

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ НАГРУЖАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

О.В. Крюков, д.т.н.  
АО «Гипрогазцентр»

Рассмотрены актуальные проблемы проектирования автоматизированных нагружающих устройств для стендовых испытаний поршневых двигателей. Выполнена оценка энергоэффективности различных нагружающих устройств. Приведены структуры промышленных испытательных систем тепловых двигателей и программы их стендовых испытаний.

### Роль стендовых испытаний в производстве новых двигателей

В процессе испытаний определяются качественные и количественные характеристики изделий, проверяются принятые технические решения, находятся слабые звенья, имитируются не только реальные нагрузки механизмов, но и воспроизводятся экстремальные условия работы, создаются режимы, сопровождающиеся ускоренным износом отдельных узлов. Все это позволяет еще на стадии разработки и создания опытных образцов новой техники провести проверку всех узлов и агрегатов, и, что особенно важно, сократить сроки передачи изделий в серийное производство.

Адекватное и высококачественное проведение испытаний требует реализации целого комплекса испытательного оборудования, включая приводные и нагрузочные устройства, первичные измерители и преобразователи параметров, устройства защиты и индикации, сбора и анализа информации, АСУ процессом испытаний и др. При этом функциональное назначение испытываемого объекта определяет и функциональные характеристики испытательного оборудования.

Приводные двигатели, включая наиболее массовые автотракторные двигатели (АТД), — одни из основных средств энергетики и транспорта, используемые в различных отраслях промышленности. Большая их часть — это двигатели мощностью до 400 кВт. Главные задачи их совершенствования — повышение энергоэффективности, надежности и снижение токсичности — невозможно решить без проведения стендовых испытаний [1] с использованием новейшей контрольно-измерительной и управляющей техники и соответствующего прикладного ПО [2, 3], объединенных в единый комплекс АСУ стендовыми испытаниями.

Основное направление в развитии испытательных стендов АТД — автоматизация управления испытаниями. Именно комплексная АСУ испытаниями позволяет:

- повысить качество и технические характеристики новых двигателей;
- оптимизировать режимы и обеспечить достоверность стендовых испытаний;
- ускорить проведение испытаний, обработку их результатов и оформление технической документации;
- снизить потери топлива при испытаниях;
- снизить численность оперативного персонала и влияние человеческого фактора на проведение испытаний.

Разработка автоматизированных испытательных стендов требует разработки всех узлов и систем, отвечающих заданному уровню автоматизации. Главный узел любого стенда — нагружающее устройство (НУ), имитирующее эксплуатационные режимы работы двигателя. Повышение требований к качеству испытаний стало предпосылкой создания и развития эффективных НУ на основе асинхронных двигателей с преобразователями частоты, обеспечивающих автоматизацию испытаний [4, 5].

Применение современных частотно-регулирующих устройств применительно к НУ требует проведения исследований и разработок, определяемых их особенностями. Применение микропроцессорных систем управления позволяет разрабатывать качественно новые испытательные стенды с улучшенными характеристиками, обеспечивая [6, 7]:

- простоту изменения режимов и алгоритмов регулирования;
- диагностику неисправностей узлов электропривода;
- возможность самонастройки;
- возможность формирования оптимальных режимов работы и адаптивного управления;
- высокое качество выпускаемых изделий и производительность стенда;
- возможность сопряжения с периферийными устройствами и организации системы комплексной автоматизации [8–11].

**Структуры испытательных стендов для обкатки АТД**

Стендовые испытания АТД подразделяются на научно-исследовательские, доводочные, прямо-сдаточные и периодические. Наиболее массовыми являются прямо-сдаточные испытания, которым подвергается каждый выпускаемый и капитально отремонтированный дизельный двигатель. Карбюраторные двигатели испытываются выборочно [1]. Однако в связи с усложнением конструкции двигателей, повышением требований к их безотказности, топливной экономичности, токсичности и ужесточением ряда других параметров, а также необходимостью исключения возможности выпуска некачественной продукции многие фирмы-производители АТД ввели полномасштабные стендовые испытания всех выпускаемых двигателей по утвержденным методикам и программам. В настоящее время испытательными станциями АТД оснащены все моторостроительные, автомобильные, тракторные и комбайновые заводы с количеством стендов в каждой до 100–250 единиц.

