потоке).

При моделировании СВ  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , соответствующие временам обслуживания на ТЯ<sub>1</sub>, ТЯ<sub>2</sub>, ТЯ<sub>3</sub> считались распределенными по обобщенным законам Эрланга второго порядка с ФР  $F_1(t), F_2(t), F_3(t)$  и математическими ожиданиями  $m\alpha_1, m\alpha_2, m\alpha_3$  соответственно.

При заданных математических ожиданиях СВ  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  их дисперсии выбирались из соотношения:

$$D(\alpha_i) = \frac{[m\alpha_i]^2}{1,5}, (i = 1, 2, 3).$$

После такой замены структура ГАЛС приводится к нормальному виду и для её моделирования возможно применение модели, приведенной в [9].

Результаты моделирования участка ГАЛС, содержащей три ТЯ и три ТЯР представлены в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати моделювання участка ГАЛС, содержащего ТЯ<sub>4</sub>...ТЯ<sub>6</sub> и установленные параллельно им ТЯР<sub>4</sub>...ТЯР<sub>6</sub>

<i>p</i>	$\lambda_{k_{01}}$ <i>l</i> / <i>ч</i>	$\mu_{k_{10}}$ <i>l</i> / <i>ч</i>	<i>t</i> <sub>4</sub> <i>ч</i>	<i>t</i> <sub>5</sub> <i>ч</i>	<i>t</i> <sub>6</sub> <i>ч</i>	<i>m</i> <sub><i>k</i></sub>	<i>K</i> <sub><i>e</i></sub>	$\Pi_{мин}$ <i>дем</i> / <i>ч</i>	<i>L</i> <sub>5</sub> <i>дет</i>	<i>L</i> <sub>6</sub> <i>дет</i>
0,9	4	0,2	0,017	0,018	0,02	20	0,906	43,1	14,67	11,04
		0,25	0,017	0,018	0,02	20	0,885	42,1	15,73	11,16
		0,33	0,017	0,018	0,02	20	0,851	40,5	15,00	10,80
	2	0,2	0,017	0,018	0,02	20	0,808	38,4	15,36	10,16
		0,25	0,017	0,018	0,02	20	0,768	36,5	15,58	9,79
		0,33	0,017	0,018	0,02	20	0,708	33,7	15,87	9,30
0,8	4	0,2	0,017	0,018	0,02	20	0,907	37,1	14,65	11,4
		0,25	0,017	0,018	0,02	20	0,886	36,2	15,70	10,88
		0,33	0,017	0,018	0,02	20	0,853	34,9	14,96	10,82
	2	0,2	0,017	0,018	0,02	20	0,813	33,2	15,31	10,27
		0,25	0,017	0,018	0,02	20	0,774	31,6	15,52	9,85
		0,33	0,017	0,018	0,02	20	0,715	29,2	15,7	9,24

Максимальное количество обслуживаний равно трем, а математические ожидания времен повторных обслуживаний приняты меньше предыдущих на 5 %.

При разработке модели ГАЛС с обратной связью, оперирующей с ФР экспоненциального вида, необходимо использовать полумарковский процесс (ПМП), построенный в дискретном фазовом пространстве при создании модели, рассмотренной выше, и найти математические ожидания времен затрачиваемых на *m* повторных обслуживаний каждой ячейкой. Для этого используются вероятности  $\pi_k^i$ , (*i* = 1, *m*) стационарного распределения ПМП. Предполагается, что в общем случае математические ожидания каждого из повторных обслуживаний известны и отличаются друг от друга. Тогда математическое ожидание времени, затрачиваемого на *m* повторных обслуживаний, будет определяться из выражения:

$$\bar{t}_{k\phi} = \sum_{i=1}^m \pi_k^i \cdot M_k^i,$$

где  $\bar{t}_{k\phi}$  – математические ожидания времени, затрачиваемого на *m* повторных обслуживаний *k*-ой ячейкой;  $\pi_k^i$  – вероятности, определяемые по формуле (8);  $M_k^i$  – математическое ожидание *i*-го обслуживания.

