

# Применение CAD/CAE-систем для проектирования компоновок гибких производственных систем для механообработки корпусных деталей

К.С. Кульга, А.А. Карюгин, А.Ю. Головизин, Р.Р. Мухаметзянов, В.Р. Рахматуллин, Д.А. Николаев, Е.П. Елепина, А.А. Гаитова (Уфа) [admin@stalkerplm.com](mailto:admin@stalkerplm.com)

## Актуальность проблемы

Одним из эффективных путей повышения производительности труда в авиационной и машиностроительной промышленности является автоматизация производственных процессов на основе применения гибких производственных систем (ГПС), построенных на базе многоцелевых металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Создание (синтез) компоновки ГПС осуществляется на ранней стадии проектирования после изучения конструкторских и технологических требований к изготовлению корпусных деталей, базового технологического процесса, определения программы выпуска и показателей экономической эффективности. Эта стадия проектирования является самой ответственной, так как от правильности выбора компоновки ГПС во многом зависит успех проекта в целом.

Целью авторов статьи являлась разработка методики структурного синтеза компоновок ГПС для механообработки группы однотипных корпусных деталей на стадии технического предложения на основе применения CAD/CAE-систем и метода конечных элементов (МКЭ).

## Методика структурного синтеза компоновки ГПС

Рассмотрим методику синтеза структуры компоновки ГПС на базе металлорежущих станков с ЧПУ, изготавливаемых на предприятии ООО НПО «Станкостроение» (г. Стерлитамак) [1].

### 1. Анализ конструкции детали-представителя

На рис. 1 приведены геометрические 3D-модели заготовки и корпусной детали (габаритные размеры детали 420×370×327 мм), разработанные в CAD-системе *SolidWorks* [2].

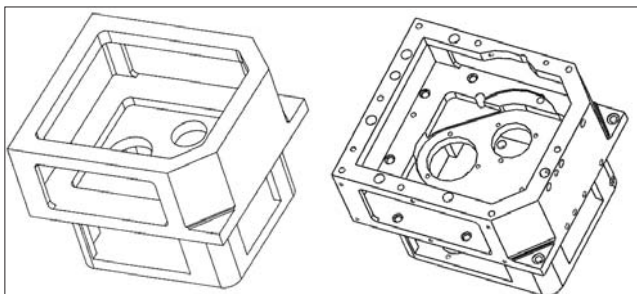


Рис. 1. Твердотельные геометрические модели заготовки и детали

Рассматриваемая корпусная деталь изготавливается из материала СЧ20 (ГОСТ 1412-85). Заготовкой является отливка второго класса точности, группы «а» (ОСТ2 МТ 21-2-90).

Технические требования к изготовлению детали:

- шероховатость точных поверхностей:  $Ra = 0.8$  мкм и  $Ra = 1.6$  мкм, остальных:  $Ra = 6.3$  мкм;
- суммарная погрешность формы и расположения определяется следующими видами допусков (ГОСТ 2.308-79): параллельности 0.02 мм; перпендикулярности 0.01 мм; круглости 0.005 мм; цилиндричности 0.011 мм; профиля продольного сечения цилиндрической поверхности 0.005 мм; соосности 0.005 мм; расположения отверстий 0.016 мм.

Конструкция детали содержит незначительное количество точных поверхностей, имеет множество карманов, цилиндрических и резьбовых отверстий. Технические требования к изготовлению детали обеспечиваются механообработкой на универсальных металлорежущих станках нормальной и повышенной точности.

### 2. Анализ базового технологического процесса изготовления детали

Анализ базового технологического процесса изготовления детали выявил следующие основные его недостатки:

- механическая обработка детали осуществляется на семи различных универсальных металлорежущих станках, что увеличивает себестоимость её изготовления;
- используется 10 установов, что приводит к увеличению времени механообработки детали (суммарное штучно-калькуляционное время:  $\sum T_{шткб} = 1242.085$  мин) и снижению точности её изготовления из-за погрешностей базирования, закрепления, установки;
- необходимы операции ручной обработки детали – снятие заусенцев и притупление острых кромок, что значительно увеличивает время и себестоимость изготовления детали.

В этой связи предлагается модернизировать базовый технологический процесс – в частности, сразу после термообработки (старение), выполнить механообработку детали на трех сверлильно-фрезерно-расточных (многоцелевых) станках с ЧПУ (повышенной точности). Реализация такого предложения позволит: интегрировать операции в маршрутной технологии;

**Табл. 1. Варианты компоновки производственного участка**

1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
Многоцелевые станки с ЧПУ с двумя устройствами смены паллет	Многоцелевые станки с ЧПУ с шестью устройствами смены паллет	ГПС на основе многоцелевых станков с ЧПУ, спутника паллет, стеллажа-накопителя
		

выполнить механообработку детали за три установка; уменьшить время обработки и повысить точность изготовления. На многоцелевом станке с ЧПУ предлагается реализовать комплексную технологическую операцию, которая будет включать следующие виды механической обработки: фрезерование поверхностей, сверление и растачивание отверстий, нарезание резьбы. Механообработка детали будет осуществляться с пяти сторон – за счет возможностей многоцелевого станка с ЧПУ, оснащенного вращающимся столом и поворотным шпиндельным устройством.

**3. Обоснование применения ГПС для механообработки на базе многоцелевых станков с ЧПУ**

Для обоснования применения ГПС рассмотрим три варианта компоновки производственного участка для изготовления детали (табл. 1).

**3.1. Расчет числа многоцелевых станков с ЧПУ**

Для каждой модели станка  $C_p$  этот расчет основан на балансе эффективного (расчетного) годового фонда времени работы оборудования  $F_o$  и номинальной трудоемкости годовой производственной программы деталей-установок  $T_n$ , обрабатываемых на станках данной модели [3]:

$$C_p = \frac{T_n}{F_o \cdot K} \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент использования станка.

Номинальная трудоемкость годовой производственной программы  $T_n$  рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$T_n = \sum_{i=1}^L \left( N_i \cdot \sum_{j=1}^{m_i} T_{шт\ ij} \right) \quad (2)$$

где  $T_{шт\ ij}$  – штучное время (трудоемкость)  $j$ -й операции в технологическом процессе обработки  $i$ -й заготовки, мин.;  $m_i$  – число операций в технологическом процессе  $i$ -й заготовки, выполняемых на станках данной модели;  $N_i$  – годовая программа выпуска деталей, шт.;  $L$  – номенклатура заготовок в производственной программе.

Эффективный годовой фонд времени можно рассчитать следующим образом [3]:

$$F_o = F_{сут} \cdot d \quad (3)$$

где  $F_{сут}$  – эффективный суточный фонд времени работы станка, ч;  $d$  – количество рабочих дней в календарном году.

Эффективный суточный фонд времени работы станка рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$F_{сут} = (T_{y.ч.} + T_{6.ч.}) \cdot K \quad (4)$$

где  $T_{y.ч.}$  – время работы станка с участием человека, ч;  $T_{6.ч.}$  – время работы станка без участия человека (равно количеству устройств смены паллет или количеству позиций для закрепления заготовок), ч;  $K$  – коэффициент использования станка.

Результаты расчетов по формулам (1)–(4) для трех вариантов компоновок производственных участков приведены в табл. 2.