Научно-исследовательские стендовые испытания более продолжительные и проводятся с инновационными изделиями для экспериментального определения всей совокупности качественных и количественных показателей АТД в статических и динамических режимах с оценкой ресурса и надежности их элементов и узлов. Многие НИИ, КБ и отраслевые лаборатории оснащены небольшими испытательными станциями (10–20 стендов), но практически все работающие установки не удовлетворяют современным требованиям по точности измерений параметров, уровню автоматизации ТП испытаний и др.

Современный испытательный стенд АТД — это сложная взаимосвязанная компьютеризированная система с функциями измерения, управления и мониторинга изделий, которая включает в себя (рис. 1):

- электрическое нагружающее устройство с полупроводниковым регулятором нагрузочного момента и скорости вращения АТД;
- совокупность информационных элементов — интеллектуальных датчиков крутящего момента, скорости вращения, давления масла АТД, температуры отдельных элементов и др.;
- локальные контроллерные САУ нагружающим устройством и системой регулирования мощности ДВС, обеспечивающие скоординированное проведение программы испытаний;
- систему мониторинга, прогнозирования технического состояния и защиты от аварийных ситуаций;
- АСУ испытательного стенда и станции.

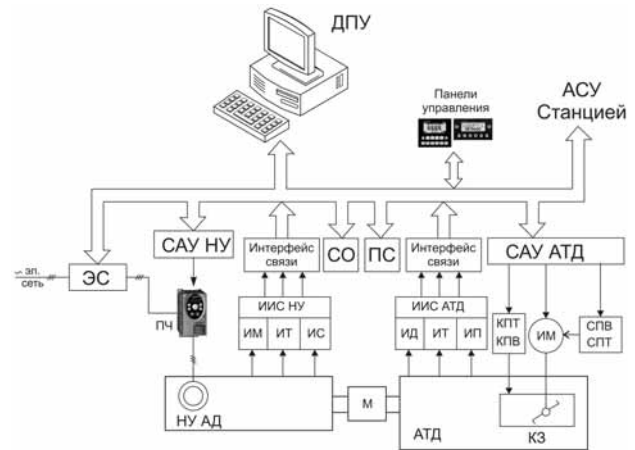


Рис. 1. Испытательный стенд АТД

Классификация НУ может быть осуществлена по различным признакам. В настоящее время одним из основных вопросов, поставленных перед разработчиками НУ, является задача обеспечения ресурсосберегающих технологий испытания АТД. В этой связи основным классификационным признаком принята степень полезного использования энергии испытуемого двигателя. На рис. 2 представлена классификационная схема, где использован именно указанный признак.

В соответствии с этим к первой группе относятся НУ, в которых энергия испытуемого двигателя полностью теряется или утилизация этой энергии осложнена; ко второй группе — НУ, где одна часть энергии АТД рекуперирована в питающую сеть, а другая — полезно не используется; к третьей группе относятся наиболее совершенные НУ, в которых энергия испытуемого двигателя практически целиком преобразуется в электрическую и передается в энергосистему.



Рис. 2. Классификационная схема НУ

Современный испытательный стенд, как правило, включает в себя электрическое НУ с полупроводниковым регулятором тормозного момента и скорости вращения, набор информационных элементов (датчики тормозного момента, скорости вращения, давления масла АТД, температуры отдельных элементов стенда и др.), САУ стендом, развитую систему аварийной защиты, а также связь с АСУ испытательной станцией.

