

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА МОДЕЛИ РОТОРА ТУРБОМАШИНЫ АТОМНОЙ СТАНЦИИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕАКТОРОМ

И. В. Друмов, С. В. Елин

ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Введение

В настоящее время во всем мире ведутся работы по поиску альтернативных видов топлива, которые со временем придут на смену нефти и газу [1]. Одной из наиболее перспективных альтернатив может стать водородное топливо, дающее в качестве выхлопа обычный водяной пар. Водород по своей «калорийности» почти в 4 раза превосходит бензин. Производство водорода в промышленных масштабах может осуществляться с использованием тепловой энергии ядерных высокотемпературных реакторов. Современные проекты таких реакторов обещают понизить себестоимость водородного топлива до уровня цены бензина, а может быть и ниже.

В ОКБМ работы по высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам (ВТГР) ведутся с 1974 г. ВТГР является принципиально новым экологически чистым универсальным атомным энергоисточником. Его уникальные свойства – способность вырабатывать тепло с температурой теплоносителя до 1000 °С и высокий уровень безопасности – определяют широкие возможности по использованию этого типа реактора для снабжения теплом технологических

производств в различных энергоемких отраслях промышленности, для производства электроэнергии с высоким КПД и для экономичного производства водородного топлива.

На рис. 1 представлена общая схема ядерной энергетической установки с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором в системе электроснабжения [2, 3, 4]. В реакторе происходит управляемая ядерная реакция, сопровождаемая нагревом теплоносителя. Управление этой реакцией, а также управление другими процессами на АЭС осуществляется автоматизированной системой управления технологическими процессами. Нагретый теплоноситель из реактора поступает в блок преобразования энергии, где он производит работу, связанную с вращением ротора турбомашины. Теплоноситель при этом охлаждается и возвращается в реактор. Генератор, являющийся частью турбомашины, преобразует энергию вращения в электрическую энергию. Поскольку частота вращения ротора турбомашины и требования к частоте напряжения, выдаваемого в электрическую сеть, в общем случае могут отличаться, то в составе оборудования предусматривается мощный преобразователь частоты.

