

держит информацию почти о 250 отказах и авариях на различных нефтехимических производствах [4].

Рассмотрим пример детерминированного поиска прецедента по визуально наблюдаемым параметрам повреждения и разрушения детали. Сначала указывается наименование отказавшей детали, ее принадлежность к сборочной единице и механической системе. Информация о воздействующих на деталь проектных факторах и свойствах материала, из которого она изготовлена, включая технологическую наследственность, заполняется автоматически из БД "Оборудование" и заносится в статическую часть формируемого прецедента. Затем вводятся параметры повреждения, разрушения и фактических воздействующих факторов в динамическую часть формируемого прецедента [5].

На основании имеющихся знаний и введенных данных определяются вид деградационного процесса, причины отказа, аварии и мероприятия, ранее принятые в подобной ситуации для предупреждения аналогичных отказов (рис. 2).

#### Список литературы

1. Берман А.Ф. Деградация механических систем. Новосибирск, "Наука", 1998 г.
2. Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю. Инструментальное средство создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений для идентификации технического состояния деталей машин и конструкций // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. М. Рег. № 2005611217 от 25.05.05г.
3. Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю. Инструментальное средство создания информационных систем автоматизации процесса исследования и обеспечения надежности механических систем // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. М. Рег. № 2005611218 от 25.05.05 г.
4. Берман А.Ф., Храмова В.К., Николайчук О.А. База данных по отказам оборудования высокого давления химико-технологических линий по производству полиэтилена // Свидетельство об официальной регистрации Базы Данных. М. – Роспатент. – Рег. № 990010 от 26.02.1999 г.
5. Павлов А.И., Юрин А.Ю. Представление и обработка знаний в интеллектуальных системах повышения безопасности сложных технических систем // Вестник Томского государственного университета. 2004. №9 (II).

*Берман А.Ф. — д-р техн. наук, проф., заведующий лабораторией,  
Николайчук О.А. — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,*

*Павлов А.И. — канд. техн. наук, научный сотрудник, Юрин А.Ю. — канд. техн. наук, научный сотрудник.  
Лаборатория методов автоматизации исследований техногенной безопасности ИДСТУ СО РАН.*

*Контактный телефон (3952)51-14-18.*

*E-mail: berman@icc.ru*

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ВИБРАЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТП

**С.С. Лопатин (Фирма Endress+Hauser GmbH+Co.KG)**

*На примере вибрационных пьезоэлектрических датчиков фирмы Endress+Hauser выявлены три основные направления, связанные с интеллектуализацией приборов этого класса: контроль чувствительного элемента на внезапный отказ; предсказуемое поведение чувствительного элемента и мониторинг степени его эксплуатационной пригодности; адаптация чувствительного элемента к условиям эксплуатации, осуществляемая электронным образом.*

В управлении ТП можно выделить две системы, одна из которых воздействует на процесс, например, нагреватель или компрессор, а другая измеряет его физические параметры, например, температуру или давление. Эти системы связаны между собой через эксперта, который по определенным правилам регулирует процесс в заданных технологических границах. Успехи микроэлектроники последних двух десятилетий позволили реализовать функции эксперта в микропроцессорах. В результате измерительные системы становятся все в большей степени не просто информационными, а высокоинтегрированными информационно-управляющими системами.

На входе такой системы независимо от ее сложности находятся, как правило, аналоговые чувствительные элементы, которые на основе простых физических принципов преобразуют параметры процесса в электрические сигналы. Затем следует предварительная обработка, компенсация ошибок и преобразование сигналов, а далее полученная информация подвергается экспертной оценке с выдачей команды на исполнительное устройство.

Аналоговым чувствительным элементам присущи общие недостатки. Прежде всего, к ним относятся шумы и артефакты, причиной которых является одинаковый отклик датчика на разные физические воздействия. В качестве примеров назовем пьезоэлектрическую чувствительность пьезокерамики или паразитные механические напряжения в мембране датчика давления, возникающие вследствие воздействия на него температуры или в результате старения материалов. За счет совершенствования материалов, конструкции и технологии можно улучшить линейность и уменьшить скорость старения такого чувствительного элемента, но температура остается глобальным параметром, влияющим на точность промышленных датчиков.