НУ с силовыми полупроводниковыми регуляторами момента и скорости являются особым классом электромеханических систем, где основной регулируемый параметр — нагрузочный момент, а основной режим — режим нагружения с рекуперацией энергии испытуемого АТД. При этом первичным источником энергии в системе является АТД с особыми статическими характеристиками, колебаниями вращающего момента, динамическими свойствами. Процесс испытаний проводится на испытательной станции с большим количеством параллельно работающих НУ. Эти отличия от «классических» систем электропривода определяют подход и необходимый комплекс исследований, требующийся для разработки и создания современных отечественных НУ. Это, в первую очередь, синтез рациональных структур НУ с силовыми полупроводниковыми регуляторами, обеспечивающих не только функциональные характеристики испытательного стенда и энергосберегающую технологию испытаний, но и оптимальные эксплуатационные показатели НУ.

Анализ характера изменения в статических и динамических режимах главного регулируемого параметра — тормозного момента, в частности, его переменной составляющей, обусловлен нелинейностью силового полупроводникового регулятора. Определение спектра частот высших гармоник этой составляющей, его зависимость от структуры силового регулятора определяет характер управления и режимы НУ. Наличие постоянно действующих периодических составляющих вращающего и нагрузочного моментов приводит к необходимости рассмотрения функционирования НУ во взаимосвязи с испытуемым двигателем с учетом упругости отдельных элементов этой системы и особенностей построения датчика тормозного момента, используемого не только в информационном канале испытательного стенда, но и в канале обратной связи НУ. Обеспечение требуемых режимов нагружения АТД ставит задачу формирования нагрузочного момента в статике и динамике, построения замкнутой САУ, разработки точных и быстродействующих датчиков нагрузочного момента.

Нагружающие устройства с полной рекуперацией энергии испытуемого АТД наиболее пер-

спективны и отличаются высокими энергетическими показателями, большой степенью возможностей автоматизации и выполнены на современной элементной базе. Очевидно, что НУ могут быть реализованы только на базе электрических машин в следующих структурах:

1. *НУ по системе «асинхронная машина с короткозамкнутым ротором — преобразователем частоты» (АМ-ПЧ).* Технические и экономические показатели НУ в значительной степени определяются типом ПЧ, питающего асинхронную машину с автономным инвертором тока (АИТ), с автономным инвертором напряжения (АИН), или с непосредственной связью (ПЧНС). Первые два относятся к классу преобразователей частоты со звеном постоянного тока. Автономность инверторов, т. е. независимость их режима от ЭДС нагрузки, обеспечивается применением полностью управляемых приборов или их аналогов на запираемых тиристорах. В третьем типе ПЧНС звено постоянного тока отсутствует, т. е. ток из переменного преобразуется непосредственно в переменный, чем объясняется несколько больший КПД этих преобразователей. Все указанные типы ПЧ отличаются большим многообразием схемных решений, алгоритмов управления, форм выходного напряжения и токов. Основное достоинство данных НУ — использование простой, бесконтактной асинхронной машины, имеющей наименьший, по сравнению с другими нагрузочными электрическими машинами, момент инерции. В этом варианте возможно получение больших скоростей нагружения АТД (более 3000 об/мин) без применения редукторов.

2. *Применение ПЧНС с двухполюсной асинхронной машиной,* собранного по 12-пульсной схеме позволяет получить выходную частоту до 40 Гц и обеспечить нагружение АТД в пределах 0–2400 об/мин, что достаточно для большого числа дизелей и двигателей. Однако схема преобразователя получается довольно сложной — 72 полупроводниковых элемента и 3 согласующих трансформатора. Анализ НУ по системе АМ-ПЧ показывает, что рассматриваемый вариант, имеет ряд неоспоримых преимуществ, но очень сложен и может быть рекомендован для исследовательских целей.

