

РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ И АНАЛИЗА РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ДВС

*О.Ф. Савченко, к.т.н., В.В. Альт, д.т.н., проф.,
И.П. Добролюбов, д.т.н., проф., С.Н. Ольшевский, к.т.н.
ГНУ Сибирский физико-технический институт аграрных проблем Россельхозакадемии*

Рассмотрены основные этапы проведения в ГНУ СибФТИ Россельхозакадемии (СОПКТБ СО ВАСХНИЛ) научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке и совершенствованию средств регистрации (индицирования) и анализа рабочих процессов ДВС, начиная от автономных цифровых приборов и персональных ЭВМ, до измерительных экспертных систем на основе виртуальных и интеллектуальных технологий.

Для испытаний ДВС необходимы измерения целого ряда физических величин, характеризующих быстропеременные показатели рабочих процессов (БПП). Наиболее информативными из них являются давление в камере сгорания (индикаторная диаграмма) и давление в топливопроводе, ход иглы форсунки. Исследователей интересуют также давление во впускных и выпускных коллекторах, давление газа в картере, положение впускных и выпускных клапанов и др. При исследовании ДВС необходим одновременный и параллельный анализ БПП в одном или нескольких цилиндрах. При этом в силу циклического характера работы ДВС измерения БПП проводят в единичных последовательных циклах с синхронизацией, как правило, по углу поворота коленчатого вала (ПКВ) ДВС. Для повышения точности измерений и вычисления параметров БПП необходимо преобразование их в непрерывный электрический сигнал, далее в последовательность дискретных значений с жесткой привязкой этих значений к углу ПКВ и необходимой обработкой полученной информации. Кроме того, в зависимости от решаемых задач, наличие множества программ и методик испытаний накладывает на системы испытаний ДВС требования к гибкости их структуры и функциям.

Решение поставленных задач возможно при создании электронных диагностических приборов и систем на основе применения достижений измерительной и вычислительной техники, обеспечивающих наиболее эффективное получение информации о БПП и представление ее в удобном виде.



Разработка комплексов КАРП и КИД

Исследования по этому направлению начинались совместно с НПО «Звезда» в 1975 г. с разработки комплекса анализа рабочих процессов (КАРП). Опыт применения имеющихся в то время отдельных приборов для обработки индикаторных диаграмм показал их низкую эффективность, что потребовало создания более совершенных технических средств, измеряющих и регистрирующих рабочие процессы ДВС в комплексе. В результате был разработан способ и устройство регистрации и анализа индикаторных диаграмм с цифровым вводом данных и разделением обработки на два уровня: оперативный во время работы двигателя и детальный по программам ЭВМ [1] — устройства КАРП и КИД (рис. 1, 2).

В основу построения были положены принципы стандарта КАМАК, получившего в то время широкое распространение при создании систем автоматизации как в области физических (ядерных) экспериментальных исследований, так и в других направлениях, имеющий унифицированное магистрально-модульное построение и стандартизованный интерфейс, обеспечивающие большой спектр функциональных возможностей. Устройство первого уровня КАРП — автономное

