

УДК 531:62-251

## СИСТЕМНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИКИ И БАЛАНСИРОВКИ РОТОРОВ

**О.О. ПОЛУШКИН**

(Донской государственный технический университет)

*Представлены новые результаты фундаментальных исследований динамики роторов, позволившие реализовать системный подход к их балансировке на всех стадиях создания и функционирования машин любого назначения. Показаны примеры внедрения полученных результатов.*

**Ключевые слова:** ротор, балансировка, системный подход.

**Введение.** Современное состояние теории и практики балансировки ротационных агрегатов (роторов) машин характеризуется отсутствием обобщенного системного подхода к решению вопросов балансировки при проектировании, производстве, эксплуатации и ремонте машин. По этой причине (как установил проведенный анализ литературы по этим вопросам) на многие из них нет исчерпывающих ответов; ответы на другие опираются на использование примитивных моделей, на эмпирические данные и выработанные по ним нормативы, которые имеют значительные различия не только на межотраслевом, но и на внутриотраслевом уровнях для идентичных роторов. Так:

- теоретические основы механики и балансировки жёстких и нежёстких роторов, хотя и строятся на использовании одних и тех же понятий (дисбаланс, плоскость приведения, корректировка и др. [1]), не имеют общих предпосылок для совместного их рассмотрения. Этим и обусловлено их отдельное и несвязное развитие. Вместе с тем, используя в качестве такой предпосылки рабочую гипотезу о конечной изгибной податливости оси любого ротора, можно совместить рассмотрение вопросов механики и балансировки жёстких и нежёстких роторов, построив общий теоретический фундамент для моделирования их динамики;

- отсутствуют разработки по объективному критериальному разграничению классов жёстких и нежёстких роторов. По этой причине до настоящего времени нет строгого и корректного определения понятия «жёсткий ротор». Не только в различных источниках, но даже в пределах одного (например, [2]) приводятся различные определения этого понятия, вплоть до того, что тот же справочник отдаёт решение вопроса о принадлежности ротора к классу жестких на субъективное решение конструктора без обоснования этого решения корректными расчетами;

- большинство исследований по механике и балансировке роторов выполнено применительно к жёстким их конструкциям в тривиальном их представлении. Поэтому во многих отраслях машиностроения априори принимают роторы жёсткими для использования уже разработанных и достаточно апробированных методик решения всех вопросов их балансировки. Такой подход недопустим, так как приводит к крайне негативному результату: при эксплуатации нежёсткого ротора, сбалансированного как жёсткий на низкой частоте вращения, могут возникнуть его чрезмерные разбалансировки и вибрации, приводящие к аварийным ситуациям;

- не созданы достаточно адекватные динамические модели балансируемого ротора на балансирующем станке. Это служит тормозом развития и совершенствования балансирующего оборудования как в вопросах повышения его точности, снижения трудоемкости (числа пусков) при балансировке жёстких роторов, так и в вопросах адаптации существующих и при разработке новых (доныне не существующих) технологий и оборудования для балансировки нежёстких роторов;

- отсутствуют достаточно адекватные динамические модели неуравновешенного ротора на машине. Без этого невозможно создание эффективного балансирующего портативного комплекта, позволяющего балансировать роторы в эксплуатации без разборки машины. Кроме того, это

не позволяет строить надёжные поисковые вибродиагностические системы оценки качества балансировки роторов машины при её испытаниях на выходе производства;

- до конца не разработаны как теоретические обоснования, так и рабочие методики балансировки многоопорных жёстких роторов; без этих методик невозможно создание эффективного оборудования для практической реализации балансировки таких роторов; невозможна балансировка таких роторов на месте. В настоящее время балансировка многоопорных роторов (например, турбоагрегаты на электростанциях, многоопорные высокооборотные карданные передачи и пр.) осуществляется отдельной балансировкой в собранном изделии и с помощью обходного груза [2]. Оба метода требуют значительных трудозатрат реализации;