Так как после *m* обслуживаний какая-то доля СА остается бракованной и покидает систему, необходимо разредить поток, выходящий с ТЯ. Вероятность того, что продукция после *m* обслуживаний будет годной, определяется формулой (12). Поэтому в модель ГАЛС нормального вида, для использования ее при моделировании линии с ОС с ограниченным числом повторных обслуживаний, необходимо внести следующие изменения: в качестве времен обслуживания на ТЯ<sub>*k*</sub> (*k* = 1, *n*) использовать полученные математические ожидания времен, затрачиваемых на *m* повторных обслуживаний *k*-ми ячейками ТЯ<sub>*k*</sub>; для определения  $\lambda_k$  с учетом разреджения потока применять формулу:

$$\lambda_k = \frac{1}{t_{k-1max} \mu_{k-1,20} + \lambda_{k-1,02}} \cdot (1 - (1 - p)^m) \cdot \prod_{j=2}^{k-1} \bar{p}_j.$$

Для построения модели ГАЛС необходимо эквивалентно в смысле производительности заменить структуру, состоящую из параллельно соединенных ячеек ТЯ<sub>*k*</sub> и ТЯР<sub>*k*</sub> (например, ТЯ<sub>5</sub> и ТЯР<sub>5</sub> на рис. 2), одним простейшим элементом.

Указанная замена производится аналогично тому, как это было сделано при эквивалентной замене ячейки, охваченной обратной связью. Для того, чтобы определить ФР времени, затрачиваемого на *m* повторных обслуживаний, включая обслуживание на ТЯР, необходимо построить полумарковский процесс в дискретном фазовом пространстве с использованием приведенного ранее графа состояний. В данном случае меняются только ФР времен пребывания системы в состояниях графа, что ведет к изменению математических ожиданий времен пребывания системы в состояниях графа, а, значит, и стационарного распределения ПМП. Кроме этого, меняются и условные вероятности появления события *A*, под которым понимается обслуживание продукции на ячейке, при выполнении введенных ранее гипотез *H*<sub>1</sub>, ..., *H*<sub>*n*</sub>. Обозначим СВ  $t_i^k$ , (*i* = 1, *m*) – время повторного обслуживания продукции на ТЯ<sub>*k*</sub>; СВ  $t_j^k$ , (*j* = *i* - 1; *j* = 1, *m* - 1) – времена повторного обслуживания продукции на ТЯ<sub>*k*</sub>'.

Время обслуживания продукции на ячейке, охваченной обратной связью, в которую входит ТЯР, в данном случае состоит из ряда циклов, длительность  $T_k^g$  которых в общем случае равна:

$$T_1^k = t_1^k; T_2^k = t_2^k + t_1^k; T_3^k = t_3^k + t_2^k; \dots; T_g^k = t_g^k + t_{g-1}^k; \dots; T_m^k = t_m^k + t_{m-1}^k.$$

В рассматриваемом случае ФР СВ  $T_g^k$  определяются как ФР суммы независимых СВ (через свертку).

Таким образом, в предыдущей модели вместо СВ времен  $t_i^k$  берутся СВ  $T_g^k$  с соответствующими ФР. На этом описание рассматриваемой модели закончено.

В случае, если изменяется вероятность выхода годной продукции при повторном обслуживании на ТЯ<sub>*i*</sub>, то дискретная случайная величина принимает значения  $\bar{t}_i, 2\bar{t}_i, 3\bar{t}_i, \dots, k \cdot \bar{t}_i, \dots, m \cdot \bar{t}_i$ , которым соответствуют вероятности  $p_1, p_2(1 - p_1), \dots, p_k \prod_{k=1}^m (1 - p_{k-1})$ . В данном выражении  $p_0 = 0$ , т.е. случай, когда обслуживание не производится, здесь не рассматривается.

Система уравнений для определения  $\rho_k^g$ ,  $g = (0, m)$  и условие нормировки аналогичны (3) и (4) соответственно.



Для данного случая вероятности переходов равны:

$$\begin{cases} P_k^{10} = p_1; \\ P_k^{20} = p_2; \\ P_k^{s0} = p_g; \\ P_k^{m-1,0} = p_{m-1}; \\ P_k^m = 1; \\ P_k^{01} = 1; \\ P_k^{12} = (1 - p_1); \\ P_k^{23} = (1 - p_2). \end{cases} \quad (14)$$

Подставляя выражения для вероятностей переходов из (14) в (3) и решая полученную систему, определяем стационарное распределение ВЦМ  $\rho_k^g, g = (\overline{0, m})$ . Ввиду громоздкости данные выражения не приводятся.