Аналоговая электроника предоставляла ограниченное число средств для автоматической коррекции измерений. С развитием микропроцессорной техники такая коррекция существенно упростилась: достаточно оцифровать сигнал чувствительного элемента, и его можно корректировать по калибровочным таблицам, проводить Фурье-анализ, нормировать, под-

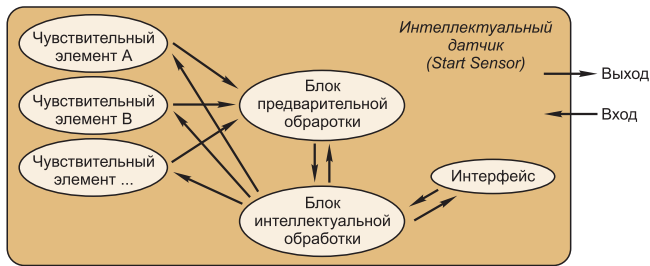


Рис. 1. В понятие интеллектуальный датчик входит измерительная система, которая может состоять из одного или нескольких чувствительных элементов со сложными путями обработки и прохождения информации



Рис. 2. Вибрационный датчик жидкости FTL-20 фирмы Endress+Hauser GmbH+Co.KG

вергать статистической обработке и т.д. в РВ. Так появилось направление интеллектуальной сенсорики, хотя, строго говоря, основные инновации касались не столько чувствительных элементов, сколько обработки сигналов. На первом этапе были разработаны датчики, передающие информацию в компьютер, который производил ее обработку и выдавал управляющие команды. В программах обработки данных измерений стали использоваться сложные алгоритмы коррекции и корреляции измерений, что значительно повысило точность и надежность управления процессами.

Следующий этап интеллектуализации связан с интеграцией чувствительных элементов и микроэлектроники. Возможность свободного программирования микропроцессоров и записи в память калибровочных данных позволила поместить интеллект датчика в непосредственной близости от чувствительного элемента или даже имплементировать его в чувствительный элемент. Благодаря этому возникли интересные перспективы. Во-первых, появилась возможность контролировать дополнительные параметры чувствительного элемента и отслеживать его исправность и достоверность измерений. Во-вторых, для регулировки процессами уже не обязательно использовать компьютер с его громоздкими коммуникациями, большим энергопотреблением и специализированными программами. Если датчик достаточно интеллигентен, то он может непосредственно управлять исполнительными устройствами. В-третьих, благодаря интеллектуализации датчиков, появилась возможность разгрузить управляющий компьютер и подсоединить к нему существенно больше датчиков, чем это было возможно раньше, когда простые измерения требовали ресурсов компьютера. Все это позволяет уменьшить затраты на контрольно-измерительную

технику и одновременно повысить надежность сложных систем автоматического управления ТП.

Реализация этих идей происходит в следующих направлениях:

- модернизация чувствительных элементов с применением современных микроэлектронных технологий и новых материалов;
- совершенствование методов цифровой обработки аналоговых сигналов, применение математической обработки информации в РВ;
- стандартизация команд и протоколов обмена информацией по шинам данных и через Internet.

Основное направление интеллектуализации датчиков до недавнего времени связывалось преимущественно с интеллектуализацией электронной обработки сигналов, в то время как чувствительные элементы зачастую существенно не изменялись. Многие производители контрольно-измерительной аппаратуры осуществляли основные инвестиции в электронику, поддерживая разработку чувствительных элементов лишь на минимально достаточном уровне.