- балансировка нежёстких роторов до последнего времени не имела общей теоретической основы, раскрывающей закономерности динамики таких роторов. Как результат, каждая отрасль машиностроения, сталкиваясь с необходимостью балансировки таких роторов, разрабатывала свои отраслевые методики, которые существенно различались для идентичных конструкций роторов, не обеспечивая, зачастую, требуемого качества балансировки;

- существующее балансировочное оборудование использует аналоговую аппаратную фильтрацию сложных колебательных процессов для выделения в них гармоник, генерируемых неуравновешенностью ротора [2]. Замеры характеристик этих гармоник осуществляются при этом со значительными ошибками.

Таким образом, решение вопросов балансировки становится проблемой, выход из которой может быть найден лишь системным подходом к совместному рассмотрению полного их комплекса на всех стадиях создания и функционирования машин. Этот подход может быть реализован только на основе глубокой научной проработки фундаментальных вопросов механики ротационного агрегата машины вне зависимости от её отраслевой принадлежности.

Ниже представлены результаты выполненных на кафедре «Теория механизмов и машин» ДГТУ фундаментальных исследований и прикладных разработок, позволивших реализовать системный подход к решению задач балансировки и получить качественно новые технологии и технические средства балансировки ротационных агрегатов машин самого различного назначения.

**Новый теоретический подход к идентификации дисбалансов.** Теоретическое рассмотрение динамики ротационного агрегата в виде нежёсткого ротора, имеющего исходное пространственное искривление оси по  $n=1,2,3,\dots$  собственным формам, позволило установить и аналитически описать новые закономерности упругой деформации его оси и связанных с нею дисбалансов, возникающих при вращении ротора с различной скоростью. Созданные на этой основе принципиально новые механико-математические модели неуравновешенности, имеющие (в сравнении с существующими) значительно более высокий уровень адекватности, могут эффективно использоваться при балансировке ротора по любой  $n$ -й собственной форме. Разработанная методика идентификации параметров таких моделей, характеризующих их собственные свойства, позволяет достоверно и надёжно решать эту задачу как при проектных расчётах, так и при балансировке конкретного изделия. Впервые разработка и использование такой модели для ротора, балансируемого по первой собственной форме, была представлена в работе [3].

Предложенная (теоретически обоснованная и практически апробированная) математическая фильтрация полигармонических колебательных процессов со случайными составляющими по алгоритму рекуррентного метода наименьших квадратов [4], в отличие от существующих методов аналоговой фильтрации таких процессов, позволяет надёжно и точно выделять требуемую гармонику с дисперсией до 5% от суммарной дисперсии колебательного процесса. Это обеспечивает качественно новый уровень идентификации характеристик (амплитуды и фазы) колебаний опор ротора при его балансировке – единственный источник информации о динамической неуравновешенности балансируемого ротора.

Принципиально новый подход к идентификации колебаний опор ротора, генерируемых на частоте вращения его неуравновешенностью при наличии сторонних источников колебаний той

же частоты, не связанных с неуравновешенностью ротора, и разработанный обобщенный алгоритм решения этой задачи позволяют с недостижимыми до настоящего времени уровнями достоверности, надёжности и точности определять характеристики неуравновешенности ротора при его балансировке на месте.

Введение в теорию и практику балансировки роторов понятия векторного коэффициента  $\bar{k}_{ij}$  влияния дисбаланса в  $j$ -й плоскости приведения (коррекции) на характеристики колебаний  $i$ -й опоры ротора (на станке или на месте) [5] позволило построить обобщённую механико-математическую модель динамики  $n$ -опорного ротора с  $n$  плоскостями коррекции, адекватность которой многократно превышает адекватность существующих моделей. Разработанный метод идентификации параметров такой модели гарантирует надёжность и точность решения этой задачи при реализации балансировки на станке или на месте. Предложенная теория открывает перспективы создания балансировочного оборудования нового поколения.

