

УДК 621.4

## ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ НЕЗАВЕРШЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ СБОРКЕ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ТУРБИНЫ

© 2019 М.А. Болотов, Т.В. Ефремова, М.В. Янюкина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 15.02.2019

В статье представлена теоретико-вероятностная модель сборки рабочего колеса турбины ГТД, позволяющая осуществлять комплектацию диска колеса рабочими лопатками в соответствии с требуемыми параметрами сборки. Модель включает комплектацию лопаток по условиям массы, качки в свободном положении, основных зазоров и разворота бандажной полки относительно замковой. На основе промежуточных результатов работы модели произведены расчеты необходимого задела незавершенного производства лопаток, сокращение объемов которого позволит снизить себестоимость производства и повысить эффективность процесса.

*Ключевые слова:* сборка рабочего колеса, турбина, модель комплектации.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях перед производством стоит задача постоянного снижения себестоимости процесса изготовления и повышения качества продукции. Это связано с появлением новых технологий и необходимостью им соответствовать с целью занятия конкурентоспособных позиций в пределах своего рынка. В машиностроительном производстве эти задачи выражены повышением производительности всех элементов производства, а также повышением эффективности предприятия.

Для достижения этих целей на производстве происходит постоянное совершенствование технологического процесса с целью его автоматизации и механизации. Однако если для механообрабатывающих операций уже давно применяются оборудование с числовым программным управлением (позволяющие исключить в значительной степени человеческий фактор, увеличить производительность технологических переходов, а так же снизить себестоимость операции), то для сборочных операций такой уровень автоматизации еще не достигнут ввиду отсутствия на рынке сборочного оборудования, способного производить сборку таких сложных узлов, как, например, колесо турбины третьей ступени ГТД. Это делает сборочный процесс одной из самых трудоёмких и дорогостоящих технологических операций.

Повышение эффективности производства, выраженного в качественном отношении работоспособностью готового изделия, возможно достичь несколькими способами. Во-первых, можно сузить поля допусков размеров составляющих деталей, что приведет к повышению точности изготовления, возможно, снижению брака, а так же к сборке без дальнейшей доработки деталей. Главным недостатком при этом является значительное увеличение финансовых затрат на производство, связанных в первую очередь с большими временными затратами на обработку.

Во-вторых, внедрение в процесс сборки предварительных компьютерных расчетов, суть которых заключается в технологии «ложных сборок», где в качестве исходных параметров используются данные измерений лопаток и диска.

Целью исследования является совершенствование производства рабочих колёс турбины ГТД на основе оптимизации технологических параметров их сборочного процесса, приводящих к снижению объемов незавершенного производства лопаток.

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В зарубежных исследованиях вопрос оптимизации чаще всего решается применением компьютерных технологий и виртуального моделирования. В статье [1] рассматривается система автоматизированной сборки для компонентов авиационных двигателей. Исследование проводится на примере сборки двух лопаток турбины двигателя General Electric GENx. Система состоит из следующих компонентов: промышленного робота, лазерного триангуляционного датчика (камера и лазерная калибровка, 3D

*Болотов Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей. E-mail: maikl.bol@gmail.com*

*Ефремова Татьяна Васильевна, магистр. E-mail: flame\_tt@mail.ru*

*Янюкина Мария Викторовна, аспирант, старший преподаватель кафедры инженерной графики. E-mail: mary392@mail.ru*

восстановление с использованием лазера и камеры), движущий компонент робота (генератор траектории), измерительных устройств, датчика коррекции (центровка). В результате исследования авторы провели эксперимент, итогом которого стало выравнивание двух компонентов сборки, при условии замкнутости контура, с точностью 0,12 мм.

Процессы сборки некоторых изделий имеют определенную схожесть. Это связано с подобием компонентов сборки. Следуя этой мысли, авторы статьи [2] предложили извлекать информацию о подобию из существующих геометрических моделей сборок. Исследователи представили метод для характеристики и структурирования моделей САПР, позволяющих извлекать аналогичные модели из базы данных. Поиск моделей осуществляет согласно выбранным пользователем критериям. Такой путь оптимизации позволит значительно сократить время предварительного процесса сборки, однако потребует широкой базы данных.

Авторами статьи [3] рассматривается процесс сборки турбины высокого давления, при этом для оценки рисков и степени влияния различных факторов на собираемость конструкции и дальнейшую работоспособность применяются байесовские сети (BBN) и процесс аналитической иерархии (АНР). АНР – это многокритериальный метод принятия решений, разработанный с целью решения сложных задач, содержащих различные альтернативы. Методология АНР делит сложную задачу на мелкие части, чтобы ранжировать иерархически, тем самым определяется относительная важность альтернатив. В эксперименте детали измеряют на предмет концентричности, перпендикулярности и биения. Эти данные сохраняются и структурируются для дальнейшего использования в прогнозировании сборки.