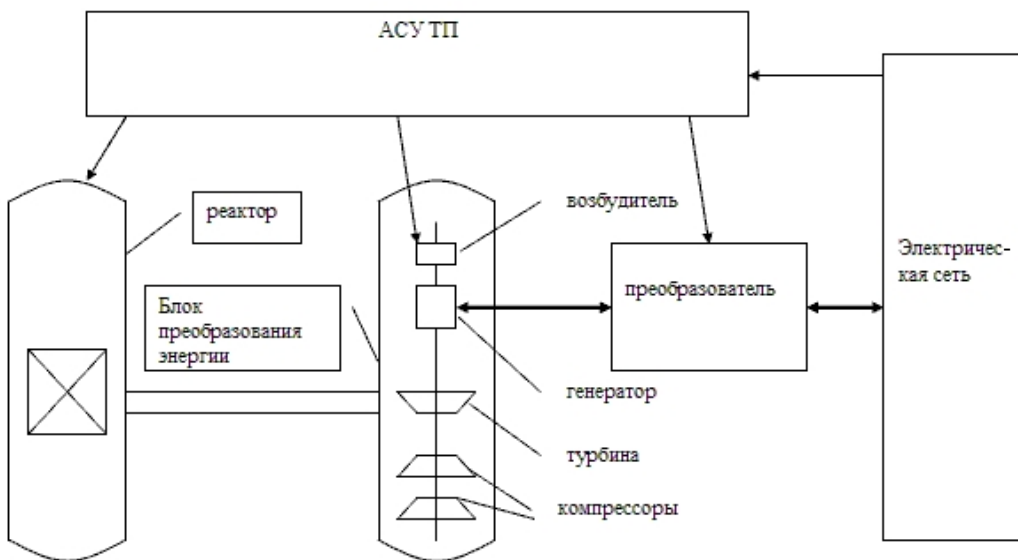


Рис. 1. Общая схема ядерной энергетической установки

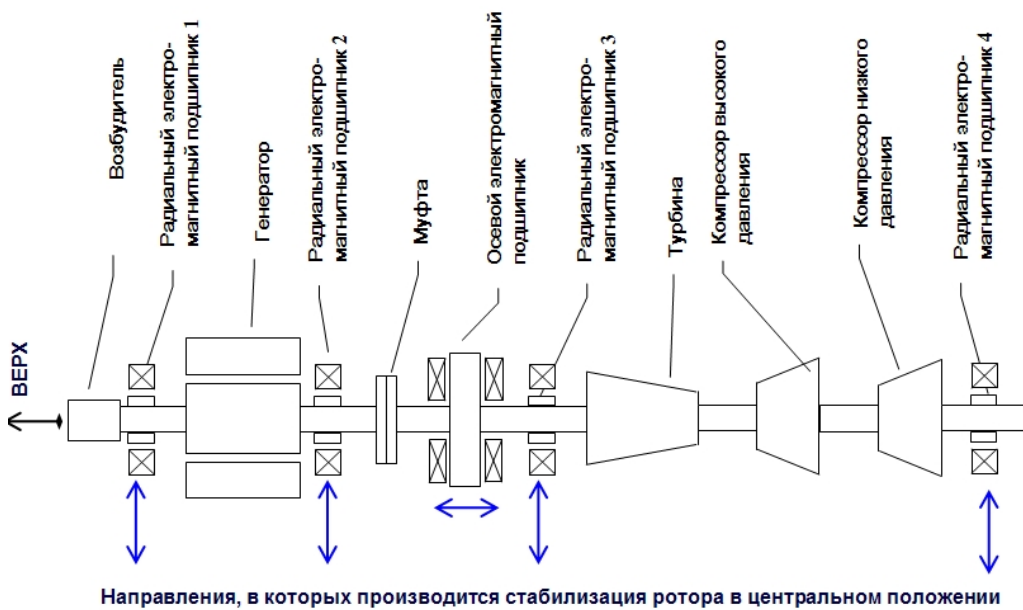


Рис. 2. Схема турбомашины

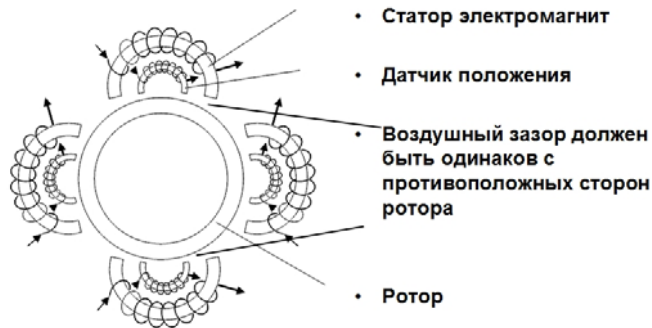


Рис. 3. Схемы РЭМП

Использование электромагнитного подвеса ротора турбомашины АС с ВТГР

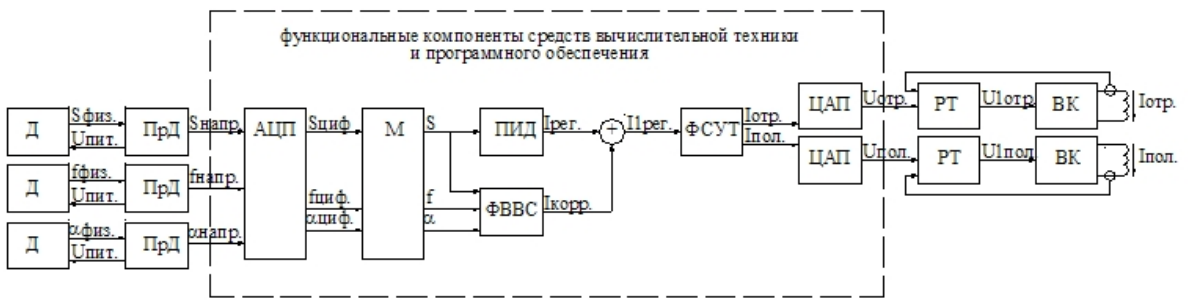
Одной из отличительных черт данного типа ЯЭУ является герметичность основного контура циркуляции гелия, проходящего через реактор и блок преобразования энергии, что исключает возможность использования масляных систем в контуре, в том числе масляных подшипников для турбомашин. Поэтому в составе блока преобразования энергии атомной станции с высокотемпературным газовым реактором проектом предусмотрено использование турбомашин с ротором на электромагнитных подшипниках [5]. На рис. 2 представлено схематичное изображение турбомашин, показаны основные составные части турбомашин – турбокомпрессор, генератор, турбина, муфта, а также радиальные и осевые электромагнитные подшипники. Активные подшипники могут выпускаться в виде радиальных с цилиндрическим зазором, упорных с плоским зазором и радиально-упорных подшипников с коническим зазором. Полный электромагнитный подвес

ротора состоит, как правило, из двух радиальных и одного упорного подшипников. Стрелками обозначены направления, в которых активные электромагнитные подшипники стабилизируют роторы генератора и турбокомпрессора.