**Области применения нового теоретического подхода.** Раскрытие отмеченных выше новых закономерностей механики нежёсткого ротора позволило поставить на общую теоретическую основу решение всех задач проектирования уравновешенных конструкций ротационного агрегата любых машин:

- обеспечение инерционной симметрии ротационного агрегата;
- обоснование необходимости его балансировки;
- обоснование метода балансировки агрегата и (или) его сборочных единиц;
- обоснование класса ротора, методики и конструктивных нормативов его балансировки;
- обоснование конструктивных нормативов балансировки ротора, его сборочных единиц;
- обоснование числа и местоположения плоскостей коррекции;
- отстройка критических частот.

Разработка формализованных для использования ЭВМ алгоритмов решения этих задач служит основой создания не существующей ныне САПР по проектированию уравновешенных ротационных агрегатов машин любого назначения. Разработанный алгоритм функционирования этой САПР представлен на рис. 1, где блоками predetermined операций показаны задачи балансировки проектируемого ротационного агрегата машины, решение которых осуществляется уже известными и хорошо апробированными методами.

Использование отмеченных выше новых механико-математических моделей неуравновешенности балансируемого ротора и его динамики позволило на этой теоретической основе ставить и решать такие новые прикладные задачи технологической подготовки работ по балансировке, как:

- разработка новой технологии балансировки ротора с конечными изменениями геометрии;
- разработка рациональной технологии балансировки роторов с шарнирными рабочими элементами (с малыми изменениями геометрии) и теоретическое обоснование минимальной скорости  $\omega_s$  их балансировки;
- априорное прогнозирование практически предельных значений корректирующих масс нежёсткого ротора;
- дискретизация масс корректирующих элементов;
- формализация распределения корректирующих элементов по точкам их возможного размещения.

Решение всех этих задач служит основой создания САПР ТПП по балансировке, гарантированно обеспечивающей требуемую уравновешенность ротора в эксплуатации, ликвидацию брака изделий по их небалансировке и значительно снижающей затраты балансировки.