**Табл. 2. Результаты расчетов для трех вариантов компоновок**

Наименование характеристики	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
Эффективный суточный фонд времени работы станков, ч	8.4	11.3	17.85
Эффективный годовой фонд времени работы станков, ч	2520	3390	5355
Требуемое количество станков, шт.	7	5	3

**Табл. 3. Результаты сравнительного анализа количества операторов**

Вариант компоновки (табл. 1)	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
Необходимое количество операторов			
Трудовые затраты (стоимость работы)	100 %	50 %	25 %

На основе этих результатов можно сделать вывод о том, что применение ГПС для механообработки детали (3-й вариант компоновки) приводит: к значительному увеличению эффективного годового фонда времени работы дорогостоящих многоцелевых станков с ЧПУ (5355 ч) и к сокращению их необходимого количества более чем в два раза (3 шт.).

### 3.2. Определение количества операторов

Для сравнения трех вариантов компоновки производственных участков определим количество основных производственных исполнителей (операторов). На основе опубликованных данных японской станкостроительной корпорации *Yamazaki Mazak* [4] установим соотношение операторов в зависимости от количества обслуживаемых многоцелевых станков с ЧПУ (табл. 3):

Исходя из этих данных, можно сделать вывод о том, что применение ГПС для механообработки детали (3-й вариант компоновки) приводит к сокращению потребности в операторах (а, следовательно, и к уменьшению трудовых затрат) в 4 раза.

### 3.3. Расчет занимаемой производственной площади

В табл. 4 приведены результаты расчета занимаемой производственной площади для трех вариантов компоновок производственных участков. На их основе можно сделать вывод о том, что 3-й вариант компоновки является наилучшим решением с точки зрения эффективности использования площади.

### 3.4. Выводы

Создание ГПС для механообработки детали (3-й вариант компоновки, табл. 1) позволит:

- уменьшить количество дорогостоящих многоцелевых станков с ЧПУ (начальные инвестиционные расходы);
- сократить число основных производственных исполнителей (операторов) в 4 раза;
- уменьшить срок окупаемости начальных инвестиций (за счет уменьшения начальных инвестиционных расходов);

**Табл. 4. Результаты расчета производственной площади**

Характеристика	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
Занимаемая площадь, м <sup>2</sup>	162.102	116.72	101.69

- эффективно использовать производственную площадь.

## 4. Структурный синтез компоновки ГПС

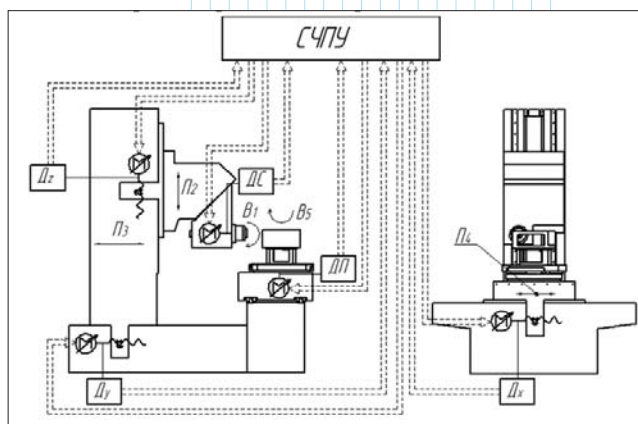
ГПС могут иметь различные компоновочные схемы в зависимости от выполняемых технологических задач и типов обрабатываемых деталей. Наибольшее применение в промышленности для механической обработки корпусных деталей получили ГПС, состоящие из многоцелевых станков с ЧПУ и накопительных устройств (стеллаж-накопитель), обслуживаемых с помощью спутника паллет.

### 4.1. Обоснование компоновки многоцелевого станка с ЧПУ

Одним из критериев для обоснования структурно-кинематической схемы компоновки многоцелевого станка с ЧПУ является определение технологической операции, в рамках которой предлагается осуществить комплексную механическую обработку детали.

Определим схемы обработки детали и перечень исполнительных движений многоцелевого станка с ЧПУ для комплексной операции (номер 030), имеющей самую высокую степень интеграции технологических переходов для механической обработки рассматриваемой детали (табл. 5).

Технологическая операция номер 030 включает в себя: фрезерование поверхностей, сверление и растачивание отверстий, нарезание резьбы. Механическую обработку детали предлагается производить с пяти сторон за счет технологических возможностей многоцелевого станка с ЧПУ, оснащенного вращающимся столом и поворотным шпиндельным устройством



*Рис. 2. Структурно-кинематическая схема компоновки многоцелевого станка с ЧПУ*

изменения ориентации шпинделя относительно детали (то есть шпиндель должен принимать как вертикальное, так и горизонтальное положения).

Предлагаемая структурно-кинематическая схема компоновки многоцелевого станка с ЧПУ, предназначенная для выполнения технологической операции 030, приведена на рис. 2. Условные обозначения: двойные пунктирные линии – электрические связи; СЧПУ – система ЧПУ; П2, П3, П4 – поступательные исполнительные движения; В1, В5 – вращательные исполнительные

движения; ДП – датчик перемещения; ДС – датчик скорости; М – регулируемый электродвигатель; Dx, Dy, Dz – датчики линейных перемещений по осям X, Y и Z соответственно.

Практика станкостроения указывает на то, что правильный выбор и рациональное построение компоновки на ранней стадии проектирования оказывают значительное влияние на качество станка [5]. Методика обоснования (синтеза) компоновки станка с ЧПУ на основе применения CAD/CAE-систем и МКЭ была подробно рассмотрена в работе [6].

**Табл. 5. Перечень технологических переходов в операции 030**

Переходы	Схема обработки	Метод формообразования	Исполнительные движения
Фрезерование базовой плоскости		Копирования касания	Фv (В1) Фs(П3) Н(П2) Н(П3) Н(П4)
Фрезерование боковой поверхности		Копирования касания	Фv(В5) Фs(П2) Н(П2) Н(П3) Н(П4)
Сверление		Метод следа и следа	Фv (В1) Фs (П3) Н (П1) Н (П2) Н(П3)
Растачивание		Метод касания	Фv (В1) Фs(П2) Н(П2) Н(П3) Н(П4)
Резьбонарезание		Метод копирования и следа	Фvs(В1П3) Н(П1) Н(П2) Н(П3)
Цекование		Копирования следа	Фv(В1) Фs(П3,П4) Н(П2) Н(П3) Н(П4)

На основе методики [6] было выполнено расчетное обоснование компоновок многоцелевых станков с ЧПУ:

- токарного фрезерно-расточного станка 600VT [1] для механической обработки базовой поверхности детали (операция номер 025);
- токарного сверлильно-фрезерно-расточного станка 630VHT [1] для выполнения операции с номером 030 (см. табл. 5);
- токарного сверлильно-фрезерно-расточного станка 630VHT [1] для выполнения операции с номером 035 для механической обработки детали в сборе с крышкой.