Однако к оптимизации сборочного процесса можно подойти и с другой стороны. На сегодняшний день все больше встречаются исследования отечественных и зарубежных научных деятелей, связанные с вопросом о незавершенном производстве и способах его снижения [4-10]. В

данной работе мы постараемся объединить эти два направления оптимизации сборочного процесса, чтобы получить наибольший эффект.

### ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКТАЦИИ СБОРКИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ТУРБИНЫ

Рассмотрим технологию сборочного процесса объекта исследования. Процесс сборки РК турбины носит сложный характер и включает в себя несколько так называемых «ложных сборок», по результатам которых осуществляется окончательный сборочный процесс (рис. 1).

Суть ложных сборок заключается в предварительной проверке собираемости лопаток с диском на предмет соответствия основных сборочных параметров значениям, указанным в технических требованиях сборочного чертежа. По результатам каждой ложной сборки следуют доводочные операции, например, такие как: шлифование бандажных полок лопаток (в связи с несоответствием одного из главных сборочных геометрических параметров – зазора между соседними лопатками по бандажному диаметру). Однако процесс сборки оказывается под влиянием многих факторов: точность оснастки, измерительного инструмента, погрешность и износ механообрабатывающего оборудования, человеческий фактор. Замен реальных операций ложных сборок предварительными компьютерными расчетами позволит сократить влияние вышеперечисленных факторов и повысить конечную точность сборочной единицы. В рамках исследования была разработана теоретико-вероятностная модель комплектации процесса сборки рабочего колеса турбины (рис. 2).

При сборке рабочего колеса турбины основным фактором работоспособности сборочной единицы является качество сборки диска с рабочими лопатками. Комплектация лопаток в соответствующих пазах диска определяется следующими требованиями:

- равномерностью распределения лопаток по массе или достижения заданного вектора дисбаланса;

