Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Сидорова Дениса Николаевича
"**Интегральные динамические модели: приближенные методы и приложения**",
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация Д.Н. Сидорова решает проблемы математического моделирования *развивающихся систем* или же динамических объектов с памятью. Рассмотрены весьма сложные объекты, моделируемые многомерными нелинейными и сингулярными интегро-дифференциальными и интегро-функциональными уравнениями класса Соболева (с вырождением главной части). Это модель развития *электроэнергетических систем* (ЭЭС), учитывающая ввод новых мощностей и их модернизацию, модель распознавания и классификации объектов в системах машинного зрения, восстановление искажённых видеопоследовательностей. Сложность этих моделей стимулирует также решение ряда теоретических вопросов относительно классов используемых уравнений: существование решений, анализ нерегулярных решений, разработка аналитических и численных методов для вырожденных ветвящихся и ограниченно продолжаемых решений. Решение прикладных проблем с реальными данными, как правило, содержащими ошибки и случайные возмущения, потребовало также привлечения методов дискретной математики, распознавания образов и регрессионного анализа.

Это перечисление проблем теории математического моделирования, где дифференциальные и интегральные уравнения представляют основной аппарат, а также приложений, говорит о несомненной **актуальности** избранной темы. К этому хочу добавить возможность дальнейшего развития представляемого к защите исследования в экономическом направлении, о котором автор упоминает в связи с работами выдающихся советских исследователей – математика и экономиста Л.В. Канторовича (премия имени А. Нобеля по экономике 1975 года) и кибернетика В.М. Глушкова по моделированию и оптимизации обновления производственных фондов.

Производственные фонды вместе с 'трудом' представляют основные факторы любой производственной системы, рассматриваемой на макроэкономическом уровне как цельный объект. При этом эти факторы представляются агрегированными скалярными мерами – стоимостью (фонды) и рабочим временем (труд). К сожалению, до настоящего времени под стоимостью фондов понимается их «балансовая стоимость», которая по многим причинам очень слабо связана с мерой «эффективных фондов» (ЭФ), реально участвующих в производстве продукции. В последнее время созрело понимание, что показатель ЭФ можно формировать на основе потока производственных инвестиций, мера которых отражает реальность в среднесрочной ретроспективе (Горбунов В.К., Львов А.Г., Экономика и математические методы, 2012, в. 2). На мой взгляд, процесс формирования эффективных производственных фондов с учётом их физической и моральной амортизации подобен процессу формирования энергетических систем и в непрерывном времени может описываться интегральными моделями класса, рассматриваемого в диссертации Д.Н. Сидорова, что подчёркивает также **перспективную актуальность** его исследования.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из двух частей и пяти глав. Первая часть «Интегральные динамические модели: элементы анализа» имеет в основном теоретический характер.

В первой главе представлена теория линейных уравнений Вольтерра первого рода

$$\int_0^t K(t,s)x(s) = f(t), \quad f(0)=0, \quad 0<s<t<T, \tag{1.1}$$

с кусочно-непрерывными (автор называет их кусочно-заданными) ядрами

$$K(t,s) = K_i(t,s), \quad \alpha_{i-1}(t) < s < \alpha_i(t), \quad i = \overline{1,n},$$
$$0 \equiv \alpha_0 < \alpha_1(t) < \ldots < \alpha_n(t) \equiv t.$$

Этот класс моделей представляет развивающиеся системы, в том числе ЭЭС.

Разрывность ядра уравнения (1.1) может приводить к различным особенностям его решения, и это требует специального исследования для различных типов разрывов ядра и специальных методов решения. В диссертации изучена структура решений, доказаны теоремы существования, рассмотрены обобщённые решения уравнений (1.1), неразрешимых в классическом смысле (раздел 1.1). При этом предполагается невырождение ядра на диагонали: $K_n(t,t) \neq 0$. В разделе 1.2 предложен аналитический метод асимптотического приближения решения в виде специальных полиномов, а также два численных метода дискретизации, основанные на квадратурных формулах. В разделе 1.3 исследованы системы уравнений типа (1.1) при условии $\det K_n(t,t) \neq 0$ относительно существования и единственности решений, указан метод последовательных приближений (МПП) к решению определённой структуры. Раздел 1.4 посвящён обобщённым решениям в случае, когда $f(0) \neq 0$, и раздел 1.5 – уравнениям (1.1) с разрывной правой частью $f(t)$.