#### 4.2. Обоснование компоновки стеллажа-накопителя

Количество ячеек в стеллаже-накопителе  $n_{яч}$  (шт.), необходимое для бесперебойной работы ГПС в течение расчетного времени, определим по формуле [3]:

$$n_{яч} = \frac{60 \cdot \Phi_{см} \cdot C_p \cdot k_{зап}}{t_{об}} \cdot k_{зап} \quad (5)$$

где  $\Phi_{см}$  – продолжительность смены, ч;  $C_p$  – число станков, входящих в ГПС, шт.;  $t_{об}$  – штучное время обработки одной детали, мин.;  $k_{зап}$  – коэффициент запаса, обеспечивающий запас ячеек для эффективной работы ГПС. Для ГПС, построенных на базе многоцелевых станков с ЧПУ, рекомендуется значение  $k_{зап} = 1.1$  [3].

Таким образом, необходимое число ячеек в стеллаже-накопителе:

$$n_{яч} = \frac{60 \cdot \Phi_{см} \cdot C_p \cdot k_{зап}}{t_{об}} \cdot k_{зап}$$

Стеллаж-накопитель предлагается реализовать в виде сборной многоярусной рамной конструкции, что позволит изменять технические характеристики ГПС и уменьшить экономические затраты. Каждая ячейка стеллажа-накопителя должна включать в себя паллету с приспособлением для установки заготовки (детали).

#### 4.3. Обоснование компоновки спутника паллет

Спутник паллет (СП) предназначен для транспортирования паллеты с заготовкой (деталью) между многоцелевыми станками с ЧПУ, стеллажом-накопителем ГПС и станцией загрузки. Структурно-кинематическая схема СП показана на рис. 3. Условные обозначения: двойные пунктирные линии – электрические связи;  $\text{---} \circ \text{---}$  – жесткий упор; СЧПУ – система ЧПУ;  $D_x, D_y, D_z$  – датчики линейных перемещений по осям X, Y и Z соответственно.

Для реализации транспортирования паллеты с заготовкой (деталью) СП должен иметь четыре степени свободы: выдвигание вилки по оси X, подъем и опускание вилки по оси Y, линейное перемещение по оси Z, поворот вилки

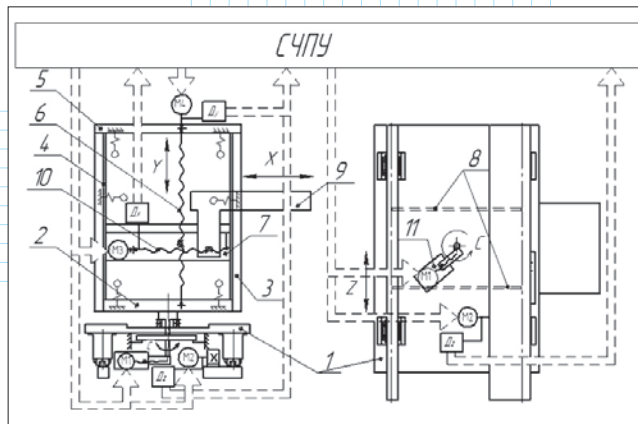


Рис. 3. Структурно-кинематическая схема СП

вокруг оси Y (обозначение: C). Базовым несущим элементом СП является основание 1, перемещающееся по направляющим при помощи двигателя М2 (ось Z). На основании установлена поворотная платформа 2, на которой закреплены стойки 3 с направляющими 4. На стойки установлены ригели 5. По направляющим 4, при помощи электродвигателей М4 и ходовых винтов 6, перемещается узел 7 с направляющими 8 (ось Y). Привод перемещения вилки 9 (предназначена для захвата и удержания паллеты с заготовкой и деталью) по направляющим 8 включает в себя электродвигатель М3 и ходовой винт 10 (ось X). Вращательное движение C платформы 2 осуществляется электромеханическим цилиндром 11 (линейный актуатор марки САНВ 21-1 [7]).

#### 4.4. Обоснование компоновки станции загрузки

Станция загрузки в ГПС механообработки предназначена для автоматизации операций снятия готовых деталей и установки новых заготовок с помощью СП. Здесь оператор выполняет операции закрепления заготовки и снятия готовой детали с паллеты. Станция загрузки имеет одну степень свободы: вращение стола вокруг своей оси.

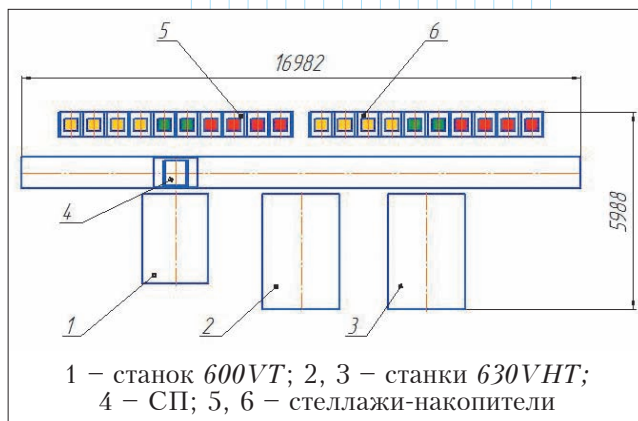


Рис. 4. Первый вариант компоновки ГПС

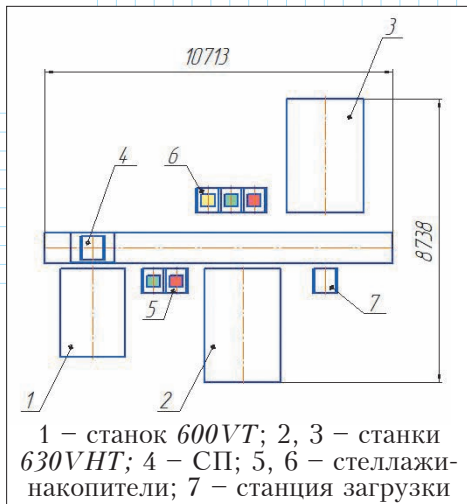


Рис. 5. Второй вариант компоновки ГПС

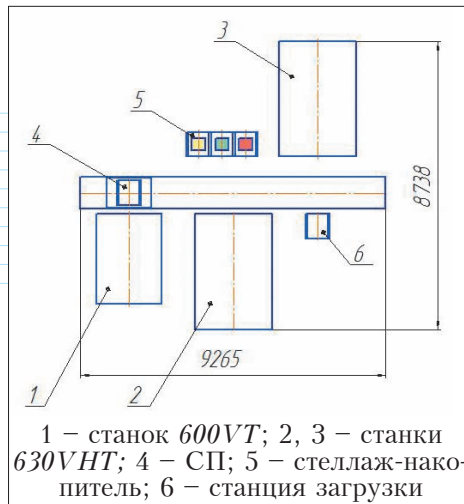


Рис. 6. Третий вариант компоновки ГПС

Анализ диаграмм позволяет сделать следующие выводы:

- первый вариант компоновки занимает большую производственную площадь, чем два других варианта;
- второй и третий варианты имеют более высокую производительность, в отличие от первого варианта (обрабатывается на две детали больше). Кроме того, во втором и третьем вариантах многоцелевые станки с ЧПУ 630VHT загружены более равномерно;
- в третьем варианте компоновки простой основного и вспомогательного

#### 4.5. Создание (синтез) компоновки ГПС механообработки

Для определения состава основного и вспомогательного оборудования ГПС, реализующего предлагаемый технологический процесс механообработки детали, рассмотрим три варианта компоновок ГПС [1]:

1 Вертикальный токарный фрезерно-расточной станок 600VT, два токарных сверлильно-фрезерно-расточных станка 630VHT, один СП, два трехъярусных стеллажа-накопителя с общим числом ячеек, равным 60 (рис. 4).