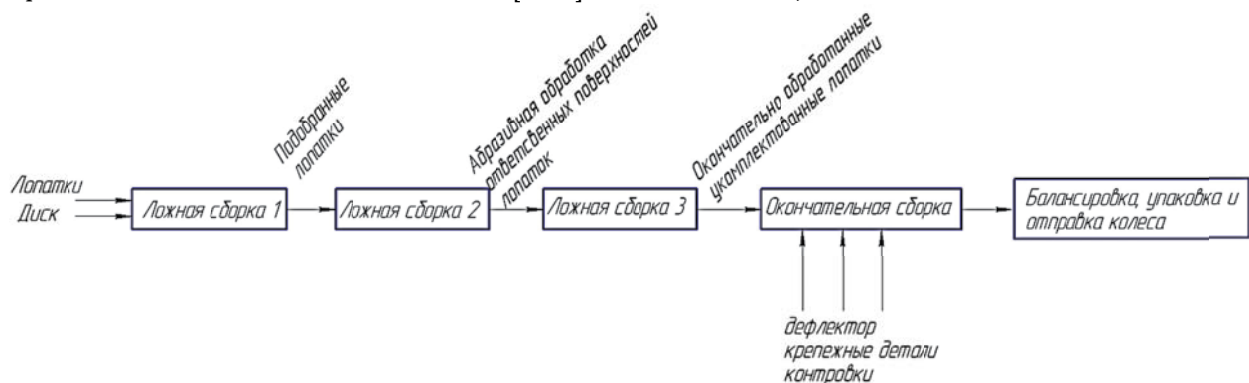


Рис. 1. Схема процесса сборки рабочего колеса турбины

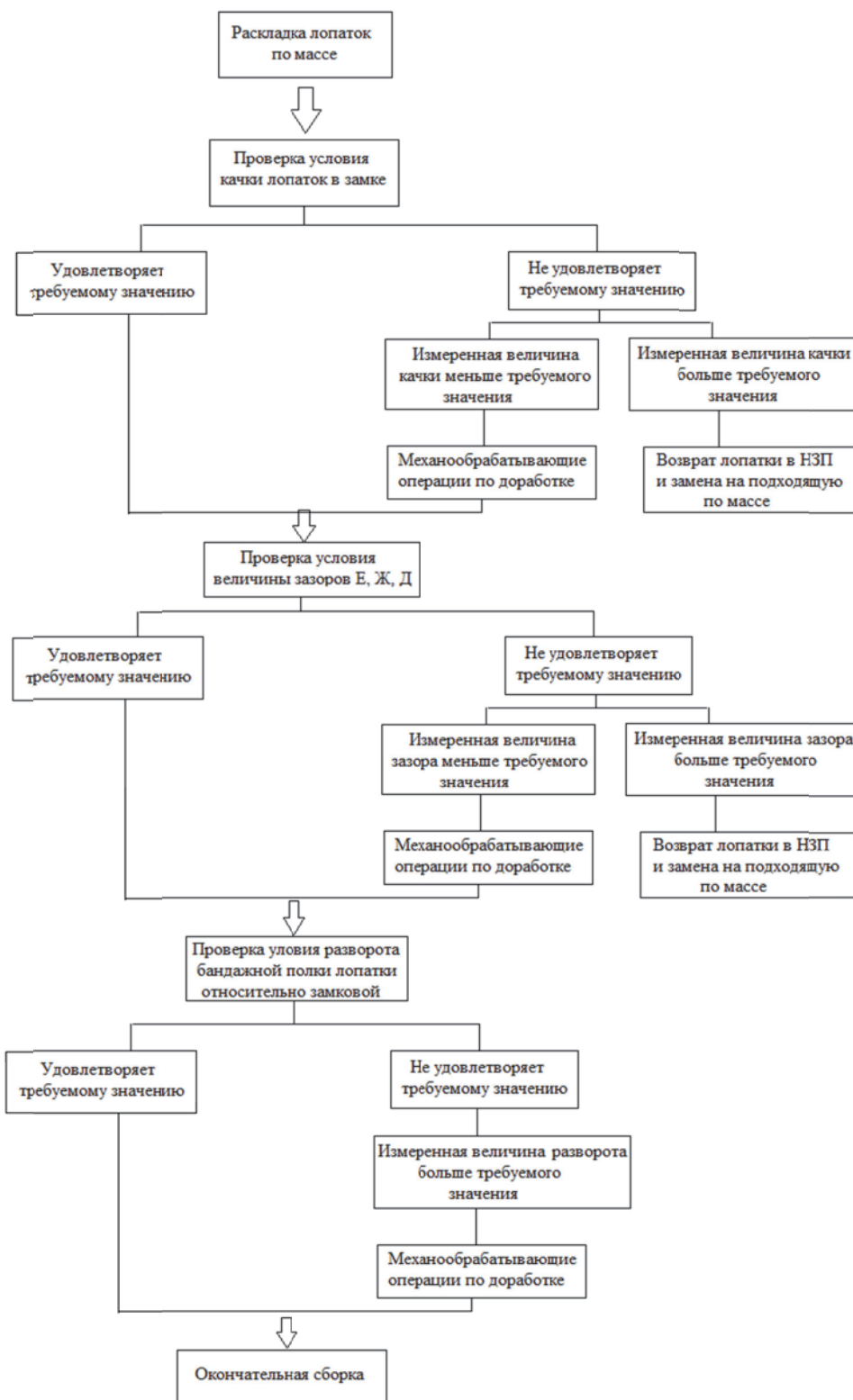


Рис. 2. Теоретико-вероятностная модель комплектации сборки рабочего колеса турбины

- величиной качки лопаток в диске, определяемой размерами замковой части;
- обеспечением зазоров Е, Ж, Д, в соответствии с рисунком 3;
- разворотом торцевой части бандажной полки относительно торцевой части замковой полки, что обеспечивает условие обеспечения заданного натяга Н.

Несоответствие вышеперечисленных условий требуемым значениям влечет за собой либо дополнительную обработку (доводочные операции), либо объявление лопатки бракованной и последующую её замену. Для этих целей при изготовлении лопаток формируют некоторый объем незавершенного производства (НЗП).