Далее по формуле (1) определяем стационарное распределение ПМП.

Задачу определения ФР времени обслуживания на ячейке с возвратом продукции на повторное обслуживание, как и ранее, будем решать, используя формулу полной вероятности. Гипотезы такие же, как и в предыдущем случае. Их вероятности вычисляются по формуле (9). Условные вероятности события  $A$ , под которым понимается обслуживание продукции на ячейке, определяются из выражения (10).

ФР времени между заявками в прореженном по-

токе событий определяется по формуле полной вероятности (11) с учетом (9) и (10).

В модели нужно учесть, что какая-то доля продукции после  $m$  обслуживаний остается бракованной и покидает систему. Вероятность того, что продукция после  $m$  обслуживаний будет годной,  $p_k^{zod}$  равна сумме первых  $m$  членов ряда  $p_1, p_2(1 - p_1),$

$$p_3(1 - p_1)(1 - p_2), \dots, p_k \prod_{k=1}^m (1 - p_{k-1}):$$

$$p_k^{zod} = \sum_{k=1}^m p_k \prod_{k=1}^m (1 - p_{k-1}).$$

Далее, как и в предыдущей модели, необходимо осуществить с вероятностью  $p_k^{zod}$  разрежение потока продукции, выходящего с  $TЯ_k$  и определить ФР  $K_k^\Sigma(t)$  времени между событиями в потоке годной продукции, выходящей с  $k$ -ой ячейки, охваченной обратной связью, используя выражение

$$G_2(t) = p\varphi(t) + p \sum_{n=1}^{\infty} (1 - p)^n \varphi^{*(n)}(t).$$

В табл. 2. показаны фотографии ТЯ и ТЯР, в составе ГАЛС СА, сделанные в ходе производственного эксперимента на МеМЗ.

Таблица 2 — ТЯ и ТЯР в составе ГАЛС СА на ПП «МеМЗ»

Пост установки коленчатого вала — ТЯ <sub>4</sub>	Пост комплектования шатунно-поршневой группы в ТЯ <sub>5</sub>	Блоки цилиндров в ремонтной ячейке ТЯР <sub>6</sub>	Выявленный брак резьбового отверстия (ТЯР <sub>6</sub> )
			
Пост сборки шатуна с поршнем в ТЯ <sub>5</sub>	Пост сборки блока цилиндров (ТЯ <sub>5</sub> )	Пост приемо-сдаточных испытаний СА после ГАЛС	Накопитель готовых СА с ТЯ <sub>7</sub>
			

**ВЫВОДЫ.** Анализ результатов расчетов по приведенной выше модели в среде Maple показал, что

фактическая производительность ГАЛС СА за счет рационального введения ремонтных технологиче-

ских ячеек возрастает на 2,8 %, что позволяет своевременно выпустить в течение года дополнительно до 2000 единиц готовой продукции.

Направление дальнейших исследований связано с уточнением предложенной математической модели и повышением надежности сборочного оборудования, применяемого при сборке СА на ГАЛС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технологическая подготовка гибких автоматизированных сборочно-монтажных производств машиностроении / Н.П. Меткин, М.С. Лапин, В.И. Гольц. – Л.: Машиностроение, 1986. – 192 с.

2. Анализ результатов производственного эксперимента по контролю качества резьбовых деталей, применяемых для сборки силовых агрегатов автомобилей / В.М. Липка, В.Я. Копп, Ю.Л. Рапачкий // Вестник СевНТУ. Сер. Машиноприборостроение и транспорт: сбор. науч. трудов. – Севастополь, 2013. – Вып. 140. – С. 58–62.

3. Повышение качества и надежности резьбовых соединений в условиях серийного производства сило-

вых агрегатов для легковых автомобилей / В.М. Липка, В.Я. Копп, Ю.Л. Рапачкий // Вестник СевНТУ. Сер. Машиноприборостроение и транспорт: сбор. науч. трудов. – Севастополь, 2013. – Вып. 139. – С. 154–160.