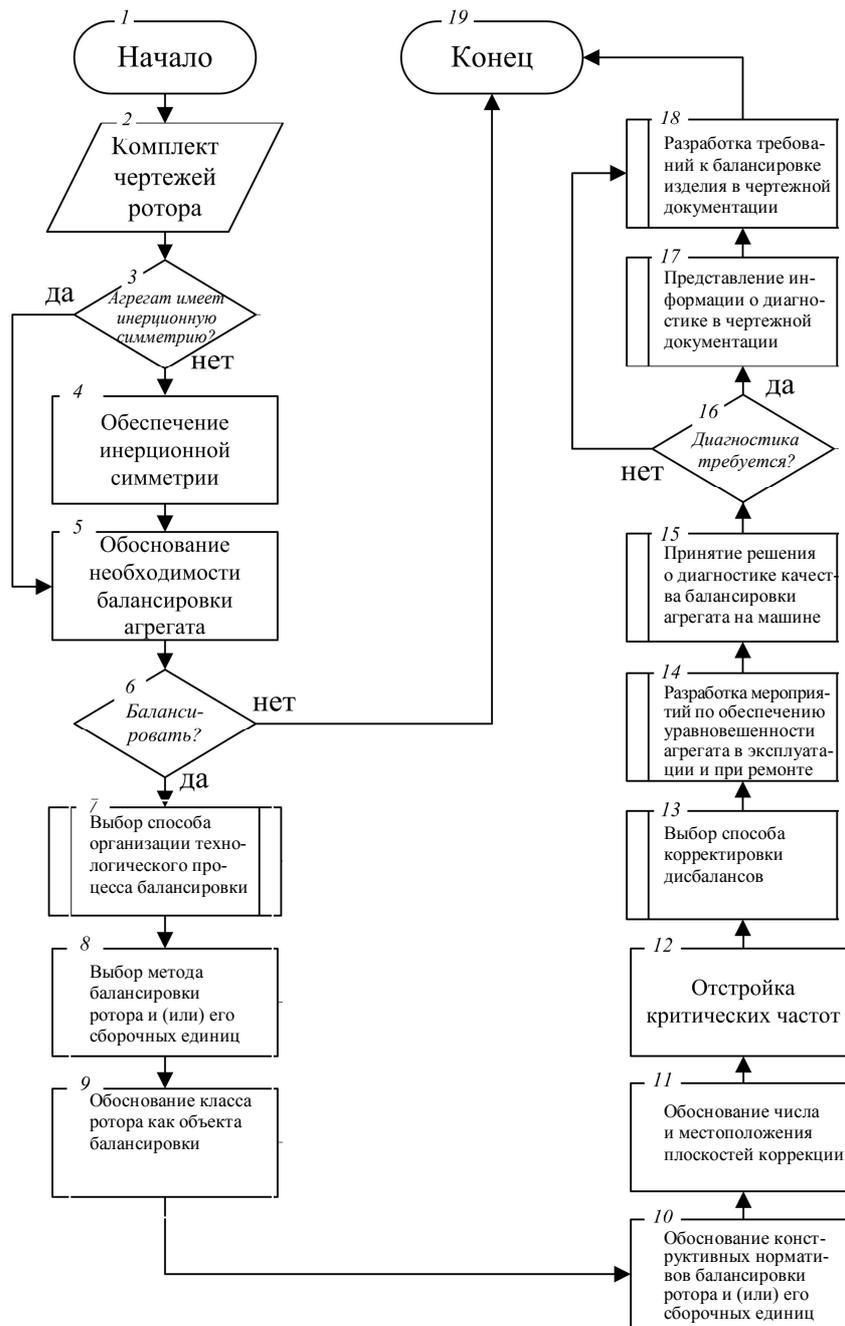


Рис. 1. Алгоритм функционирования САПР по проектированию уравновешенных конструкций ротационных агрегатов машин

На рис. 2 представлен алгоритм функционирования такой САПР, где, как и на рис. 1, блоками predetermined операций показаны задачи, адекватное решение которых находится существующими методами. В пояснение этого алгоритма отметим:

- вводимое в блоке 2 значение  $n$  – определенное по чертежной документации число балансируемых деталей и сборочных единиц рассматриваемого ротационного агрегата;
- вводимое в блоке 4 значение  $u = 0$ , если  $i$ -е изделие балансируется статически при помощи силы тяжести;  $u = 1$ , если изделие балансируется динамически;  $u = 2$ , если изделие балансируется статически в динамическом режиме. Вводимое там же значение  $q = 0$ , если балансируе-

мое изделие не меняет своей геометрии при функционировании;  $q=1$  – при малых и  $q=2$  – при конечных изменениях геометрии балансируемого изделия при его функционировании в машине.