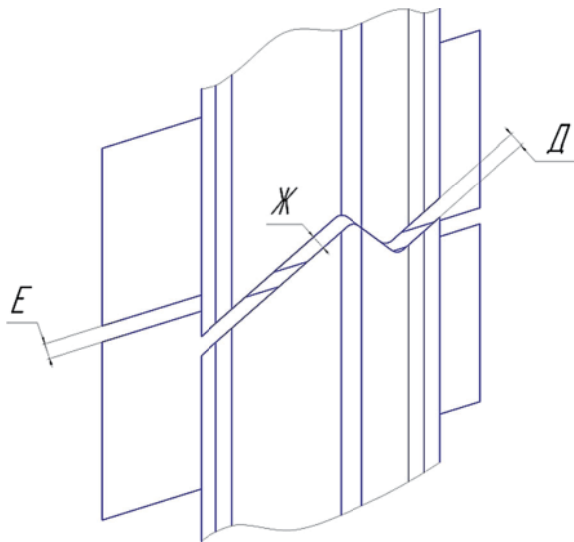


Рис. 3. Фрагмент рабочего колеса турбины

**РАСЧЕТ ОБЪЕМОВ  
НЕЗАВЕРШЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

В настоящее время количество лопаток, отливаемых в рамках незавершенного производства, весьма значительное, что существенно повышает общую стоимость производства рабочего колеса турбины. Особенно важно, что объем незавершенного производства складывается из количества НЗП, необходимого на каждом этапе изготовления лопаток (рис. 4).

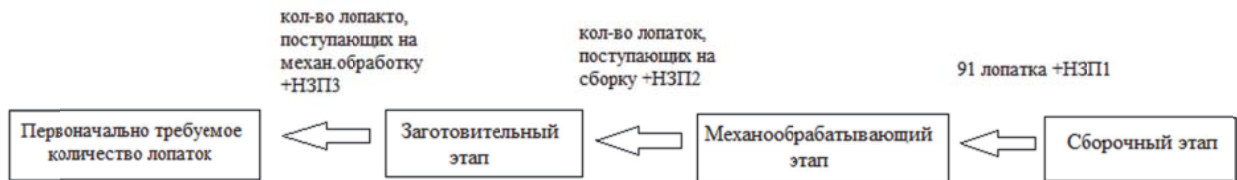


Рис. 4. Задел НЗП на различных стадиях производственного процесса

Сокращение объемов НЗП позволило бы повысить экономическую эффективность производства. В данной работе рассматривается суммарный задел НЗП, включающий в себя две составляющие: технологический задел – незавершенная продукция, находящаяся в непосредственном производстве, и страховой задел – определенный запас деталей, создаваемый для обеспечения бесперебойной работы линии в случае аварии или задержек поступления деталей из предыдущих участков производственного процесса.

Расчет технологического задела осуществляется по формуле (1):

$$Z_{max} = \frac{n_{опт} * T_{оп}}{П_{зап}}, \tag{1}$$

где  $n_{опт}$  – размер партии деталей в цехе, измеряется в штуках,

$T_{оп}$  – длительность обработки партии изделий по операциям в цехе,

$П_{зап}$  – периодичность запуска-выпуска для партии деталей, в сменах.

Расчет технологического задела осуществляется по формуле (2):

$$Z_{стр} = \frac{t_{мо} * N}{T_{пл}}, \tag{2}$$

где  $t_{мо}$  – время ожидания партии деталей между выпуском ее на предыдущем рабочем месте и запуском на последующем (время межоперационного ожидания), обычно принимают равным числу смен;

$T_{пл}$  – длительность планового периода производственной программы, измеряется в сменах;

$N$  – размер партии деталей, между выпуском на предыдущем и запуском на последующем, измеряется в штуках.

Согласно теоретико-вероятностной модели комплектации сборки рабочего колеса турбины, реализованной в программном пакете MATLAB, было определено, что для комплектации рабочего колеса (содержащего 91 лопатку) по величине качки лопаток в диске, необходимо иметь задел НЗП, равный 153 лопаткам (рис. 5).

Применяя эти данные при расчете объема незавершенного производства, получим следующие результаты (табл. 1). Расчеты проводились исходя из условий серийного производства, при выпуске в год 20 годных газотурбинных двигателей.

Из таблицы видно, что для комплектации рабочего колеса 91 лопаткой для 20 турбин необходимо учитывать незавершенное производство в объеме 1072 единицы. Теоретико-вероятностная

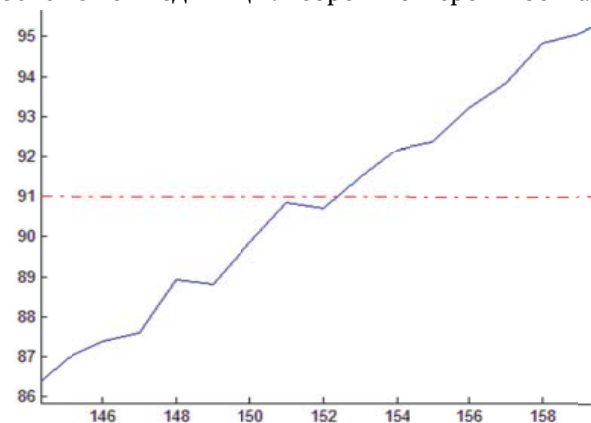


Рис. 5. Графическое решение количества НЗП по комплектации для условия соответствия величины качки