4. Design of Flexible Production Systems – Methodologies and Tools. By T. Tolio. – Berlin: Springer, 2009.

5. Hu S.J., et al. (2011), Assembly system design and operations for product variety. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, doi:10.1016/j.cirp.2011.05.004

6. Mehmet Savsar (2010). Reliability Modeling and Analysis of Flexible Manufacturing Cells, *Future Manufacturing Systems*, Tauseef Aized (Ed.), ISBN: 978-953-307-128-2.

7. Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Ольшанская И.В., Песчанский А.И. Моделирование автоматизированных линий. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – 212 с.

8. Моделирование переналаживаемых автоматизированных производственных систем / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский и др. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 232 с.

9. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем: монография. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 700 с.

#### SELECTION AND RESEARCH OF RATIONAL STRUCTURE OF THE FLEXIBLE AUTOMATED ASSEMBLY LINE OF POWER UNITS AT MELITOPOL MOTOR PLANT

V. Lipka, V. Kopp, Ju. Rapatskiy

Sevastopol National Technical University

vul. Univrsitetskaya 33, Sevastopol 99053, Ukraine. E-mail: u.l.rapatskiy@mail.ru

During automatized assembling of power aggregates (PA) for passenger cars “Sens”, “Lanos”, “Forza”, and “Vida” at Melitopol Motor Plant (MeMP, Melitopol, Ukraine) the urgent problem is insufficient reliability of assembling process, that nowadays leads to decline in production efficiency. At MeMP, new experimental research was conducted and semi-Markov mathematical model of functioning of the flexible automatized assembling-line (FAAL) of power aggregates (PA) was constructed. Based on the research results, it was proposed to change the structure of FAAL so to use a part of capacity of three interoperation storage devices as repair cells to remove the wastes appearing, in many cases, at assembling of threading connections. Mathematical modeling using the Maple environment revealed that offered option of the FAAL’s structure would increase its productivity by 2,8 % allowing, without any material expenditure, for production of 2000 power aggregates (PA) per year in addition. Further researches imply clarification of semi-Markov mathematical model and increase of reliability of assembling equipment using FAAL.

**Key words:** automated assembly, power unit, mathematical modeling.

#### REFERENCES

1. Metkyn, N.P., Lapin, M.S., Golts, V.I. (1986), *Technologicheskaya podgotovka gybkykh avtomatyzirovannykh sborochno-montazhnykh proizvodstv v mashynostroenyi* [Technological preparation of flexible automated assembly and installation in production engineering], Mashynostroenyie, Leningrad, USSR.

2. Lipka, V.M., Kopp, V.Ya., Rapatskiy, Yu.L. (2013), “Analysis of the results of the experiment production quality control of threaded parts used to build power car aggregates”, *Journal of Sevastopol National University, Series: Mechanical Instrumentation and Transport*, iss. 140, pp. 58–62.

3. Lipka, V.M., Kopp, V.Ya., Rapatskiy, Yu.L. (2013), “Improving the quality and reliability of threaded connections in serial production of power aggregates for cars”, *Journal of Sevastopol National University, Series: Mechanical Instrumentation and Transport*, iss. 139, pp. 154–160.

4. (2009), *Design of flexible production systems – methodologies and tools*. Ed. by T. Tolio. Springer, Berlin, Germany.

5. Hu S.J. et al. (2011), *Assembly system design and operations for product variety. CIRP Annals - Manufacturing Technology*, doi:10.1016/j.cirp.2011.05.004

6. Mehmet Savsar (2010), “Reliability Modeling and Analysis of Flexible Manufacturing Cells”, *Future Manufacturing Systems*, Ed. by Tauseef Aized, ISBN: 978-953-307-128-2. InTech, DOI: 10.5772/10239.

7. Kopp, V.Ya. et al. (2009), *Modelyrovanye avtomatyzirovannykh liniy* [Modeling of the automated lines], monograph, Sevastopol National Technical University, Sevastopol, Ukraine.

8. Kopp V.Ya. et al. (2007), *Modelyrovanye perenalazhyvaemykh avtomatyzirovannykh proizvodstvennykh sistem* [Modeling of re-adjusted automated production systems], monograph, Sevastopol National Technical University, Sevastopol, Ukraine.

9. Копп, V.Ya. (2012), *Modelirovaniye avtomatyzirovannykh proizvodstvennykh system* [Modeling of the

automated production systems], monograph, Sevastopol National Technical University, Sevastopol, Ukraine.  
Стаття надійшла 20.01.2014.