2 Вертикальный токарный фрезерно-расточной станок 600VT, два токарных сверлильно-фрезерно-расточных станка 630VHT, один СП, два одноярусных стеллажа-накопителя с общим числом ячеек 5 шт., станция загрузки (рис. 5).

3 Вертикальный токарный фрезерно-расточной станок 600VT, два токарных сверлильно-фрезерно-расточных станка 630VHT, один СП, двухъярусный стеллаж-накопитель с общим числом ячеек 6 шт., станция загрузки (рис. 6).

Расчетные диаграммы работы основного и вспомогательного оборудования, выполняющего технологические операции 025/030/035 механической обработки детали для этих трех вариантов компоновок ГПС, приведены на рис. 7.

оборудования снижается, так как уменьшение производственной площади ГПС приводит к уменьшению затрат времени на выполнение дополнительных перемещений спутника-паллет. Это достигается за счет применения станции загрузки, которая позволяет одновременно уменьшить расчетное количество ячеек  $n_{яч}$  с девяти

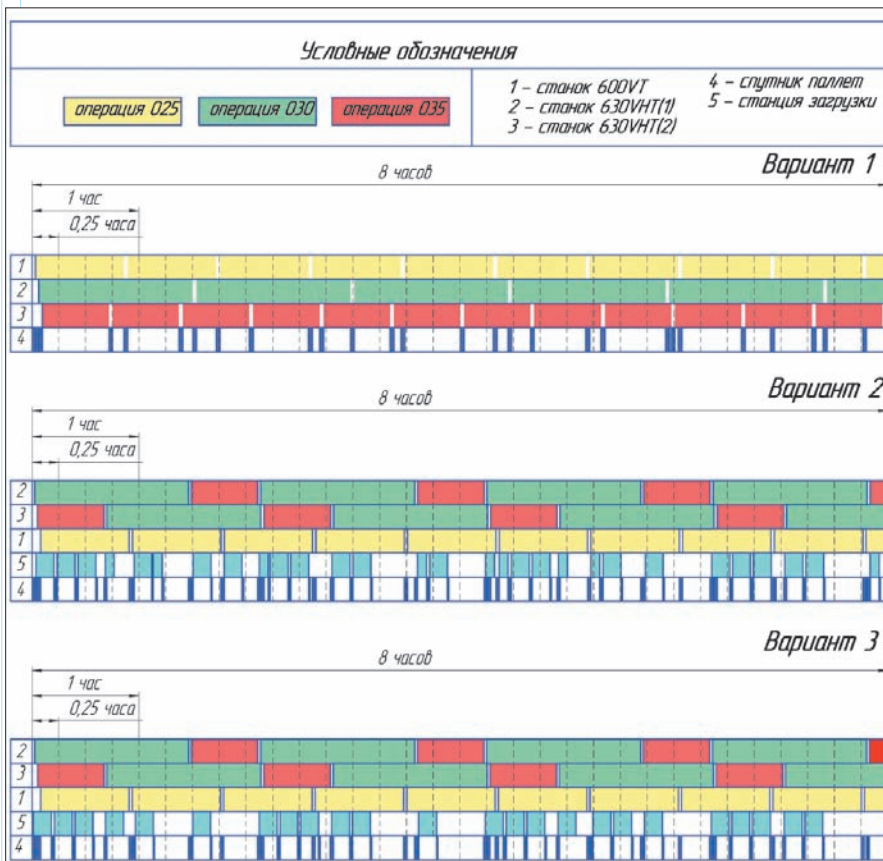


Рис. 7. Диаграммы работы оборудования для трех вариантов компоновки ГПС

Табл. 6. Показатели для сравнения трех компоновок ГПС

№ варианта компоновки ГПС	Производительность, шт.	Площадь комплекса, м <sup>2</sup>	Простой основного и вспомогательного оборудования, время (мин.)/ стоимость (руб.)	Суммарная стоимость заготовок, руб.	Суммарная стоимость деталей, руб.	Основные капитальные затраты, руб.	Критический объем, шт.	Дисконтированный срок окупаемости, для годовой программы 4000 деталей, г	Масштабируемость
1	5 деталей, 11 заготовок	101.69	488.72/ 3497.00	90 200	56 732.610	97 512 358.01	42	0.987	-
2	7 деталей, 2 заготовки	93.61	455.46/ 2680.67	16 400	79 425.654	48 532 645.06	35	0.696	+
3	7 деталей, 2 заготовки	80.96	452.19/ 2600.45	16 400	79 425.654	48 532 645.06	35	0.696	+

**Примечания:**

- Результаты расчета приведены для одной смены работы ГПС;
- Стоимость одного часа простоя многоцелевого станка с ЧПУ принята в размере 2500 руб., спутника паллет – 100 руб. [1,4];
- Суммарная стоимость деталей, капитальные затраты, дисконтированный срок окупаемости проекта посчитаны для одинаковой номенклатуры производства (4000 деталей);
- Ставка дисконтирования  $E = 18\%$  включает ставку инфляции и риски реализации проекта.

до шести и использовать один двухъярусный стеллаж-накопитель.

В табл. 6 приведены сводные результаты расчетного сравнения технических и экономических показателей трех вариантов компоновок ГПС для механообработки детали. Сравнительный анализ количественных и качественных показателей позволяет сделать выбор в пользу третьего варианта компоновки, поскольку в этом случае обеспечиваются:

- минимальная стоимость простоя основного и вспомогательного оборудования;
- минимальная величина капитальных затрат;
- максимальная суммарная стоимость деталей;
- экономически приемлемые для авиационной и машиностроительной промышленности значения дисконтируемого срока окупаемости инвестиций в проект и критического объема выпуска партий деталей;
- масштабируемость технических и экономических показателей компоновки ГПС.

На основе создания нового маршрутного технологического процесса для изготовления детали, для третьего варианта компоновки ГПС было рассчитано суммарное штучно-калькуляционное время:  $\sum T_{\text{шкн}} = 219.367$  мин.

Определим разность штучно-калькуляционного времени  $\Delta T_{\text{шкн}}$  базового (см. п. 2) и нового технологических процессов изготовления детали (мин.):

$$\Delta T_{\text{шкн}} = \sum T_{\text{шкб}} - \sum T_{\text{шкн}} = 1242.085 - 219.367 = 1022.718$$

Значительное уменьшение значения штучно-калькуляционного времени при обеспечении технологического качества изготовления детали достигается за счет замены устаревшего универсального станочного оборудования на многоцелевые станки с ЧПУ, уменьшения количества установов, концентрации технологических переходов, использования устройств автоматической смены для прогрессивного режущего инструмента, применения оптимальных режимов резания и станочных измерительных систем.