Система электромагнитного подвеса ротора

На рис. 3 представлена принципиальная схема радиального активного магнитного подшипника. Четыре электромагнита и четыре датчика положения расположены равномерно по окружности диаметрально противоположно. Роторная часть подшипника или ротор, выполненный из ферромагнитного материала «плавает» в магнитном поле, созданном четырьмя электромагнитами. Под воздействием электромагнитных сил ротор находится в состоянии равновесия. Положение ротора в рабочем зазоре опоры определяется с помощью датчиков, которые непрерывно фиксируют все возможные перемещения.

Управление работой системы электромагнитных подшипников производится системой управления [6, 7].



Д – датчик, ПрД – преобразователь датчика, АЦП – аналого – цифровой преобразователь, М – блок масштабирования, ПИД – ПИД – регулятор положения ротора, ФВВС – блок формирования вектора виртуальных сил, ФСУТ – блок формирования сигналов управления током, ЦАП – цифро – аналоговый преобразователь, РТ – регулятор тока, ВК – выходной каскад, S физ., Sнапр., Sциф., S – смещение ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой форме и в цифровой форме масштабированное соответственно, f физ., fнапр., fциф., f – частота вращения ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой форме и в цифровой форме масштабированная соответственно, α физ., αнапр., αциф., α – угловое положение ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой форме и в цифровой форме масштабированное соответственно, Iрег. – ток регулятора, Iкорр. – ток коррекции, Iупр. – ток регулятора с учетом тока коррекции, Iотр. и Iпол. – заданные токи обмоток, расположенных в направлении отрицательных и положительных значений смещения соответственно, Uпит. – напряжение питания, Uотр. и Uпол. – напряжения, задающие регулятору тока требуемую величину тока «отрицательной» и «положительной» обмоток, U1отр. и U1пол. – напряжения, управляющие выходным каскадом «отрицательной» и «положительной» обмоток

Рис. 4. Функциональная схема управления положением ротора по одному каналу

На рис. 4 представлена функциональная схема реализации управления положением ротора по одному каналу. Данная функциональная схема обеспечивает управление положением ротора в электромагнитном подшипнике (ЭМП) по одной координате и входит в состав одного канала управления. Количество таких каналов определяется количеством координат. Осевой ЭМП обеспечивает управление положением ротора по одной координате (Z), каждый из четырех радиальных ЭМП обеспечивает управление положением ротора по двум координатам (X и Y) относительно вертикальной оси радиального ЭМП (РЭМП). Учитывая рассматриваемую структуру многоопорной системы, количество каналов управления положением ротора в ЭМП составляет девять (без учета резервирования).

Пунктиром на схеме выделены блоки, функции которых реализуются при помощи средств вычислительной техники и программного обеспечения. Для реализации управления положением ротора контроллеры должны обеспечивать выполнение следующих функций:

Аналого – цифровое преобразование представляет собой преобразование аналогового сигнала датчика (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от минус 5 до 5 В) в n -разрядное двоичное число.

Масштабирование принятых значений сигналов представляет собой пересчет полученных значений входных сигналов в форме n -разрядных двоичных чисел в значения переменных, имеющих размерность и масштаб измеряемых физических величин в соответствии с измерительными характеристиками измерительных каналов «датчик – преобразователь датчика».

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор положения ротора, вычисляющий ток регулирования по формуле:

$$I_{рег.}(t) = K_p \cdot S(t) + K_d \cdot (S(t) - S(t-\Delta t)) / \Delta t + K_i \cdot S(t) \cdot \Delta t + Int(t),$$

где K_p – коэффициент пропорциональности регулятора, А/мм; K_d – коэффициент дифференцирования регулятора, А·с/мм; K_i – коэффициент интегрирования регулятора, А/(мм·с); $S(t)$ – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени t , мм; $S(t-\Delta t)$ – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени $t-\Delta t$, мм; t – время, с; Δt – время цикла работы управляющего контроллера, с; $Int(t)$ – интегральная составляющая, накопленная к моменту времени t , А.