3. *НУ на основе асинхронной машины с фазным ротором и ПЧ образуют так называемую систему «машина двойного питания» (МДП),* которая имеет достаточно простой преобразователь в роторной цепи асинхронной машины. Отличительная особенность таких НУ в том, что через преобразователь проходит лишь часть энергии испытуемого двигателя, пропорциональная скольжению ( $s$ ) асинхронной машины. Это позволяет при двойной синхронной скорости

понижить тормозную мощность, вдвое превышающую номинальную мощность АМ. В качестве нагрузочной машины используется хорошо освоенная в нашей стране и выпускаемая более 30 лет асинхронная балансирующая машина с фазным ротором, которой комплектуются отечественные стенды типа КИ. В зависимости от схемы преобразователя имеют место различные варианты НУ на основе МДП. Наиболее простым надежным НУ из этой группы является система на основе асинхронного вентильного каскада (АВК), которая обеспечивает нагружение АТД в полном диапазоне возможных частот вращения ( $0-2\omega_0$ ). Анализ этого варианта показывает, что, при такой же нагрузочной характеристике, как и НУ на основе АМ-ПЧ, он выгодно отличается простотой схемного решения преобразователя, достаточно надежной и малоинерционной нагрузочной машиной. Следует отметить возможность реализации бесконтактной МДП, что позволяет построить высоконадежную систему.

4. *НУ на основе синхронной машины.* Использование синхронной машины (СМ) в качестве НУ наиболее целесообразно в сочетании с ПЧ, обеспечивающим как полную рекуперацию энергии испытуемого АТД, так и реализацию холодной и горячей обкатки. Возможность применения такого варианта НУ обусловлена развитием исследовательских и конструкторских работ по внедрению в автоматизированном электроприводе вентильного двигателя. Предельная нагрузочная характеристика соответствует варианту АМ-ПЧ. ПЧ такого НУ может быть реализован на обычных тиристорах при естественной коммутации тока. Возможно бесконтактное исполнение синхронной машины (например, СМ с когтеобразными полюсами).

Каждая из рассмотренных структур НУ имеет достоинства и недостатки. В то же время для массового изготовления должна быть рекомендована система, наиболее целесообразная с точки зрения экономичности, надежности и возможностей массового производства.

Поскольку общее развитие регулируемого электропривода ориентировано на системы переменного тока, имеющие преимущества, то целесообразно провести сравнительный анализ рассмотренных выше НУ переменного тока по критериям, характеризующим экономические показатели этих систем. Таким критерием является установленная мощность основного электрооборудования (нагрузочная машина и полупроводниковый преобразователь).

Расчет установленной мощности нагрузочной машины НУ и ПЧ с САУ был проведен из условия нагружения по предельной мощностной характеристике АТД. Рассмотрены три основных

варианта НУ переменного тока, построенных на основе АМ-ПЧ, СМ-ПЧ и МДП. При этом следует иметь в виду, что нагружение в двух первых вариантах по предельной мощностной характеристике может быть осуществлено при двухфазном регулировании до  $0,8\omega_0$  постоянным моментом и после указанной скорости — с постоянной мощностью. Анализ показывает, что наименьшая установленная мощность силового электрооборудования НУ соответствует асинхронной машине с фазным ротором и ПЧ. При этом максимальный выигрыш в 60–70 % имеет место при работе нагрузочной машины со скольжением, равным  $-1$ . Минимальное превышение установленной мощности электрической машин в АМ-ПЧ и СМ-ПЧ составляет 7–10 % от мощности в варианте МДП.

Принимая во внимание, что максимальное значение номинальной мощности электрических машин с напряжением 380/660 В составляет около 400 кВт, можно оценить предельное значение мощности АТД, которое возможно испытывать на данном типе НУ. Для вариантов АМ-ПЧ, СМ-ПЧ оно равно 400 кВт, или 500 л. с., для МДП — 640 кВт, или 870 л. с. Следовательно, НУ, построенное по системе МДП, охватывает по диапазону мощностей практически все автомобильные двигатели, выпускаемые у нас в стране. Очевидно, что граничные кривые экономичности варианта МДП будут лежать выше таких же кривых двух других вариантов НУ переменного тока. В режиме горячей обкатки МДП работает в генераторном режиме, обеспечивая нагрузку работающего АТД в диапазоне скоростей вращения до двойной синхронной ( $0 < \omega < 2\omega_0$ ). Таким образом, можно сделать вывод, что при создании массовых НУ необходимо ориентироваться на устройства с полной рекуперацией энергии испытуемого АТД, базирующиеся на нагрузочных машинах переменного тока. Конкретный тип НУ может быть определен технико-экономическим сопоставлением.