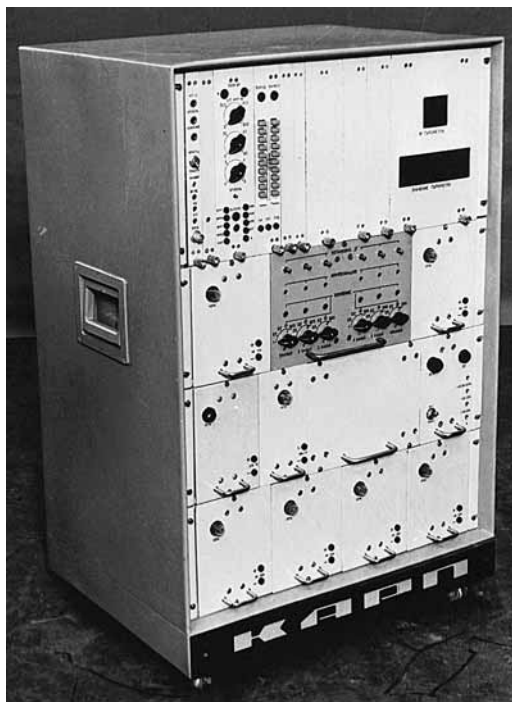


Рис. 1. Устройство КАРП

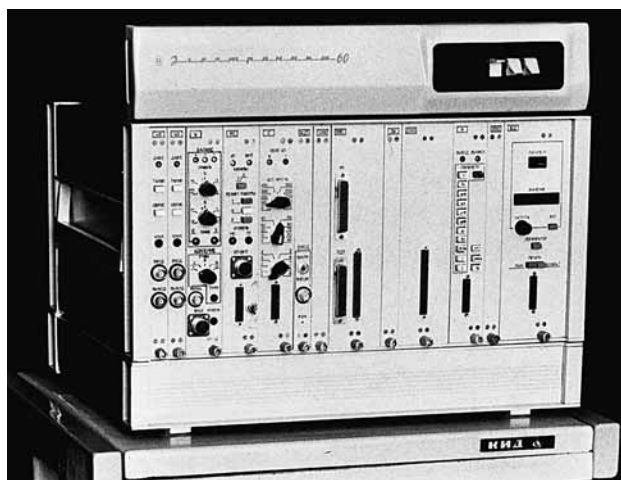


Рис. 2. Устройство КИД

специализированное вычислительное устройство, обеспечивающее измерение быстропеременных процессов в двигателе: давлений в камере сгорания p_i и p_z — индикаторных текущих и максимального значений, градиента $dp/d\varphi_{\max}$, углов ПКВ φ_z и φ_{dp} при p_z и $dp/d\varphi_{\max}$ соответственно [2], угла опережения сгорания топлива $\varphi_{оп}$, давления в топливопроводе высокого давления, частоты вращения коленчатого вала с усреднением их значений за заданное количество циклов. Устройство второго уровня КИД построено на базе мини- и микроЭВМ и дополнительно обеспечивает регистрацию индикаторных диаграмм в единичных циклах на различных режимах работы двигателя. Устройства были внедрены на

ПО «Звезда» и ПО АМЗ и значительно ускорили обработку экспериментальных данных при проведении исследовательских и доводочных испытаний на стадии ОКР при создании перспективных типов ДВС.

Создание измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) ЦИКЛ

Опыт применения комплексов КАРП и КИД выявил следующие их недостатки: недостаточные разрядность квантования по уровню, разрешающая способность по углу ПКВ, объем оперативной памяти, количество измеряемых и регистрируемых процессов. Это затрудняло регистрацию процессов за необходимое количество циклов и не позволяло оценить в полном объеме техническое состояние дизелей. С учетом полученного опыта, а также обобщения технических требований и рекомендаций ряда предприятий Минсельхозмаша в 1985 г. был разработан измерительно-вычислительный комплекс ИВК ЦИКЛ. Он содержит восемь каналов десятиразрядного аналого-цифрового преобразования мгновенных значений напряжений непрерывных электрических сигналов, снимаемых с датчиков давлений в камере сгорания, топливопроводе высокого давления и выпускном коллекторе, датчиков хода иглы форсунки и вибраций. Ширина полосы частот измеряемых процессов составляет 250 кГц, это позволяет регистрировать и обрабатывать информацию по восьми параллельным каналам с шагом 0,50 угла ПКВ при частоте вращения коленчатого вала до 3000 об/мин. Для исследования временных и фазовых зависимостей применяется измерительный канал, обеспечивающий 16-разрядное аналого-цифровое преобразование временных интервалов в диапазоне $(4...0,65)10^6$ с внутри цикла работы ДВС синхронно с углом ПКВ. Канал синхронизации обеспечивает измерение процессов 2- и 4-тактных ДВС в указанном диапазоне частот вращения коленчатого вала с шагом дискретизации по углу ПКВ 0,1°. В состав включена управляющая ЭВМ с объемом ОЗУ до 100 Кбайт и устройствами ввода-вывода. Технические решения были защищены авторским свидетельством [3].