Формирование вектора виртуальных сил представляет собой вычисление значения тока коррекции $I_{корр.}$ по формуле:

$$I_{корр.} = I_{амп.} \cdot \sin(\alpha + \varphi),$$

где $I_{амп.}$ – величина вектора виртуальных сил, А; α – угловое положение ротора, °; φ – угловое направление вектора виртуальных сил по оси I , °.

При этом формирование вектора производится не постоянно, а только при определенных значениях частоты вращения ротора f , когда это значение находится в пределах одного из диапазонов резонансных частот ротора турбомшины (ТМ).

Формирование сигналов управления токами в обмотках электромагнитов ЭМП представляет собой вычисление значений выходных напряжений контроллера для управления двумя противоположными обмотками электромагнитов по управляемой координате.

Цифро-аналоговое преобразование представляет собой преобразование в n -разрядного двоичного числа в аналоговый сигнал (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от 0 до 5 В).

Постановка задачи экспериментальных исследований

Опорные системы электромагнитных подшипников уже более 20 лет эксплуатируются в различных типах машин. Однако, вертикальный ротор весом в несколько десятков тонн, вывешенный в электромагнитных подшипниках с зазором в десятые доли миллиметра относительно статора, и, имеющий четыре критические частоты, две из которых изгибные, делает конструкцию турбомашин уникальной. Для подтверждения работоспособности такой конструкции требуется не только расчетное обоснование, но и экспериментальное подтверждение.

Одними из важнейших направлений экспериментальных исследований являются:

- отработка методики физической балансировки ротора на электромагнитных подшипниках;
- определение законов управления положением ротора, обеспечивающих его удержание в заданных границах в условиях полного электромагнитного подвеса при вращении, в том числе на резонансных частотах, в условиях воздействия внешних сил;
- применение системы управления электромагнитными подшипниками для компенсации дисбаланса.

Для проведения этих исследований в ОКБМ созданы несколько исследовательских стендов, которые позволяют подтвердить принципиальную возможность применения электромагнитного подвеса в установке подобной конструкции, получить реальные данные, позволяющие верифицировать методики расчетов и расчетные коды.

В настоящем докладе описаны некоторые результаты экспериментальных исследований.

Отработка методов физической балансировки

На рис. 5 представлены формы колебаний вращающегося ротора на полном электромагнитном подвесе. Эти формы соответствуют четырем критическим частотам ротора, причем третья и четвертая соответствуют изгибным частотам. Задача балансировки ротора в ЭМП [8, 9] сводится к идентификации форм колебаний ротора, определению углового направления и величины остаточного дисбаланса по каждой форме и расчету величин грузов, компенсирующих таким образом дисбаланс. Балансировка ротора проведена на каждой критической частоте, определенной по результатам снятия амплитудно-частотной характеристики. При проведении балансировки ротора были вычислены корректирующие грузы для варианта балансировки ротора по четырем формам колебаний. После установки системы балансировочных грузов на ротор было зафиксировано заметное снижение амплитуды колебаний ротора в районе ЭМП в диапазоне частот вращения до 6000 об/мин. Таким образом, была частично верифицирована методика балансировки гибкого вертикального ротора в электромагнитном подвесе.

Определение законов управления положением ротора, обеспечивающих его удержание в заданных границах в условиях полного электромагнитного подвеса

При проведении расчетных исследований динамики ротора для пропорционально-дифференциального (ПД) – регулятора рассчитывается область устойчивости в координатах настроечных коэффи-