При сверхсинхронной частоте вращения асинхронной машины меняется порядок чередования фаз напряжений ротора, а также их направление. Очевидно, что роторная группа тиристоров ПЧ работает в выпрямительном режиме, а сетевая — инвертором. Здесь вся мощность, поступающая с вала, за вычетом потерь в машине и преобразователе, генерируется в питающую сеть по двум каналам: через асинхронную машину  $P_1$  и преобразователь  $P_1$ .

Для получения тормозного режима ( $M < 0$ ) необходимо изменить фазу тока, что при неизменном векторе напряжения ротора относительно двигательного режима изменяет направление потока мощности. Следовательно, роторный

блок работает инвертором, ведомым частотой скольжения, а сетевой — выпрямителем. Мощность  $P_1|S|$ , получаемая ротором от преобразователя, и  $P_1(1-S)$  с вала машины генерируется статором в питающую сеть. В режиме холодной обкатки МДП работает в двигательном режиме, обеспечивая вращение АТД со скоростью  $0 < \omega < 2\omega_0$ . При работе в двигательном режиме асинхронная машина работает в режиме МДП, получая энергию  $P_1$  через статор, — энергию  $P_1|S|$  через ротор. Этот режим работы — основной и наиболее распространенный. Мощность скольжения  $P_1|S|$  через преобразователь возвращается в питающую сеть, роторная группа тиристоров работает в выпрямительном, а сетевая — в инверторном режимах. Анализ возможных режимов работы МДП в качестве НУ показывает, что электропривод по этой схеме обеспечивает как тормозной, так и двигательный моменты во всех четырех квадрантах осей « $\omega$ – $M$ ».

#### Режим испытаний АТД

Наиболее массовые приемо-сдаточные испытания АТД проводятся для контроля качества изготовления, сборки и регулировки двигателей, находящихся в серийном производстве или капитальном ремонте. Испытания включают определенные мощности и расход топлива при номинальной частоте вращения вала и положении органов управления топливным насосом, соответствующие полной подаче топлива, а также максимальной частоте вращения холостого хода.

При наличии возможностей испытательного стенда, как правило, снимается точка максимального крутящего момента и соответствующая ему частота вращения вала. Показатели двигателя снимаются при установившемся режиме. По результатам испытаний регистрируется мощность, крутящий момент, частота вращения и удельный расход топлива в контрольных точках. Следует отметить, что на многих предприятиях испытания проводятся только в одной точке, что объясняется, в частности, отсутствием возможностей НУ.

Приемо-сдаточные испытания проводятся после предварительной обкатки по специальным программам (рис. 3 и 4), для приработки трущихся поверхностей деталей и узлов к восприятию эксплуатационных нагрузок. Общеизвестна трехстадийная обкатка, включающая холодную приработку (холодная обкатка), приработку на холостом ходу и под нагрузкой (горячая обкатка). При холодной обкатке параметры режимов (частота вращения и продолжительность) определяются особенностями приработки трущихся поверхностей. Высокое качество приработки достигается при малых скоростях скольжения деталей. Так, для двигателей типа СМД оптимальная начальная частота вращения коленчатого вала со-