Достоверность и надежность измерения можно повысить, если произвести не одно, а несколько независимых измерений одного и того же параметра разными методами с последующей корреляцией этих измерений. Например, наличие жидкости в сосуде можно определить по преломлению света на границе жидкость/воздух, по плотности, теплопроводности и диэлектрической проницаемости среды. Наиболее достоверным будет такое измерение, когда все четыре независимых физических параметра укажут на жидкость. При этом чувствительность измерения каждого отдельного параметра необязательно должна быть очень высокой, хотя результат анализа по совокупности признаков оказывается абсолютно достоверным. Чувствительные элементы должны передавать адекватную и воспроизводимую информацию, причем их поведение в неординарных ситуациях должно быть предсказуемым. Имея системы таких чувствительных элементов, можно реализовать в микропроцессоре алгоритмы самооптимизации, самозащиты и обучения, существенно повышающие достоверность измерений.

В настоящее время понятие "датчик" расширяется от понятия "чувствительный элемент" до понятия "измерительная система", отражая процесс интеллектуализации сенсорики (рис. 1). Благодаря интеграции блоков обработки сигналов и цифрового интерфейса с чувствительными элементами появилась возможность не только считывать информацию с чувствительного элемента, но и конфигурировать его электронным образом.

Названные тенденции затрагивают не только сложные высокотехнологичные датчики, но и простые, как, например, вибрационные концевые выключатели уровня для жидкостей [1] и сыпучих материалов. Один из таких датчиков, работающий по принципу камертона, показан на рис. 2. Если камер-

тон погрузить в жидкость, то его резонансная частота снизится благодаря присоединенной массе жидкости. Существующие приборы надежно работают в жидкостях с плотностью  $\geq 0,5 \text{ г/см}^3$  в интервале температур  $-60 \dots 280^\circ\text{C}$  (в зависимости от модификации). В принципе, стальные камертоны обладают достаточной чувствительностью, чтобы работать в средах с плотностью ниже  $0,5 \text{ г/см}^3$ . Однако из-за температурного дрейфа резонансной частоты порядка  $0,015 \dots 0,025 \text{ \%}/^\circ\text{C}$  это не представлялось возможным, если попутно не известна температура измеряемой среды. Дополнив измерение резонансной частоты измерением температуры и осуществив температурную коррекцию, можно создать такой датчик, который в том же интервале температур будет надежно реагировать на изменение плотности среды в пределах  $\pm 0,001 \text{ г/см}^3$ .

Дальнейший путь интеллектуализации камертонного датчика — дополнительное измерение параметров добротности чувствительного элемента. Известно, что добротность резонатора зависит от внутреннего трения среды, в которую он помещен. В вязких средах независимо от их плотности добротность камертона ниже, чем в невязких, что приводит к размытию пика амплитуды и изменению фазовых характеристик на резонансе. В результате даже неточного измерения вязкости и плотности среды такой датчик может распознавать пены, наличие газовых пузырьков в жидкостях и давать существенно больше информации о свойствах среды, чем простой концевой выключатель уровня. Таким образом, путем измерения совокупности параметров среды с помощью одного и того же чувствительного элемента можно создать датчик, способный регулировать процесс не только по факту наличия жидкости, но и по ее важнейшим свойствам [2, 3]. Интересно, что все названные технические решения можно реализовать на одном и том же чувствительном элементе без каких-либо его усовершенствований. Для этой цели подходят датчики, выпускавшиеся как в начале 80-х гг., так и современные. Реализация названного решения может происходить не на уровне усовершенствования чувствительных элементов, а на уровне комплексной обработки измерений нескольких независимых физических параметров одного датчика.

В последнее время существенно повысились требования к надежности и достоверности информации, поступающей от датчика. Улучшение этих показателей является одним из важнейших направлений разработки современных датчиков. Под интеллектуализацией чувствительного элемента понимается не улучшение его метрологических характеристик, хотя в современной сенсорике эта задача остается актуальной, а разработка таких устройств, в которых бы дополнительно осуществлялись:

- проверка чувствительного элемента на отказ;
- проверка степени его эксплуатационной пригодности (predictive maintenance);