В результате межведомственных испытаний опытного образца и Государственной метрологической аттестации утверждены технические условия и методика поверки [4]; принято решение о постановке на производство. Первые комплексы ИВК ЦИКЛ (рис. 3) были внедрены на АО ВТЗ, ПО АМЗ, НИКТИД, затем более чем на двадцати двигателестроительных предприятиях страны. Это позволило решить широкий круг задач по оптимизации и доводке эксплуатационных показателей дизелей. В дальнейшем были применены в ИВК более совершенные ЭВМ с объемом



Рис. 3. ИВК ЦИКЛ

ОЗУ до 500 Кбайт и улучшенными внешними устройствами, что позволило существенно увеличить количество измеряемых циклов работы ДВС и применить более развитое программное обеспечение для обработки сигналов, определения их характеристик и параметров, отражающих техническое состояние ДВС.

Разработка информационной измерительной системы РИТМ

Информационная измерительная система ИИС РИТМ (рис. 4) была построена на базе ИВК ЦИКЛ, являющегося ее аналого-цифровым и цифровым ядром, путем формирования измерительных каналов БПП, и разработки на основе программных компонентов ИВК ЦИКЛ программ обработки и представления информации, позволяющих оценивать техническое состояние ДВС [5].

Учитывая отсутствие в то время (80-е годы) серийных датчиков БПП, при разработке измерительных каналов использовались наиболее подходящие пьезо-, тензо- и индуктивные датчики с соответствующими универсальными согласующими усилителями. При этом были выявлены следующие негативные факторы: непригодность конструкций этих датчиков к их установке на двигателе; влияние на показания датчиков, измеряющих динамические давления в камере сгорания, термодинамических процессов, которые создают тепловые удары; влияние на показания датчика угла ПКВ вибраций на корпусе ДВС (ускорение до 110 м/с, перемещение до 3 мм); несогласованность электрических и конструктивных параметров датчиков с измерительными каналами ИВК.

Для устранения указанных недостатков были проведены следующие мероприятия. На ДВС был подготовлен специальный канал, обеспечивающий доступ к камере сгорания. Чтобы уменьшить влияние термоударов, воздействующих на пьезодатчик, измеряющий динамическое давление в камере сгорания, был изготовлен переходник



Рис. 4. ИИС РИТМ

с «водяной рубашкой», с каналами подвода и отвода охлаждающей воды. Для уменьшения влияния тензодатчика, измеряющего давление в топливопроводе высокого давления, на процесс топливоподдачи был изготовлен переходник, который устанавливается в разрыв этого топливопровода. Уменьшение уровня вибраций, влияющих на фотоэлектрический датчик измерения угла ПКВ, до приемлемого значения, было достигнуто за счет его соединения с коленчатым валом ДВС при помощи сильфонного соединительного устройства.

Для согласования электрических параметров датчиков с входами измерительных каналов ИВК были разработаны согласующие усилители — измерительные преобразователи (ИП) разбаланса тензодатчиков с их питанием постоянным током (ИПТД) и заряда пьезодатчиков (ИППД). При разработке ИП были учтены следующие особенности испытаний дизелей. Для уменьшения наводимых помех входные и выходные сигнальные цепи пространственно разведены. При применении датчиков с большим разбросом чувствительности (до 20 раз) и с ненулевым начальным сигналом в ИП введены органы дискретной и плавной регулировки коэффициента преобразования, органы установки в нулевое состояние (сброса начального сигнала в ИП заряда, балансировки в ИП разбаланса тензодатчиков), а также предусмотрены встроенный индикатор нулевого значения выходного сигнала и коррекция аддитивных погрешностей при нулевых значениях давления в камере сгорания. Технические решения были защищены авторским свидетельством [6]. Входящие в состав ИИС РИТМ элементы представлены на рис. 5, 6.

Созданное для ИИС РИТМ программно-алгоритмическое обеспечение позволяет функционировать ИИС в диалоговом режиме — формировать план измерений и регистрацию процессов; проводить расчет параметров индикаторной диаграммы (p_i , p_z , $dp/d\varphi_{\max}$ и др.), характе-



Рис. 5. Датчики БПП ДВС



Рис. 6. ИП сигналов (усилители)

ристик сгорания и тепловыделения, параметров топливоподачи и впрыска, фазовых и временных соотношений; осуществлять статистическую обработку результатов измерений и вычислений и автоматизированную градуировку каналов. Результаты испытаний выводятся на цифровой и графический дисплей — для оперативного наблюдения за ходом испытаний, а также на принтер и графопостроитель — для документального оформления протоколов испытаний.