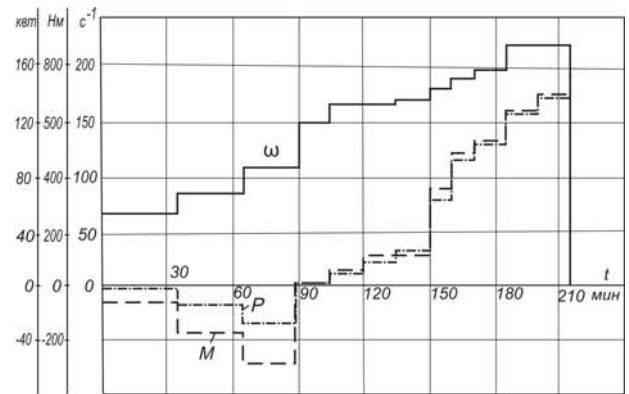


Рис. 3. Типовая нагрузочная диаграмма двигателя ЯМЗ-238

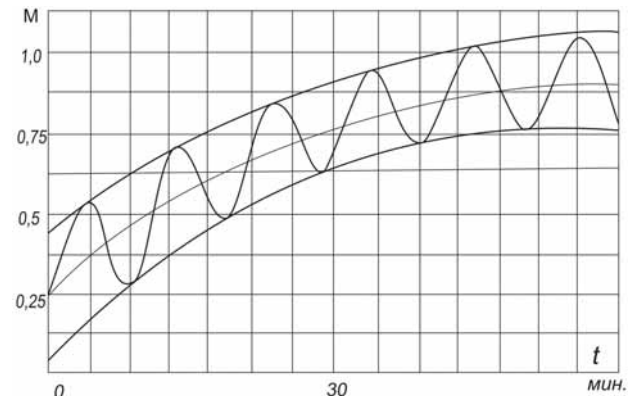


Рис. 4. График нагрузки при ускоренных испытаниях

ставляет 50–100 об/мин. Величина и характер изменения нагрузки в процессе горячей обкатки для каждой модели двигателя различны и лежат в довольно широких пределах. Приработка АТД может производиться с применением как ступенчатого, так и бесступенчатого изменения нагрузки и частоты вращения. При этом в первом случае при холодной обкатке задается не более 5 ступеней, а при горячей — не более 15. Время обкатки составляет 2–3 часа. Предельная мощностная характеристика НУ при горячей обкатке характеризует номинальный режим. При этом необходимо обеспечивать возможность плавного регулирования нагрузочного момента от нуля до номинального значения.

В целях улучшения экологической обстановки на испытательных станциях и экономии топлива при испытаниях в последнее время предлагается сокращать время горячей обкатки с одновременным увеличением холодной обкатки со ступенями работы на номинальной скорости вращения. Периодические кратковременные испытания проводят для контроля соответствия основных параметров дизелей, находящихся в производстве, стандартам и техническим условиям. При этом снимается регулировочная характеристика, опре-

деляются расход масла на угар и минимально устойчивая частота вращения.

Периодические длительные испытания проводятся в целях контроля стабильности параметров и безотказности в стендовых условиях дизелей. Эти испытания имеют общую продолжительность до 800 часов. Испытания состоят из повторяющихся циклов. При испытаниях АТД на надежность используются неустановившиеся режимы работы, в процессе которых непрерывно, с определенной закономерностью, изменяется как крутящий момент, так и частота вращения коленчатого вала. Доводочные, предварительные, аттестационные испытания проводят для определения параметров, указанных в стандартах и технических условиях, по программам периодических длительных испытаний со снятием различных характеристик АТД. Трудоемкость и длительность испытаний колеблется от нескольких до тысяч часов. Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется ускоренным испытаниям, позволяющим сократить время и улучшить качество испытаний.

Анализ основных технических параметров выпускаемых АТД позволяет определить предельную мощностную характеристику НУ по установленной мощности нагрузочной машины и всего НУ. Для этого определяются относительные значения номинальных эффективных мощности и крутящего момента АТД, максимальное значение крутящего момента, а также максимальное значение крутящего момента и соответствующей ему мощности. При этом точка, характеризующая номинальный скоростной режим работы АТД, общая для всех анализируемых двигателей.