Табл. 7. Основные технические характеристики стеллажа-накопителя

Наименование	Условное обозначение	Величина (назначение)
Высота ячейки, мм	$H_{\text{я}}$	700
Ширина стеллажа, мм	$B$	750
Расстояние между стойками, мм	$L$	800
Высота стеллажа, мм	$H$	1818
Нагрузка на ячейку, кг	$P_{\text{я}}$	317.88
Количество ячеек, шт.	-	$3 \times 2$
Оборудование для загрузки ячеек	-	Спутник паллет

## 5. Проектирование компоновки ГПС

### 5.1 Проектирование компоновки стеллажа-накопителя

На основе результатов, полученных в п. 4, и габаритных размеров паллеты (630×630×85 мм), определим технические характеристики стеллажа (табл. 7).

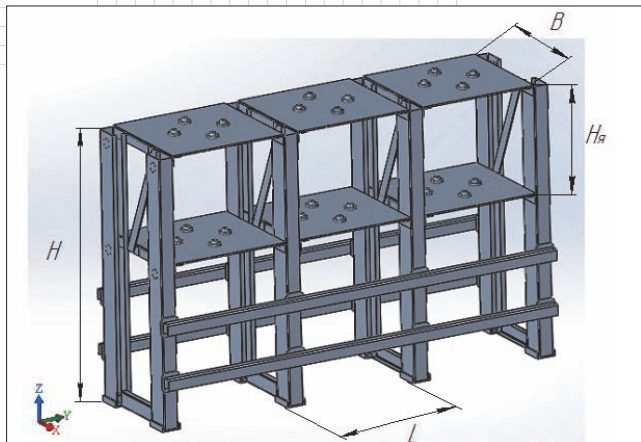


Рис. 8. 3D-модель стеллажа – накопителя паллеткомпоновки ГПС

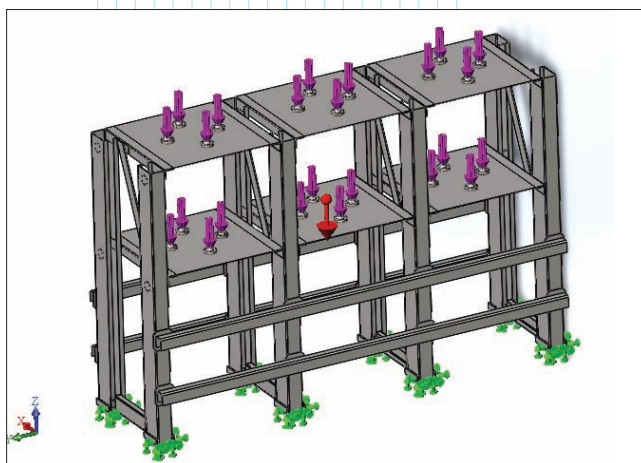


Рис. 9. Расчетная схема стеллажа-накопителя

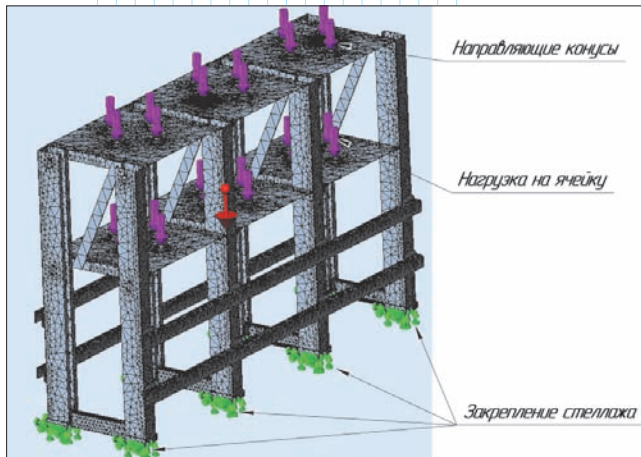


Рис. 10. Конечно-элементная модель стеллажа-накопителя

На рис. 8 показана спроектированная с помощью CAD-системы *SolidWorks* геометрическая 3D-модель стеллажа – накопителя паллет с обозначением его основных размеров.

Осуществим расчет стеллажа на статическую жесткость в CAE-системе *SolidWorks Simulation* [2] с применением МКЭ. Разработанные расчетная схема и конечно-элементная модель стеллажа-накопителя с нагрузками (собственный вес конструкции и нагрузка на ячейки) показаны на рис. 9, 10.

Моделирование нагрузки на ячейку стеллажа-накопителя осуществлялось на основе приложения силы, направленной перпендикулярно граням направляющих конусов, предназначенных для фиксации паллеты с заготовкой (деталью). Прикрепление нижней граней стяжек-подпятников к полу в конечно-элементной модели задавалось с помощью кинематических граничных условий (конечный элемент “Закрепленная геометрия” [2, 6]).

Эпюры эквивалентных напряжений и перемещений, построенные по результатам статического CAE-исследования модели стеллажа для случая его полной загрузки паллетами с заготовками и деталями, показаны на рис. 11, 12.

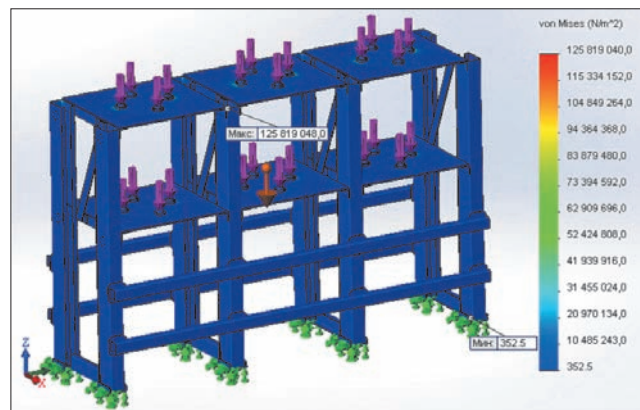


Рис. 11. Эпюра напряжений модели стеллажа (критерий von Mises)

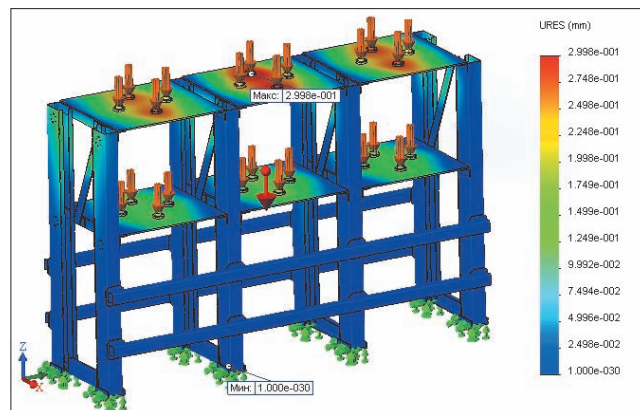


Рис. 12. Эпюра результирующих перемещений модели стеллажа (URES)



Анализ результатов статического исследования КЭ-модели стеллажа-накопителя для случаев его полной и неполной загрузки заготовками (детальями) позволяет сделать следующие выводы:

- максимальное расчетное значение эквивалентного напряжения (критерий прочности *von Mises* [2, 9]), равное 12 5819 040.0 Н/м<sup>2</sup>, меньше допустимого предела прочности для используемого материала (351 571 000.0 Н/м<sup>2</sup>);
- максимальное перемещение *URES* в несущей конструкции равно 0.2998 мм, а допустимое значение перемещения – 0.5 мм. Следовательно, СП обеспечит точность выполнения операций установки и снятия паллеты с заготовкой (деталью) в стеллаж.