Вторая глава посвящена нерегулярным нелинейным интегральным и дифференциальным уравнениям. Раздел 2.1 посвящён нелинейному уравнению Гаммерштейна с нелинейно входящим параметром

$$u(x) = \int_a^b K(x,s) g(s, u(s), \lambda) ds \tag{1.2}$$

в случае, когда единица является характеристическим числом ядра $K(x,s)$ ранга *n*. В этом случае уравнение (1.2) может иметь в окрестности точки $\lambda = 0$ несколько решений (ветвление) и возникает проблема выделения решения, имеющего некоторый смысл. Здесь изучена асимптотика (по $\lambda \to 0$) решений (1.2) и обосновано применение метода последовательных приближений. В разделе 2.2 рассмотрены нелинейные уравнения Вольтерра 2-го рода относительно возможности разрушения (*непродолжаемости*; в используемой автором терминологии – “blow-up”) решения и оценки интервала существования классического решения. Изучены условия существования ‘главного решения’ в смысле Л.В. Канторовича и его свойства относительно продолжаемости. Раздел 2.3 посвящён неявным дифференциальным уравнениям. Получены новые результаты относительно ветвления их решений. В разделе 2.4 исследована проблема обобщённых решений для нелинейных уравнений Вольтерра 1-го рода.

В третьей главе исследованынекоторые классы интегро-операторных и дифференциально-операторных уравнений, обобщающие классы уравнений, рассмотренных в первых двух главах. При этом искомые решения являются элементами банахова пространства. Приложений этой абстрактной модели обычно относятся к дифференциальным уравнениям с частными производными. В разделе 3.1 рассматриваются уравнения вида (1.1), где интегральный оператор с ядром $K(t,s)$ действует из банахова пространства непрерывных функций $x(t)$ со значениями в банаховом пространстве E_1 в банахово пространство E_2. Основные результаты первой главы для уравнений (1.1) распространяются на операторный случай в предположении обратимости операторной функции $K_n(t,t)$. Раздел 3.2 посвящён проблеме существования и разрушения решений нелинейных интегрально-операторных уравнений Вольтерра 2-го рода, а также методам их приближённого решения. В разделе 3.3 рассматривается начальная задача для нелинейногодифференциально-операторного уравнения

$$B\frac{du}{dt} = F(u,t), \quad u|_{t=0} = 0 \tag{1.3}$$

с фредгольмовым оператором $B: E_1 \to E_2$. Такие уравнения если разрешимы, то могут иметь множество решений. Здесь исследована асимптотика решения в окрестности точки ветвления и обоснован метод последовательных приближений. В разделе 3.4 исследованы вырожденные нелинейные интегрально-операторные уравнения Вольтерра 2-го рода. Предложен вариант МПП, равномерно сходящийся в окрестности точки ветвления. Теоретические результаты третьей главы иллюстрируются нетривиальными прикладными моделями механики и теплофизики. Здесь построены асимптотики решений для нелинейных моделей: динамики несжимаемой вязкоупругой жидкости Бенжамина-Бона-Махони, колебания спутника в плоскости его эллиптической орбиты, магнитной изоляции вакуумного диода.

Вторая часть диссертации имеет прикладной характер. **В четвёртой главе** описаны методы идентификации полиномиальных моделей Вольтерра. Полиномиальные уравнения при естественных условиях хорошо аппроксимируют общие нелинейные уравнения, и это упрощает их исследование и идентификацию, т.е. определение переходных характеристик динамической системы при задании некоторой тестирующей последовательности входов и наблюдениям (измерениям) выходов. Предложен алгоритм идентификации ядер Вольтерра, заключающийся в использовании ступенчатых тестовых сигналов и решении специальных уравнений Вольтерра 1-го рода относительно искомых ядер с простыми формулами обращения. Для более сложных случаев многомерных уравнений предложены численные методы решения уравнений 1-го рода, обладающие при определённых предположениях и согласовании шага дискретизации квадратур с уровнем погрешностей свойством саморегуляризации.

Пятая глава посвящена решению прикладных задач прогнозирования временных рядов, представляющих финансовые и электросетевые процессы, фильтрации киноизображений старых телевизионных передач от специфического искажения (муара), распознавания технологических дефектов микросхем. Особенностью этих задач является наличие случайных помех и неопределённостей, требующих использования помимо аппарата интегральных уравнений также статистических методов и методов распознавания образов (машинного обучения). Раздел 5.1 посвящён проблеме анализа и прогнозирования временных рядов, представляющих выработку энергии в ЭЭС. В разделе 5.2 рассмотрена задача восстановления искажённых видеопоследовательностей типа кинофильмов и телепередач с синусоидальным (муаровым) шумом. В последнем разделе 5.3 решается проблема контроля качества продукции системой ‘машинного зрения‘. Это комплексная проблема, требующая применения наряду с методами обработки изображений, основанными на использовании интегральных преобразований, также алгоритмов машинного обучения и комбинаторной оптимизации.