После ведомственных приемочных испытаний и метрологической аттестации ИИС РИТМ аттестована как рабочее средство измерений и изделие единичного разового производства и внедрена в СибИМЭ, СибФТИ и других институтах для развития НИОКР по созданию средств диагностирования ДВС.

Методика выполнения измерений быстропеременных давлений

Для выполнения измерений быстропеременных давлений с помощью ИИС была создана методика выполнения измерений (МВИ). При этом обеспечивается регистрация давления в камере сгорания (индикаторной диаграммы) и давления в топливопроводе насоса высокого давления в функции угла ПКВ с разрешающей способностью 0,1 град ПКВ или в функции времени с разрешающей способностью менее 1 мкс, с синхронизацией от верхней мертвой точки индицируемого цилиндра при полной, частичной нагрузках и холостом ходу двигателя, а также на режимах разгона и выбега двигателя, вызванных резким из-

менением подачи топлива или нагрузки. Приведенная аппаратурная погрешность измерения быстропеременных давлений — не более 1,5 %.

МВИ предусматривает выполнение измерений и расчет частных числовых показателей индикаторной диаграммы (p_i , p_z , $(dp/d\phi)_{\max}$, ϕ_z , ϕ_{dp} и др.), а также показателей давления в топливопроводе высокого давления — максимального, среднего значения и др. МВИ успешно применялась при стендовых испытаниях ДВС в СибИМЭ и СибФТИ, была подтверждена целесообразность ее практического использования. Ее применение позволило расширить возможности измерений и анализа рабочих процессов ДВС, заложило предпосылки для создания и развития базы знаний экспертной системы двигателей.

Разработка экспертной системы ЭПОС

Основываясь на единстве информационного и морфологического описания двигателя, в 1995 г. была разработана экспертная проблемно-ориентированная система (ЭПОС) для определения технического состояния дизелей [7, 8]. В ней применена отечественная инструментальная экспертная система ЭКСНА с организацией представления знаний в виде правил-продукций. Сформирована продукционная база знаний для большинства отечественных тракторных двигателей и технологическая процедура определения технического состояния с набором технологических карт поиска неисправностей. В режиме обучения осуществляется получение знаний с учетом закономерностей, отражающих связь измеренных сигналов с техническим состоянием двигателя, создаются модели-эталоны различных классов состояний ДВС. В режиме экспертизы выполняется статистическое измерение рабочих процессов, характеризующих текущее техническое состояние дизеля. Разработанная программа технического обслуживания (ТО) представляет пользователю методику диагностирования по внешним проявлениям состояния дизеля, а также экспертные рекомендации о требуемом



Рис. 7. Экспертная система ЭПОС

виде ТО и, при необходимости, сведения о технологии его проведения.

После приемочных испытаний образцы экспертной системы ЭПОС (рис. 7) были переданы в опытную эксплуатацию в Федеральный информационно-консультационный центр Минсельхозпрода России; в областное и районные управления сельского хозяйства Новосибирской области. Экспертная система ЭПОС рассмотрена и одобрена на НТС Минсельхозпрода России, нашла применение также в учебном процессе аграрных вузов и при повышении квалификации специалистов сельскохозяйственного производства.

Разработка системы ИДИС

Интеллектуальная динамическая измерительная система (ИДИС), предназначенная для оценки технического состояния ДВС, расширяет возможности технического обеспечения и поиска неисправностей в сравнении с экспертной системой ЭПОС [9, 10]. При ее разработке потребовался отказ от концепции ИВК ЦИКЛ (специализированный многоплатный измерительный блок с применением конструктивов микро-ЭВМ «Электроника-60») и выполнения измерительно-вычислительных функций с помощью компьютеров типа Pentium с применением встраиваемой в компьютер многофункциональной высокоскоростной платы сбора данных типа NI.PCI-6251. Это позволило повысить быстродействие регистрации, накопление больших массивов данных измеряемых процессов. Разработанная по технологии «виртуальных приборов» программная компонента (рис. 8) обеспечивает регистрацию БПП ДВС с синхронизацией по времени или по углу поворота коленчатого вала, управление планом эксперимента, сохранение, визуализацию и масштабирование данных [11].