### 5.2. Проектирование компоновки спутника паллет

На основе предложенной структурно-кинематической схемы СП (рис. 3), а также выполненных проектировочных и проверочных

конструкторских расчетов (приводов линейных и вращательных исполнительных движений, направляющих, подшипников качения, шариковых винтовых передач и т.п.), авторами была спроектирована геометрическая 3D-модель СП, для чего использовалась CAD-система *SolidWorks*.

Результаты проектирования СП приведены на рис. 13.

### 5.3. Расчет устойчивости компоновки СП

Ввиду того, что СП воспринимает значительную консольную нагрузку (вес паллеты с установленной заготовкой), необходимо произвести расчет компоновки СП на опрокидывание (устойчивость). Расчетная схема СП показана на рис. 14.

Заключение об устойчивости несущей конструкции делают на основании величины коэффициента устойчивости [8]:

$$K_{уст} = \frac{M_{уд}}{M_o} \quad (6)$$

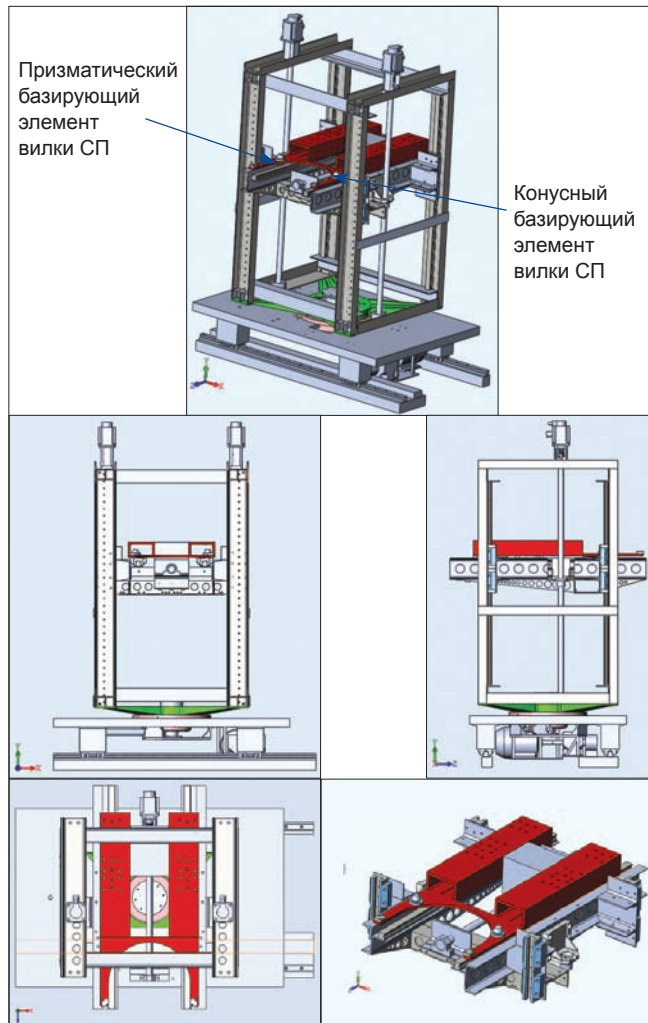


Рис. 13. Результаты проектирования компоновки СП

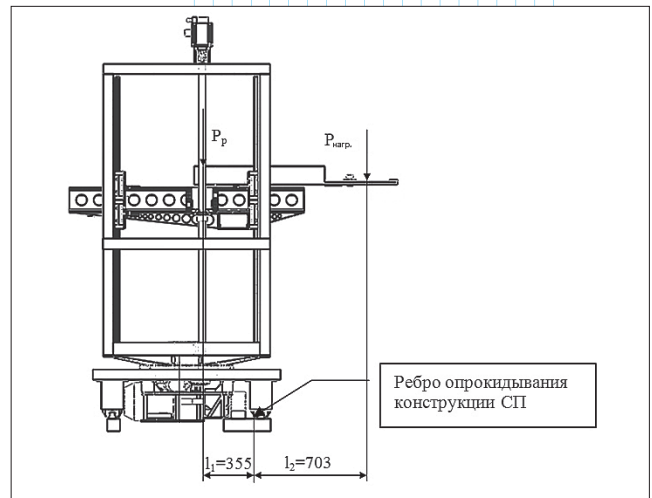


Рис. 14. Расчетная схема для определения запаса устойчивости СП

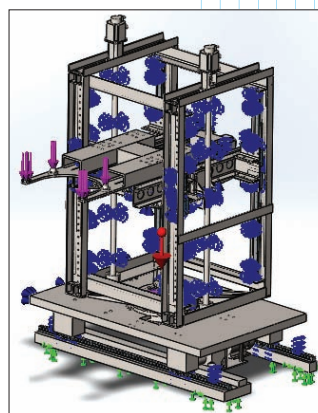


Рис. 15. Расчетная схема компоновки СП для статического МКЭ-исследования

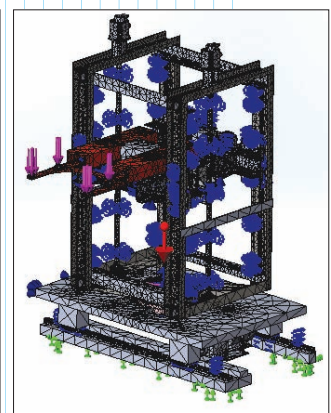


Рис. 16. Конечно-элементная модель СП

где  $M_{уд}$  – удерживающий момент относительно ребра опрокидывания, создаваемый весом СП  $P_p$  (Н·мм);  $M_o$  – опрокидывающий момент относительно ребра опрокидывания, создаваемый консольной нагрузкой  $P_{нагр}$  (Н·мм).

Расчет на устойчивость осуществляется для наиболее неблагоприятных условий работы конструкции СП. Определим удерживающий момент:

$$M_{уд} = P_p \cdot l_1, \quad (7)$$

где  $P_p$  – вес конструкции СП в ньютонах;  $l_1$  – расстояние от ребра опрокидывания до центра тяжести СП, мм (рис. 14). В CAD-системе *SolidWorks* вес определяется с помощью опции “Массовые характеристики”, и его значение  $P_p = 11\,877.4$  Н.

$$M_{уд} = 11\,877.4 \cdot 355 = 4\,216\,477 \text{ Н·мм}$$

Опрокидывающий момент определим по формуле:

$$M_o = P_{нагр} \cdot l_2, \quad (8)$$

где  $P_{нагр}$  – вес консольной нагрузки ( $P_{нагр} = 3\,178.8$  Н);  $l_2$  – расстояние от ребра опрокидывания до точки приложения консольной нагрузки  $P_{нагр}$ , мм.

$$M_o = 3\,178.8 \cdot 703 = 2\,234\,696.4 \text{ Н·мм}$$

Расчетное значение коэффициента устойчивости, определенное по формуле (6),  $K_{уст} = 1.89$ .