Основными новыми результатами являются следующие:

- доказаны конструктивные теоремы существования решений нерегулярных систем, предложены аналитические и численные методы решения интегральных систем с разрывами ядер на кривых запаздывания;
- получены достаточные условия существования решений и оценки границ возможного разрушения решения нелинейного уравнения Вольтерра второго рода;
- доказаны общие теоремы существования и построены главные члены асимптотик решений интегро-дифференциальных систем с параметрами в нерегулярных случаях;
- разработаны новые модели и методы краткосрочного прогнозирования параметров предстоящего режима электроэнергетических систем на основе комбинации методов непрерывной и дискретной математики;
- разработаны модели оценки риска возникновения неустойчивых межсистемных колебаний в крупных энергообъединениях;
- предложен алгоритм подавления нелинейных нестационарных муаровых шумов в многомерных цифровых сигналах (изображениях);
- разработанные методы реализованы и зарегистрированны в виде комплексов программ.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Выделен новый класс линейных интегральных уравнения Вольтерра с ядрами, претерпевающими разрывы первого рода на специальных кривых запаздывания. Получены достаточные условия существования и единственности решений таких уравнений, предложены аналитические и численные методы построения их решений;
2. Классифицированы новые нерегулярные интегро-операторные модели с вырождениями. Для задач реализации этих моделей доказаны конструктивные теоремы существования. Разработаны приближенные методы построения решений классов линейных и нелинейных систем в нерегулярных случаях, построены главные члены асимптотик их решений;

3. Предложены новые модели и численные методы прогнозирования временных рядов с использованием интегрального преобразования Гильберта-Хуанга и методов машинного обучения;
4. Построены модели подавления нестационарных квазипериодических шумов в многомерных сигналах и распознавания дефектов. Алгоритмы решения соответствующих задач реализованы в виде комплексов проблемно-ориентированных программ.

Степень обоснованности. Все теоретические результаты диссертации строго доказаны. Эффективность разработанных приближенных методов подтверждена при решении тестовых примеров и расчетах по реальным данным.

Замечания.

1. В разделе 1.4 строятся обобщённые решения уравнений (1.1) с разрывными ядрами и это обосновывается тем, что «может возникнуть ситуация, когда … $f(0)\neq 0$». Далее выполняется формальный анализ ситуации, приводящий к дельта-компоненте (функции Дирака) решения, «уравнивающего» в точке $t=0$ 'ноль' левой части (в случае классического решения) с 'ненулём' $f(0)$, подобно тому, как это делалось в цитируемой книге профессора М.И. Иманалиева [147]. Иманалиев объяснял возможность $f(0)\neq 0$ ошибками измерений, но решение *некорректно поставленной задачи*, какой является уравнение первого рода (1.1) с приближённой правой частью, не должно воспроизводить ошибки данных, а должно определяться как решение некоторой *регуляризующей задачи*, учитывающей дополнительную информацию о свойствах решения и характере ошибок данных.

2. Гл. 4, как пишет автор, представляет его кандидатские результаты, не выносимые на защиту. Она могла бы быть сокращена без ущерба изложения основного материала диссертации, особенно, за счёт обзора методов идентификации.

Заключение.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в цикле статей в ведущих российских и зарубежных математических журналах, доложены соискателем на ряде научных конференций и семинаров в известных российских и европейских научных центрах. Автореферат диссертации с достаточной полнотой отражает основные результаты диссертации.

Личный вклад соискателя состоит в самостоятельном выполнении практически всех этапов исследования и руководстве коллективными исследованиями в рамках нескольких российских и международных программ.

Диссертационная работа является завершенным научным исследованием, в котором заложены теоретические основы новых моделей развивающихся динамических систем, а также предложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в науку и технику.

В целом диссертация Сидорова Дениса Николаевича представляет собой законченное исследование по теории, методам и приложениям метода интегральных уравнений в нетривиальных и актуальных технических проблемах. Она представляет существенный теоретический и прикладной интерес для специалистов как прикладной, так и теоретической математики.

Исходя из написанного, можно заключить, что диссертационная работа вносит крупный вклад в развитие методов математического моделирования и может быть квалифицирована как научное достижение. Работа в полной мере удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Владимир Константинович Горбунов,

Доктор физико-математических наук (01.01.07),

профессор, ведущий научный сотрудник

Ульяновского государственного университета

28 ноября 2014 года

Адрес: 432031 Ульяновск, ул. Заречная, 27, кв. 104

тел. (8422) 532017, моб. +7-9025898089

E-m: vkgorbunov@mail.ru

УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Подпись В.К. Горбунова **заверяю**

Ученый секретарь УлГУ ______ **О.А. Литвинко**

«28» ноября 2014 г.