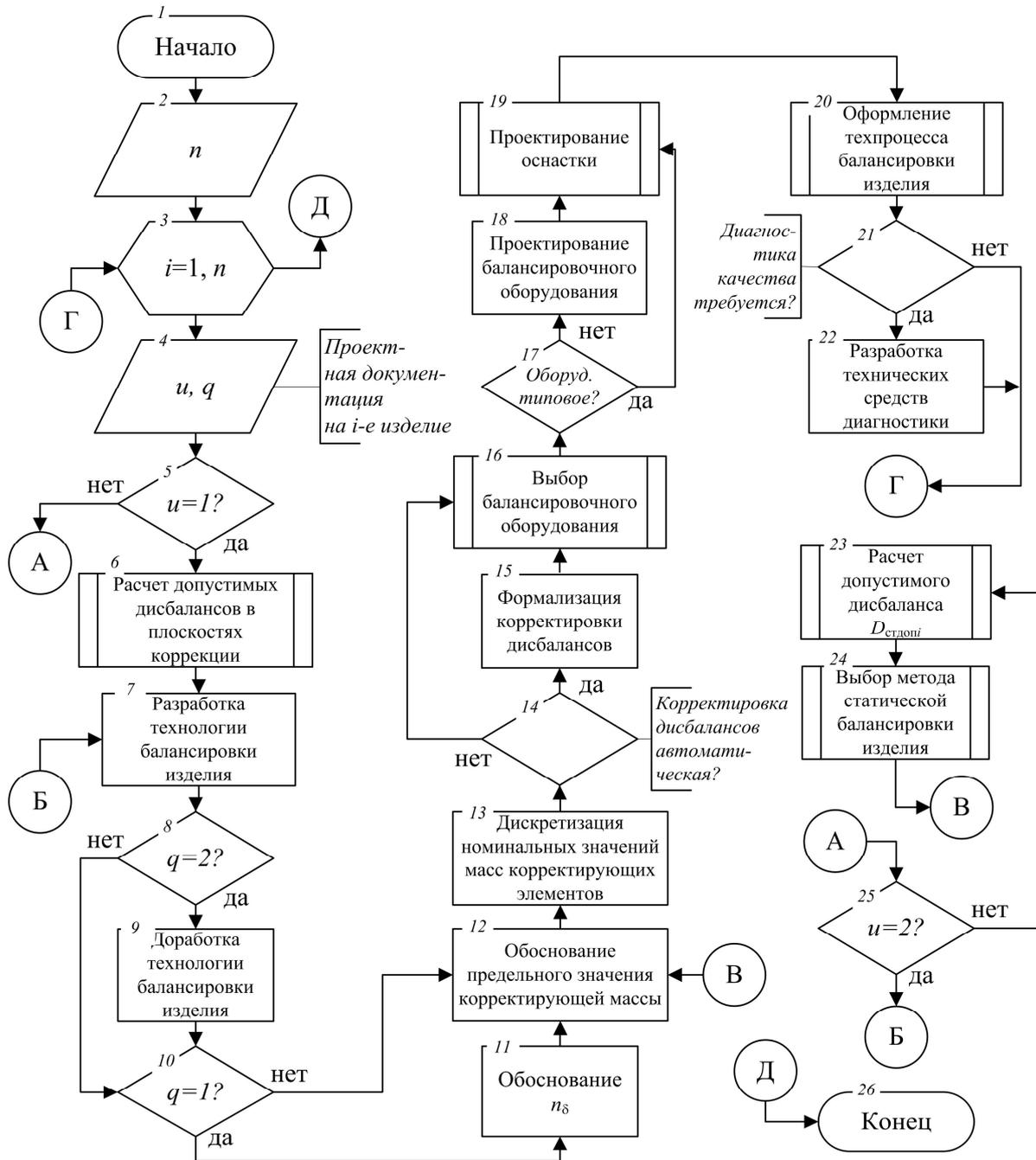


Рис. 2. Алгоритм функционирования САПР ТПП работ по балансировке роторного агрегата машины

Использование в конструкциях балансировочного оборудования управляемого частотно регулируемого привода [6] (балансировочные станки), а также оригинальных методик оценки характеристик колебаний опор ротора и идентификации дисбалансов изделий, реализуемых с по-

мощью компьютера (балансировочные станки и балансировочные комплекты), позволяет создать балансировочное оборудование нового поколения.

Балансировочный станок, создаваемый на отмеченной основе, имея специальное или специализированное назначение, в отличие от современных станков может эффективно использоваться для балансировки самых различных изделий серийного и единичного производства, не требуя для этого изменения конструкции и измерительной системы.

Алгоритмически функционирующий балансировочный комплект, создаваемый на той же основе, и разработанная технология его использования дают гарантию качества балансировки агрегата на месте. Он может быть рекомендован к использованию в любых отраслях машиностроения как средство диагностики в производстве и как средство балансировки в эксплуатации и при ремонте машин.