При значении  $K_{уст} > 1.15$  конструкция считается устойчивой [8]. Таким образом, можно сделать

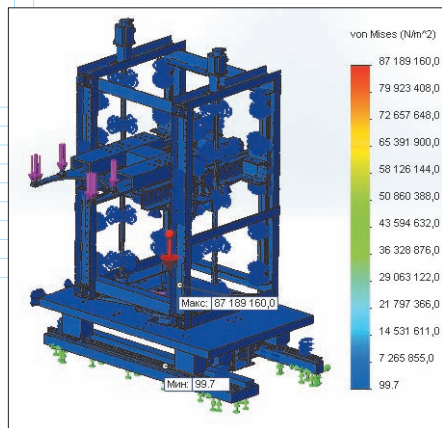


Рис. 17. Эпюра эквивалентных напряжений модели СП

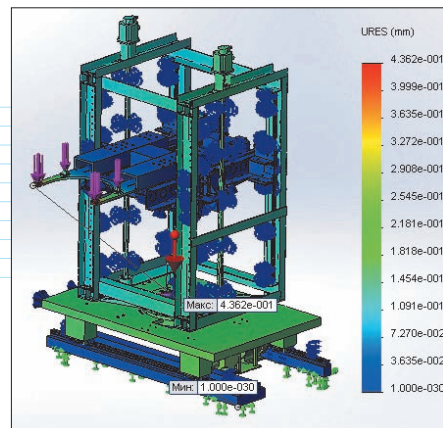


Рис. 18. Эпюра суммарных перемещений модели СП

вывод, что обеспечивается допустимый запас устойчивости конструкции СП.

#### 5.4. Расчет статической жесткости компоновки СП

Статическое исследование несущей конструкции компоновки СП осуществлялось на основе МКЭ, проведенного средствами CAE-системы *SolidWorks Simulation*, а также методики создания конечно-элементных моделей компоновок оборудования, описанной в работе [6]. Разработанная расчетная схема компоновки СП, с указанием статических и кинематических ограничений, показана на рис. 15.

Результат дискретизации конечно-элементной модели модели компоновки СП приведен на рис. 16.

Статические исследования конечно-элементной модели проводились в расчетных точках, соответствующих координатам базирующих элементов вилки СП (см. рис. 13), на которые

Табл. 8. Сводная таблица технических характеристик СП

Наименование характеристики	Величина
Грузоподъемность, кг	317.88
Количество координат	4
Форма рабочей зоны	Цилиндрическая
Скорости (обозначения осей см. на рис. 3):	
• перемещения тележки с поворотной платформой (ось Z), м/с	0.52
• подъема выдвижного устройства (ось Y), м/с	0.005±0.1
• перемещения выдвижного устройства (ось X), м/с	0.005±0.2
• поворот платформы (С), об/мин	2.46
Максимальное перемещение (обозначения осей см. на рис. 3):	
• тележки с поворотной платформой (ось Z), м	до 30
• выдвижного устройства (ось Y), м	1,312
• вилки (ось X), м	0.73
• поворот платформы (С), град.	0...180
Габаритные размеры:	
• длина, мм	1800
• ширина, мм	1500±2083
• высота, мм	1852
Масса, кг	1257

устанавливается паллета с заготовкой (деталью). Эпюра эквивалентных напряжений (критерий прочности *von Mises* [2, 9] при максимальном вылете выдвигного устройства СП показана на рис. 17.

Эпюра суммарных статических перемещений *URES* при максимальном вылете выдвигного устройства СП приведена на рис. 18.

Анализ результатов статических исследований в расчетных точках конечно-элементной