Испытания — один из элементов технологического процесса разработки и изготовления двигателя. Они подчиняются общим требованиям к современному автоматизированному производству. Поэтому стенд должен удобно вписываться в автоматизированный испытательный комплекс, т. е. просто сопрягаться с ЭВМ всех уровней и измерительным комплексом. Кроме проанализированных требований к стенду, определяемых технологией испытаний двигателей, перед разработчиками стендов выдвигаются требования, связанные с особенностями работы таких устройств. К их числу относятся требования обеспечения параллельной работы группы стендов, когда станция испытаний АТД состоит из 100–200 стендов, обеспечения аварийной защиты, когда при отключении питающей сети дизель резко теряет нагрузку, реализации необходимого минимума искажения формы кривой питающего напряжения и др.

В заключение приведем основные задачи разработки и создания современных испытательных стендов АТД:

➤ создание стендов, обеспечивающих режимы горячей и холодной обкатки в полном диапазоне частот вращения АТД, стабилизацию нагрузочного момента в заданном скоростном режиме с высокой точностью (0,5 %), воспроизведения нагрузочного момента по различным законам, в том числе по синусоидальному, плавное бесступенчатое регулирование в режиме нагружения;

➤ создание стендов, отвечающих требованию обеспечения ресурсосберегающей технологии испытаний АТД, т. е. стендов, осуществляющих рекуперацию энергии испытуемого двигателя в питающую сеть. При этом эффективность преобразования энергии АТД, определяемая отношением энергии рекуперированной стендом в промышленную сеть к энергии АТД, должно быть не менее 0,8;

➤ создание стендов, обеспечивающих непрерывное измерение основных регулируемых параметров нагрузочного момента и частоты вращения с заданной степенью точности, углового положения коленчатого вала АТД в статических и динамических режимах работы и отвечающих требованиям автоматизации испытаний АТД СУВМ.

#### Литература

1. Асинхронно-вентильные нагружающие устройства: монография // С.В. Хватов, В.Г. Титов, А.А. Поскробко, В.Ф. Цыпхайкин — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 144 с.
2. Крюков О.В., Леонов В.П., Федоров О.В. Применение микропроцессорной техники в нагружающих устройствах // Двигателестроение. — 1987. — № 7. — С. 33–35.
3. Крюков О.В. Микропроцессорное управление машинами двойного питания: монография // НГТУ, Н.Новгород, 1999. — 118 с.
4. Крюков О.В. Нагружающее устройство для обкатки и комплексных испытаний приводных двигателей // Компрессорная техника и пневматика. — 2014. — № 5. — С. 28–32.
5. Киянов Н.В., Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматизированный стенд для обкатки и испытаний автотракторных двигателей // Автоматизация в промышленности. — 2009. — № 6. — С. 52–57.
6. Крюков О.В. Intelligent electric drives with IT algorithms / О. В. Krukov // Automation and Remote Control. 2013. Т. 74. № 6. — С. 1043–1048.
7. Милов В.Р. Процедуры прогнозирования и принятия решений в системе технического обслуживания и ремонта / В.Р. Милов, И.В. Шалашов, О.В. Крюков // Автоматизация в промышленности. — 2010. — № 8. — С. 47–49.
8. Вожаков А.В., Крюков О.В., Лисин Н.Г. О причинах недостаточного эффективного построения и эксплуатации систем автоматизации // Автоматизация в промышленности. — 2012. — № 2. — С. 38–47.
9. Ицкович Э.Л., Перцовский М.И., Крюков О.В. Болевые точки промышленной автоматизации // Автоматизация в промышленности. — 2010. — № 2. — С. 50–57.
10. Агафонов Л.В., Вепринцев А.Н., Крюков О.В. Мода в автоматизации // Автоматизация в промышленности. — 2011. — № 2. — С. 19–28.
11. Аблин И.Е., Клоков А.В., Крюков О.В. Круглый стол о роли отечественных производителей на российском рынке АСУТП // Автоматизация в промышленности, 2012. — № 1. — С. 59–64.