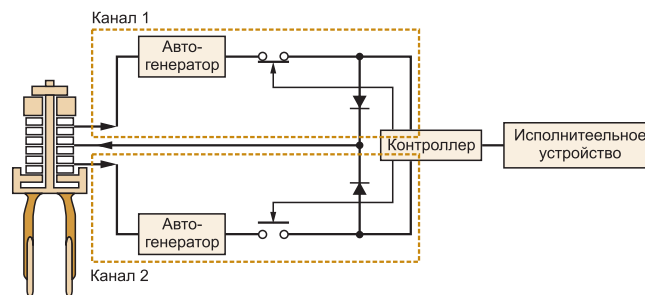


Рис. 3. Схема вибрационного датчика Fail Safe фирмы Endress+Hauser GmbH+Co.KG

с двумя независимыми измерительными каналами [4]

- электронная адаптация чувствительного элемента к условиям эксплуатации.

Если рассматривать выходы из строя чувствительных элементов при их эксплуатации, то следует отличать систематические отказы, причиной которых являются недостатки конструкции, и случайные, связанные с трудно обнаружимыми дефектами сборки, отклонениями параметров деталей за границы спецификаций и т.д. Систематические ошибки у реномированных производителей датчиковой аппаратуры, как правило, исключены. Рассмотрим прежде всего случайные отказы, вероятность которых в пределах гарантийного срока очень мала.

Такие отказы проявляют себя либо внезапно, например, в результате потери контакта непропаиваемой ножки микросхемы с платой, обрыва проводника, либо в виде постепенного увеличения ошибки измерений в результате, например, непредвиденно быстрого старения чувствительного элемента вплоть до выдачи недостоверных данных. Интеллектуальный чувствительный элемент должен допускать выявление не только внезапного отказа, но и такой ситуации, когда показания прибора еще достоверны, но имеют тенденцию стать в ближайшее время недостоверными. В первом случае требуется экстренная замена датчика и остановка ТП. Во втором — возможна неэкстренная замена датчика в подходящее время. И в том, и в другом случаях аварийная ситуация практически исключается.

Рассмотрим, как в современных пьезоэлектрических датчиках вибрационного типа решается проблема контроля внезапного отказа чувствительного элемента. Простой способ распознавания отказа измерительной системы заключается в дублировании функций чувствительного элемента и канала обработки сигнала в одном датчике. При этом исходят из очевидного факта, что одновременный отказ обоих чувствительных элементов маловероятен. Измерение в таком датчике происходит с периодическим переключением с одного измерительного канала на другой. Результаты каждой пары измерений в этих каналах сравниваются друг с другом, и если они отличаются больше допустимой нормы, то датчик выдает сигнал отказа.

Примером такой измерительной системы служит вибрационный датчик уровня жидкости [4]. На рис. 3 показана блок-схема прибора, поясняю-

*Интеллектуальное устройство -  
слишком умный прибор,  
чтобы выполнять простейшие функции*

Журнал "Автоматизация в промышленности"

шая его работу. В этом датчике имеются два независимых приемных пьезоэлемента, осуществляющие положительную обратную связь для двух независимых автогенераторов, которые возбуждают резонансные колебания лопаток камертона. Эти каналы периодически переключаются контроллером и измеренные в каждом канале частоты сравниваются. Если происходит обрыв проводника или отказ электронной схемы одного из автогенераторов, то показания измерений в каналах будут отличаться друг от друга, что однозначно свидетельствует о выходе прибора из строя. Такие датчики отличаются высокой надежностью и хорошо зарекомендовали себя для защиты емкостей от перелива.

В последнее десятилетие также получили развитие датчики, способные не только диагностировать случайные отказы, как это было рассмотрено выше, но и степень своей пригодности для измерения физических параметров. Речь идет о датчиках с оценкой степени эксплуатационной пригодности.

В качестве примера рассмотрим камертонный концевой выключатель уровня, аналогичный показанному на рис. 2. При длительном использовании такого датчика в горячей воде на чувствительном элементе может образоваться слой накипи, увеличивающий массу лопаток камертона. В результате таких отложений резонансная частота камертона в воздухе может снизиться настолько, что прибор не сможет переключаться из состояния "заполненный" в состояние "пустой". Для своевременного распознавания таких отказов предложено контролировать массу лопаток с помощью высокочастотной моды колебаний камертона (рис. 4) [5]. На основной моде колебаний камертон обладает наибольшей чувствительностью к плотности среды, так как площадь воздействия на среду колеблющихся лопаток максимальна. На высокочастотной моде (рис. 4) эта площадь минимальна, поэтому частота камертона слабо зависит от плотности жидкости. Вместе с тем, эта частота

существенно зависит от массы лопаток, что и используется для оценки количества отложений.