**Апробация и внедрение разработок.** Результаты прикладных исследований получили апробацию их широким внедрением в практику проектирования, производства и ремонта машин самого различного назначения:

- обоснованы конструктивные и технологические нормативы балансировки барабанов измельчителей зерноуборочных комбайнов, отнесённых к классу квазижестких роторов [7]. Они коренным образом отличаются от нормативов, которые были приняты проектировщиком для этого агрегата, необоснованно интерпретируемого как жесткий ротор. Эти нормативы внедрены как в конструкцию, так и в технологию балансировки этого агрегата в ООО «КЗ "Ростсельмаш"»;

- по заказам предприятий осуществлены модернизация трёх и изготовление ещё трёх оригинальных балансировочных станков нового поколения. Все они безотказно и эффективно работают (некоторые уже более трёх лет), не теряя своих преимуществ перед отечественными и зарубежными аналогами производства известных фирм (рис. 3);

- изготовленный балансировочный комплект нового поколения (рис. 4) был эффективно использован для балансировки на месте карданных валов автомобилей (в 2010 г. эту балансировку прошло более 150 автомобилей), вентиляторов проточно-отопительных систем производственных цехов, барабанов измельчителей зерноуборочных комбайнов, барабанов стенда измерения мощности автомобиля и других ротационных агрегатов машин после их ремонта.



Рис. 3. Балансировочный станок нового поколения, созданный в ДГТУ для ООО «Новатор-Плюс» (г. Ростов-на-Дону)