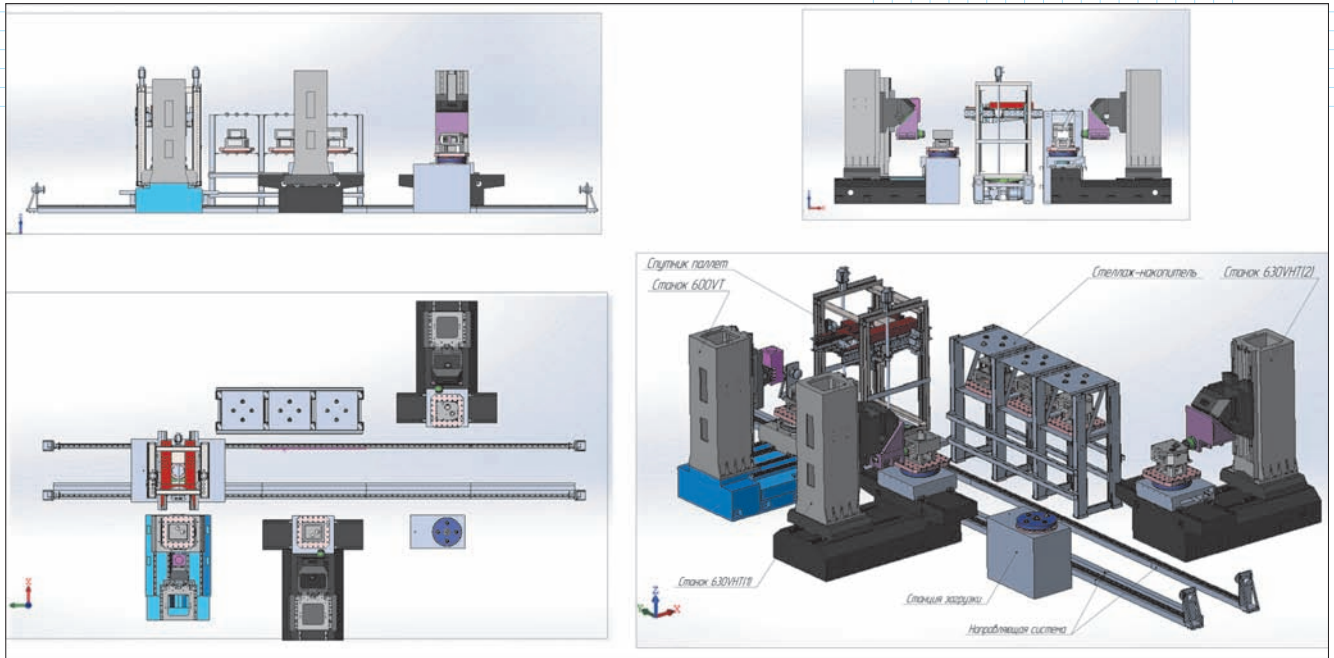


Рис. 19. Геометрическая 3D-модель ГПС механообработки

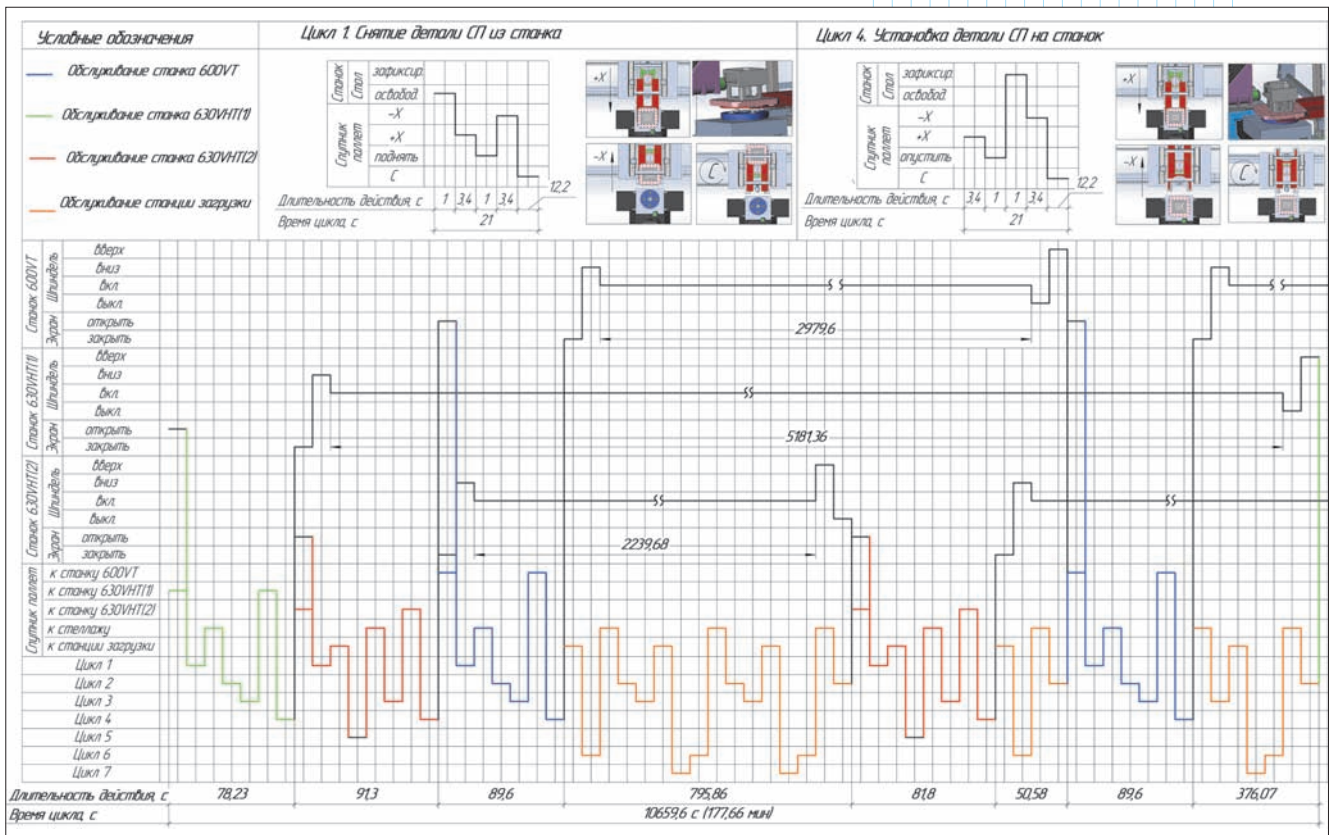


Рис. 20. Циклограмма работы ГПС механообработки

модели СП позволяет сделать следующие выводы:

- максимальное эквивалентное напряжение (критерий прочности *von Mises*) 87 189 160 Н/м<sup>2</sup> меньше, чем допустимый предел прочности для используемого материала (351 571 000 Н/м<sup>2</sup>);

- максимальные значения суммарных перемещений и отдельных перемещений по трем координатным осям равны (обозначение осей исполнительных движений СП приведены на **рис. 3**):  $URES=4.362 \cdot 10^{-1}$  мм;  $UX=7.522 \cdot 10^{-2}$  мм;  $UY=3.070 \cdot 10^{-3}$  мм;  $UZ=8.255 \cdot 10^{-2}$  мм. Допустимое значение погрешности позиционирования устройства смены паллет, применяемого в конструкции многоцелевого станка с ЧПУ, равняется  $\pm 1.0$  мм [1].

Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемая компоновка СП обеспечивает требования по точности для выполнения операций установки и снятия паллеты на многоцелевых станках с ЧПУ ГПС. Технические характеристики СП приведены в **табл. 8**.

### 5.5. Проектирование компоновки ГПС

Геометрическая 3D-модель ГПС, разработанная с помощью CAD-системы *SolidWorks*, приведена на **рис. 19**.

Для оптимизации функционирования основного и вспомогательного оборудования разработаны алгоритм и общая циклограмма ГПС (**рис. 20**). В общую циклограмму включены семь типовых циклов для отображения следующих исполнительных движений оборудования ГПС:

- Цикл 1 – снятие детали СП из станка;
- Цикл 2 – установка заготовки (детали) СП в стеллаж-накопитель;
- Цикл 3 – снятие заготовки (детали) СП из стеллажа-накопителя;
- Цикл 4 – установка детали СП на станок;
- Цикл 5 – установка готовой детали СП на станцию загрузки;
- Цикл 6 – снятие заготовки СП из станции загрузки;
- Цикл 7 – переустановка детали.

Структурно-кинематические схемы основного и вспомогательного оборудования, алгоритм и общая циклограмма ГПС используются в качестве исходных данных для решения задачи, связанной с созданием программного обеспечения для управления ГПС для механообработки детали.

Предлагаемая ГПС позволяет реализовать изготовление как группы заданных деталей (деталь-представитель приведена на **рис. 1**), так и других корпусных деталей такого же типоразмера. В этом случае подготовка к производству новых корпусных деталей заключается в разработке (огладке) программного обеспечения для выполнения технологических операций механообработки на многоцелевых станках с ЧПУ

(управляющие программы) и для управления оборудованием ГПС.

На базе предлагаемого проекта возможно создание новых проектов ГПС, отличающихся структурами компоновок и количеством применяемого основного и вспомогательного оборудования, интеграцией с другими ГПС (реализация показателя – масштабируемость проекта).

## Заключение

Предложенная методика позволяет осуществлять структурный синтез компоновок ГПС для механической обработки партий корпусных деталей на базе многоцелевых станков с ЧПУ на одной из самой ответственной стадии проектирования (техническое предложение) с применением CAD/CAE-систем и МКЭ. 🍌

### Об авторах

**Кульга Константин Станиславович** – доктор технических наук, профессор кафедры “Мехатронные станочные системы” ФГБОУ ВПО “Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ)”.

**Карюгин Артём Алексеевич, Головицин Антон Юрьевич, Мухаметзянов Роман Рафаэлевич, Рахматуллин Вадим Ринатович, Николаев Дмитрий Алексеевич, Елепина Екатерина Петровна, Гаитова Алина Амировна** – инженеры по специальности 220401 “Мехатроника”.

### Список литературы

1. ООО НПО Станкостроение // [www.stankostroenie.com](http://www.stankostroenie.com).
2. *Dassault Systemes* // [www.3ds.com](http://www.3ds.com).
3. Рахматуллин Р.Р., Сердюк А.И., Черноусова А.М., Шамаев С.Ю. Практические расчеты гибких производственных ячеек. Модели, алгоритмы, приложения – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2010, 237 с.
4. *Pallettech System. Yamazaki Mazak* // [www.mazak.ru](http://www.mazak.ru).
5. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: Основы компонетики. Москва: Машиностроение, 1978, 208 с.
6. Кульга К.С. Применение CAD/CAE-систем для статического исследования компоновок мехатронного станочного оборудования // *CAD/CAM/CAE Observer*, 2014, #2, с. 61–67.
7. SKF // [www.skf.com](http://www.skf.com).
8. Журавлев Н.П., Маликов О.Б. Транспортно-грузовые системы: Часть 1. Москва: УМНЦ, 2005, 223 с.
9. Алямовский А.А. *CosmosWorks*. Основы расчёта конструкций на прочность в среде *SolidWorks*. Москва: ДМК Пресс, 2010, 784 с.