В ИДИС расширен перечень информативных характеристик и параметров, характеризующих техническое состояние ДВС, кроме детерминированных характеристик (динамических скоростных, интегральных, амплитудно- и фазочастотных) измеряются и статистические: авто- и взаимокорреляционные функции, энергетические и взаимные энергетические спектры и их параметры [12, 13]. Применение этих характеристик и параметров повышает достоверность методов определения технического состояния и поиска неисправностей ДВС. ИДИС апробирована в ряде аграрных вузов и ремонтном предприятии

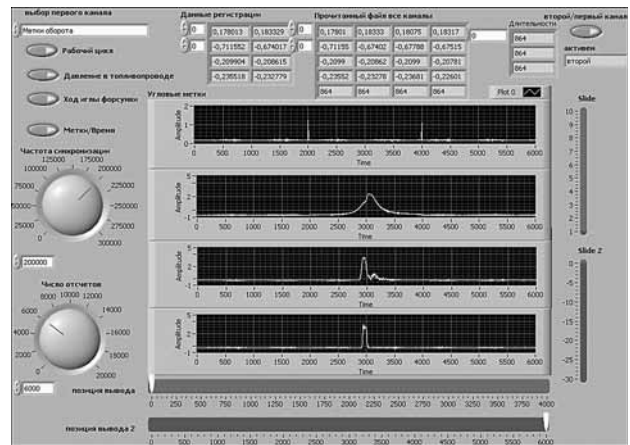


Рис. 8. Панель интерфейса системы ИДИС

АПК. Рассмотренные экспертные системы защищены патентами РФ на изобретение [14, 15].

Совместно с НГАУ и другими институтами проводятся работы по дальнейшему совершенствованию этих систем, в частности по разработке динамической модели ДВС [16]. Разработанные экспертные системы могут применяться на всех этапах CALS-технологии производства и эксплуатации ДВС.

Установка для автоматизации экспериментальных исследований ДВС

Для обеспечения проводимых в институте НИОКР по созданию технических средств и технологий технического обслуживания ДВС создан и постоянно совершенствуется исследовательский комплекс, включающий электрическую обкаточно-тормозную установку DS-932-4/N, тракторный двигатель (типа 4Ч10,5/12) и информационную измерительную систему ИИС, включающую установленные на ДВС датчики быстропеременных процессов (рис. 9).



Рис. 9. Схема исследовательского комплекса

ИИС обладает широкими функциональными возможностями на основе применения технологии «виртуальных приборов», современных средств компьютерной и измерительной техники, обладающих высоким быстродействием и практически неограниченным объемом памяти.

Разработано развитое прикладное программное обеспечение, включая интерфейс пользователя на естественном языке, сформированы измерительные каналы. Обеспечивается регистрация синхронно с циклами работы ДВС нескольких БПП с высоким разрешением по углу ПКВ и позволяющая накапливать достаточно большой объем первичных данных этих процессов, в том числе и на неустановившихся режимах [17]. Это позволяет обеспечить автоматизацию экспериментальных исследований измерений и анализа БПП при проведении различного уровня исследования ДВС, связанных с разработкой технических средств определения параметров технического состояния и обработкой технологий диагностирования. ИИС может использоваться для оснащения испытательных стендов при выполнении работ, связанных с анализом рабочих процессов ДВС при модернизации и проектировании новых двигателей.