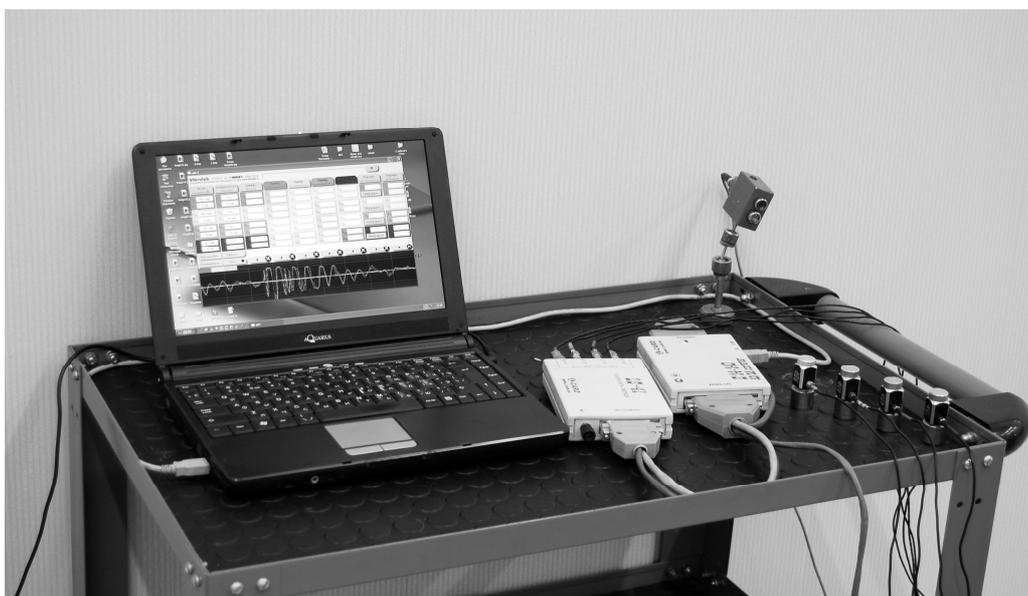


Рис. 4. Балансировочный комплект нового поколения

**Заключение.** Представленный выше системный подход к созданию уравновешенных конструкций ротационных агрегатов машин, основанный на раскрытии новых закономерностей механики таких агрегатов, и его использование для решения всего комплекса прикладных задач балансировки при проектировании, производстве, эксплуатации и ремонте машин следует признать существенным вкладом в развитие современной теории и практики балансировки, позволяющим на общей теоретической основе решать эти задачи в любой отрасли машиностроения.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 19534. Балансировка вращающихся тел. Термины. – М.: Издательство стандартов, 1974. – 29 с.
2. Справочник по балансировке / М.Е. Левит [и др.]; под общ. ред. М.Е. Левита. – М.: Машиностроение, 1992. – 464 с.
3. Полушкин О.А. Механика квазигибкой роторной системы / О.А. Полушкин, О.О. Полушкин // Вест. Донск. гос. техн. ун-та. – 1999. – С. 88–94.
4. Лукьянов А.Д. Рекурсивный алгоритм наименьших квадратов в микропроцессорной системе балансировки ротора / А.Д. Лукьянов // Современные проблемы информатизации в технике и в технологиях. Вып. 13 : сб. тр. – Воронеж: Научная книга, 2008. – С. 301–302.
5. Полушкин О.А. Идентификация дисбалансов двухопорного жесткого ротора – новый подход / О.А. Полушкин, О.О. Полушкин // Труды VIII Междунар. науч.-техн. конф. по динамике технологических систем. – Т. 3. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. – С. 183–187.
6. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учеб. для вузов / Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН, 2003. – 320 с.
7. Савенков М.В. Моделирование технологического процесса балансировки барабанов измельчителей зерноуборочных комбайнов / М.В. Савенков, О.А. Полушкин, О.О. Полушкин // Известия ТулГУ. Серия «Проблемы сельскохозяйственного машиностроения». Вып. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – С. 172–178.

Материал поступил в редакцию 01.06.11.

## References

1. GOST 19534. Balansirovka vrashhayushixsya tel. Terminy` . – M.: Izdatel`stvo standartov, 1974. – 29 s. – In Russian.
2. Spravochnik po balansirovke / M.E. Levit [i dr.]; pod obshh. red. M.E. Levita. – M.: Mashinostroenie, 1992. – 464 s. – In Russian.
3. Polushkin O.A. Mexanika kvazigibkoj rotornoj sistemy` / O.A. Polushkin, O.O. Polushkin // Vest. Donsk. gos. texn. un-ta. – 1999. – S. 88–94. – In Russian.
4. Luk`yanov A.D. Rekursivny`j algoritm naimen`shix kvadratov v mikroprocessornoj sisteme balansirovki rotora / A.D. Luk`yanov // Sovremenny`e problemy` informatizacii v texnike i v texnologiyax. Vy`p. 13 : sb. tr. – Voronezh: Nauchnaya kniga, 2008. – S. 301–302. – In Russian.
5. Polushkin O.A. Identifikaciya disbalansov dvuxopornogo zhyostkogo rotora – novy`j podxod / O.A. Polushkin, O.O. Polushkin // Trudy` VIII Mezhdunar. nauch.-texn. konf. po dinamike texnologicheskix sistem. – T. 3. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2007. – S. 183–187. – In Russian.
6. Onishhenko G.B. E`lektricheskij privod: ucheb. dlya vuzov / G.B. Onishhenko. – M.: RASXN, 2003. – 320 s. – In Russian.
7. Savenkov M.V. Modelirovanie texnologicheskogo processa balansirovki barabanov izmel`chitelej zernouborochny`x kombajnov / M.V. Savenkov, O.A. Polushkin, O.O. Polushkin // Izvestiya TulGU. Seriya «Problemy` sel`skoxozyajstvennogo mashinostroeniya». Vy`p. 1. – Tula: Izd-vo TulGU, 2004. – S. 172–178. – In Russian.

## SYSTEM REGULARITY OF MECHANICS AND ROTOR BALANCING

### O.O. POLUSHKIN

(Don State Technical University)

*New results of the rotor dynamics fundamental research are presented. These results permit to realize the system approach to the rotor balancing at all stages of the creation and operation of the omni-purpose machines. The results implementation is exemplified.*

**Keywords:** rotor, balancing, system approach.