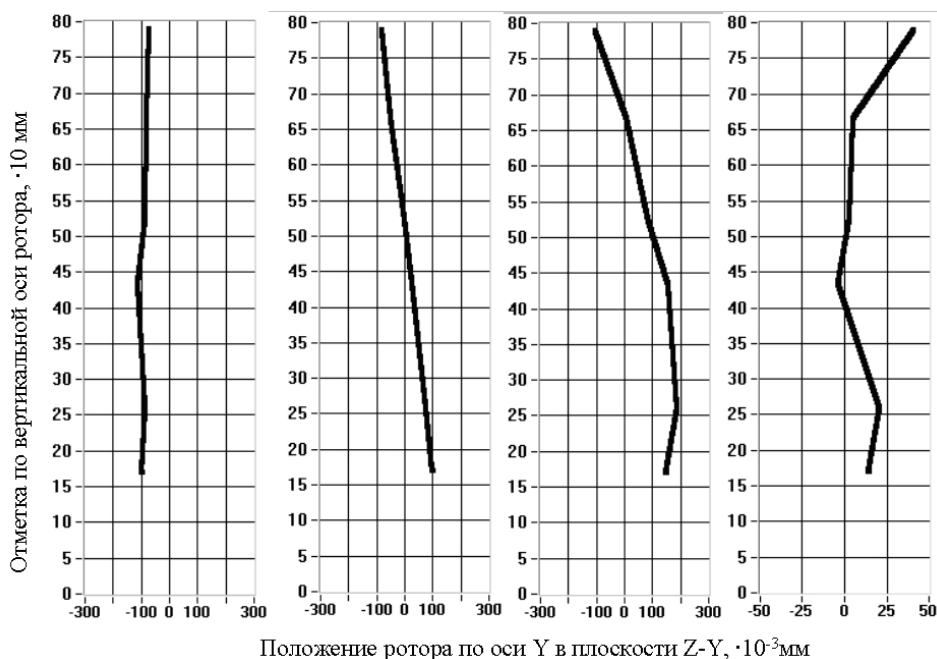


Рис. 5. Формы колебаний вращающегося ротора на полном электромагнитном подвесе

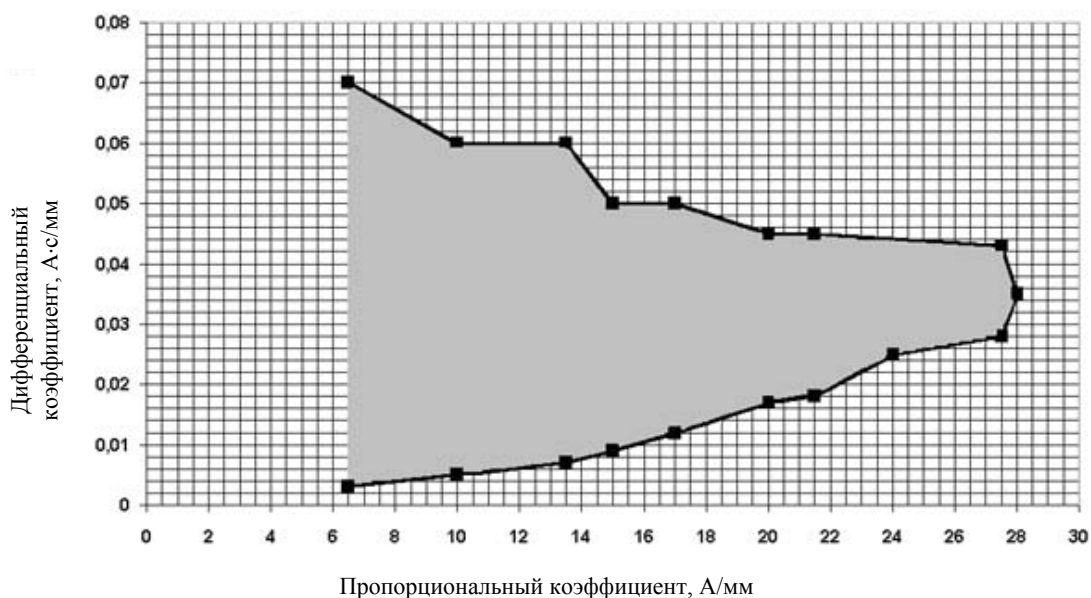


Рис. 6. Границы области устойчивости ПИД-регулятора РЭМП



Рис. 7. Амплитуды колебаний ротора при вращении:
 — алгоритм включен; — алгоритм выключен

циентов регулятора. В последствие указанная область подтверждается экспериментально снятой кривой, характеризующей ее границу. На рис. 6 показаны экспериментально определенные границы области устойчивости ПД – регулятора радиального электромагнитного подшипника. Если значения пропорционального и дифференциального коэффициентов выбраны из этой области, то ротор ведет себя устойчиво во всем диапазоне частот вращения.