**Таблица 1.** Результаты расчета незавершенного производства для рабочего колеса турбины

Этапы производства/вид задела НЗП	Технологический, шт.	Страховой, шт.
Заготовительный	200	400
Механообрабатывающий	300	8
Сборочный	160	64
Всего	660	472

модель сборочного процесса колеса турбины ГТД позволят точно рассчитать величину объема незавершенного производства, что способствует повышению эффективности производства.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы модель была использована лишь для расчета НЗП, дальнейшее исследование предполагает расширение применения модели и изменение технологии сборки рабочего колеса турбины в виду отсутствия необходимости ложных сборок. Однако при этом большая ответственность возлагается на измерительную часть производственного процесса, т.к. от точности измерений будет напрямую зависеть точность расчета теоретико-вероятностной модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lars Tingelstada. Robotic assembly of aircraft engine components using a closed-loop alignment process / *Lars Tingelstada, Olav Egelanda* // *Procedia CIRP*. 2014. Т. 23. С. 110-115.
2. Multi-criteria retrieval of CAD assembly models / *Katia Lupinetti, Franca Giannini, Marina Monti, Jean-Philippe Pernot* // *Journal of Computational Design and Engineering*. 2018. Т. 5. С. 41-53.
3. *Pereira J.C.* Risk Assessment using Bayesian Belief

Networks and Analytic Hierarchy Process applicable to Jet Engine High Pressure Turbine Assembly / *J.C. Pereira, M.D. Fragoso, M.G. Todorov* // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Т. 49 (12). С. 133-138.

4. *Cehade A., Duffie N.* Optimal Dynamic Behavior of Adaptive WIP Regulation with Multiple Modes of Capacity Adjustment// *Robust Manufacturing Conference (RoMaC 2014), Procedia CIRP* 19.2014. С. 168 – 173.
5. *Nye T.J., Jewkes E.M., Dilts D.M.* Optimal investment in setup reduction in manufacturing systems with WIP inventories// *European Journal of Operational Research* Volume 135. Issue 1. 16 November 2001. с. 128-141.
6. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review / *Ray Y., Zhong, Xun Xu, Eberhard Klotz, Stephen T. Newman* // *Engineering* 3. 2017. С. 616-630.
7. *Papadopoulos H.T., Vidalis M.I.* Minimizing WIP inventory in reliable production lines// *International Journal of Production Economics* Volume 70. Issue 2. 21 March 2001.С. 185-197.
8. Assessment of fidelity of control-theoretic models of WIP regulation in networks of autonomous work systems / *V.Toshniwal, N.Duffie, T.Jagalskic, H.Rekersbrink, B.Scholz-Reiter* // *CIRP Annals* Volume 60. Issue 1. 2011. С. 485-488.
9. *Tsiotras G., Tapiero C.S.* WIP and CSP-1 quality control in a tandem queueing production system // *Computers & Mathematics with Applications* Volume 23. Issue 1. January 1992. С. 89-101.
10. *Yuan-Hung (Kevin) Ma, Koren Y.* Operation of Manufacturing Systems with Work-in-process Inventory and Production Control // *CIRP Annals* Volume 53. Issue 1. 2004. С. 361-365.

### THEORETICAL-PROBABILISTIC ESTIMATION OF THE VOLUME OF WORK IN PROGRESS IN THE ASSEMBLY OF THE TURBINE WHEEL

© 2019 M.A. Bolotov, T.V. Efremova, M.V. Yanyukina

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article presents a theoretical and probabilistic model of the turbine wheel assembly, which allows to complete the wheel disk with working blades in accordance with the required assembly parameters. The model includes a complete set of blades under the conditions of weight, pitching in the free position, the main gaps and the turn of the bandage shelf relative to the lock. On the basis of the intermediate results of the model, calculations of the necessary backlog of work in progress of blades are made, the reduction of which will reduce the cost of production and improve the efficiency of the process.

*Keywords:* assembly of turbine wheel, turbine, model of configuration.

*Michael Bolotov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Engine Production Technology Department.*

*E-mail: maikl.bol@gmail.com*

*Tatyana Efremova, Master's Degree Student.*

*E-mail: flame\_tt@mail.ru*

*Mariya Yanyukina, Graduate Student, Senior Lecturer at the Engineering Graphics Department. E-mail: mary392@mail.ru*