Литература

1. *Альт В.В., Савченко О.Ф.* Регистрация и обработка параметров рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания // Актуальные вопросы мех. и электр. с.-х. пр-ва: науч.-техн. бюлл.: Вып. 7 / ВАСХНИЛ, Сиб. отд-ние, СибИМЭ. — Новосибирск, 1979. — С. 30–31.
2. Устройство для измерения скорости нарастания давления в цилиндре поршневого двигателя : а. с. 951090 СССР, М.Кл.3 G 01 L 23/08. / В.А. Пономарев, В.В. Альт, О.Ф. Савченко [и др.] (СССР). — № 2752569/18-10 ; заявл. 12.04.79 ; опубл. 15.08.82 ; Бюл. № 30. — 3 с.
3. Система для регистрации и обработки индикаторных диаграмм : а.с. 954839 СССР, М.Кл.3 С 01 М 15/00. / Савченко О.Ф., Бухтияров И.Д., Альт В.В. [и др.] / (СССР). — № 3241786/25-06 ; заявл. 26.01.81; опубл. 30.08.82; Бюл. № 32. — 10 с.
4. Комплекс измерительно-вычислительный ИВК «ЦИКЛ»: тех. условия ТУ 10-05.0001.025-86 /СОПКТБ СО ВАСХНИЛ. — Новосибирск, 1986. — 40 с.; методика поверки МИ 1719-87 / ФТИ СО ВАСХНИЛ.— Новосибирск, 1987. — 36 с.
5. *Альт В.В., Савченко О.Ф., Гареев И.С.* Информационно-измерительная система для анализа быстропеременных процессов при испытаниях двигателей внутреннего сгорания // Методы, техн. ср-ва контр. и диагн. машин : сб. научн. тр. / ВАСХНИЛ, Сиб. отд-ние, ФТИ. — Новосибирск. — 1987. — С. 35–40.
6. Устройство для измерения давления поршневого двигателя внутреннего сгорания : а. с. 1778584 СССР, М.Кл.3 С 01 L 23/10. / В.В. Минеев, И.С., Гареев, О.Ф. Савченко (СССР). — № 4848306/10; заявл. 09.07.90; опубл. 30.11.92; Бюл. № 44. — 4 с.
7. *Савченко О.Ф., Добролюбов И.П., Альт В.В.* Особенности и принципы построения экспертной системы оценки состояния ДВС // Современные методы, средства измерений и автоматизации для исследований физических процессов в сельском: сб. науч. тр./РАСХН, Сиб. отд-ние, СибФТИ. — Новосибирск, 1993. — С. 59–73.
8. *Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Альт В.В.* Измерительный технологический комплекс экспертизы технического состояния ДВС // Двигателестроение. — 1998. — № 2. — С. 27–30.
9. *Добролюбов И.П., Савченко О.Ф.* Расширение возможностей измерительного технологического комплекса экспертизы технического состояния ДВС // Двигателестроение. — 2004. — № 2. — С. 25–27.
10. *Савченко О.Ф.* Автоматизированный технологический комплекс экспертизы ДВС на базе CALS-технологий // Достижения науки и техники АПК. — 2006. — № 11. — С. 20–22.
11. Регистрация физических процессов протекающих в ДВС : свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612555 / Альт В.В., Ольшевский С.Н., Борисов А.А., Добролюбов И.П., Савченко О.Ф. (RU); ГНУ СибФТИ Россельхозакадемии (RU) — заявка № 2013610006; заявл. 09.01.2013; опубл. 05.03.2013.
12. *Добролюбов И.П., Савченко О.Ф.* Выбор совокупности косвенных диагностических параметров для измерительной экспертной системы ДВС // Двигателестроение. — 2012. — № 2. — С. 30–33.
13. *Альт В.В., Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Ольшевский С.Н.* Техническое обеспечение измерительных экспертных систем машин и механизмов в АПК: монография / Под ред. В.В. Альта; Россельхозакадемия, Сибирское региональное отделение, ГНУ СибФТИ Россельхозакадемии. — Новосибирск, 2013. — 523 с.
14. Способ определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания и экспертная система для его осуществления : пат. 2293962 Российская Федерация / Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Альт В.В.; заявл. 07.06.05; опубл. 20.02.07, Бюл. № 5. — 81 с.
15. Способ определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания и экспертная система для его осуществления : пат. 2428672 РФ, МПК G 01 M 15/04. / Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Альт В.В., Ольшевский С.Н. (РФ). — № 2009119973/06; заявл. 26.05.2009; опубл. 10.09.2011; Бюл. № 25. — 224 с.
16. *Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Альт В.В., Ольшевский С.Н.* Разработка компьютерной настраиваемой модели двигателя внутреннего сгорания / Вычислительные технологии. — 2013. — Т. 18, № 6. — С. 54–61.
17. *Савченко О.Ф., Ольшевский С.Н., Рихтер В.А.* Автоматизация экспериментальных исследований двигателей внутреннего сгорания // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки / Новосибирск, 2008. — № 9. — С. 82–91.