По результатам исследований выбранного закона управления при различных частотах вращения ротора, а также других законов [10, 11] была обоснована работоспособность электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора.

Применение системы управления электромагнитными подшипниками для компенсации дисбаланса

Для обеспечения автоматического поддержания устойчивого вращения ротора при пуске и остановке при прохождении резонансных частот используется специальный закон управления, формирующий вектор «виртуальной» силы в электромагнитном подшипнике, что обеспечивает величину амплитуды колебаний ротора в заданной области относительно оси подшипников. На рис. 7 показана амплитуда колебаний ротора при вращении с включенным законом и с выключенным. Как видно из графиков, включение закона позволяет существенно уменьшить амплитуду колебаний ротора на резонансной частоте 65 Гц.

Применимость результатов исследований

Результаты проведенных испытаний учитываются при верификации программного обеспечения расчетов динамики ротора в электромагнитном подвесе, статических и динамических характеристик электромагнитных подшипников, в проекте блока преобразования энергии атомной станции с высокотемпературным газовым реактором.

Литература

1. <http://www.okbm.nnov.ru/russian/hydrogen>
2. Маргулова Т. Х. Атомные электрические станции. М.: Высшая школа, 1978.
3. Arkal Shenoy. US History of Direct Cycle Gas-Turbine HTGRs. Presented at IAEA Technical Committee Meeting on Gas Turbine Power Conversion Systems Meeting/ November 15, 2000.
4. Пономарев-Степной Н. Н., Глушков Е. С., Гребенник В. Н., Кирюшин А. И., Кодочигов Н. Г., Кузавков Н. Г. Возможности использования модульного гелиевого реактора ГТ-МГР для диспозиции оружейного плутония. ISSN 0869-6772. Конверсия в машиностроении – Conversion in machine building of Russia. 1999. № 3–4.
5. Кодочигов Н. Г., Друмов В. В., Белов С. Е., Дельфонцев Н. С., Чистяков В. М. Электромагнитный подвес вертикальной турбомашин для атомной станции ГТ-МГР (англ.) // Материалы 5-й международной конференции по технологии электромагнитного подвеса, сентябрь 2001 г., Циттау, ФРГ.
6. Кодочигов Н. Г., Друмов В. В., Боровиков А. Н., Друмов И. В. Система управления элект-

ромагнитным подвесом // Материалы 5-й международной конференции по технологии электромагнитного подвеса, сентябрь 2001 г., Циттау, ФРГ. С. 59–68.

7. Кодочигов Н. Г., Друмов В. В., Победоносцев А. Б., Друмов И. В. Расчет и обоснование структуры и состава микропроцессорных контроллеров в цифровой системе управления многоопорной системой электромагнитного подвеса // Материалы 6-й конференции по системам мехатроники, сентябрь 2003 г., Кассель, ФРГ. С. 161–169.

8. Митенков Ф. М., Знышев В. В., Кирюшина Е. В., Николаев М. Я., Овчинников В. Ф., Фадеев А. В. Алгоритм определения дисбаланса ротора на электромагнитных опорах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 4. С. 9–14.

9. Митенков Ф. М., Знышев В. В., Кирюшина Е. В., Кодочигов Н. Г., Николаев М. Я., Овчинников В. Ф. Влияние дисбаланса на нелинейную динамику вертикального ротора на электромагнитных подшипниках // Вестник ННГУ. Механика, № 4, 2009. С. 110–114.

10. Кодочигов Н. Г., Друмов В. В., Белов С. Е., Востоков В. С., Друмов И. В., Ходыкин А. В. Исследование методов стабилизации ротора с полным электромагнитным подвесом // Материалы 6-й конференции по системам мехатроники, сентябрь 2003 г., Кассель, ФРГ. С. 153–160.

11. Mitenkov F. M., Kodochigov N. G., Drumov V. V., Belov S. E., Vostokov V. S., Drumov I. V., Klochkov O. B., Khodykin A. V. Electromagnetic Suspension of Vertical Turbomachine For Nuclear Power Plant. Proceedings of conference «PHYSICON2003» Saint-Peterburg, Russia. 2003. С. 146–151.