Согласно предложенному решению [5], электронный блок периодически переключается на возбуждение высокочастотной моды и измеряет частоту резонанса на ней. По мере осаждения накипи эта частота снижается, достигая порогового значения, после чего прибор выдает предупреждение о необходимости замены чувствительного элемента, оставаясь при этом еще достаточное время полностью работоспособным. Аналогичным образом реализуется контроль степени

коррозии камертона. При точечной коррозии уменьшается жесткость лопатки камертона, а при равномерной коррозии — ее масса. В обоих случаях изменяется частота резонанса на высокочастотной моде, что служит признаком приближающегося отказа датчика.

Интересные конструкции пьезоэлектрических ультразвуковых датчиков можно реализовать с использованием изменения упругих характеристик пьезокерамических материалов. Известно, что упругость пьезоэлемента зависит от того, замкнуты или разомкнуты его электроды. При этом модули упругости пьезокерамики на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) в этих двух состояниях отличаются, что позволяет изменять частоту резонанса вибраторов на толщинных колебаниях.

На рис. 5 показан преобразователь Ланжевена, в котором активная часть пьезоэлементов используется для возбуждения продольного резонанса, а пассивная часть — для изменения упругости резонатора. Поскольку частота резонанса зависит от упругих характеристик его составных частей, изменяя упругость пассивной части пьезоэлементов путем замыкания или размыкания электродов, можно в определенных пределах изменять эту частоту. На экспериментальных образцах подобных вибраторов с пьезокерамикой Sonox P5 и стальными накладками было достигнуто смещение резонансной частоты до 8% в результате простого короткого замыкания и размыкания электродов пассивных пьезоэлементов.

Эффект изменения жесткости пьезокерамики можно использовать для контроля степени поджатия накладок и пьезоэлементов в резонаторах. В конструкции,

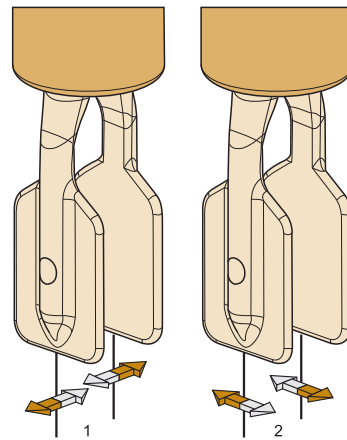


Рис. 4. Моды колебаний камертона, используемые для распознавания жидкости (1 — основная мода) и отложений или коррозии (2 — высокочастотная мода). Различие в окраске стрелок обозначает отличие фазы колебаний на 180°

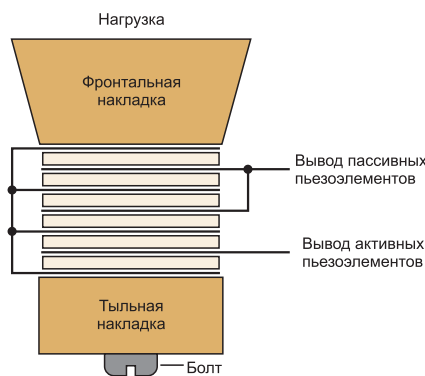


Рис. 5. Ультразвуковой преобразователь Ланжевена с пассивными пьезоэлементами, позволяющими изменять резонансную частоту благодаря изменению жесткости пассивных пьезоэлементов



состоящей из нескольких элементов, общая жесткость определяется наименее жестким элементом. Если жесткость пьезоэлементов соизмерима с жесткостью конструкции резонатора, то путем короткого замыкания и размыкания электродов пассивной группы пьезоэлементов можно в определенной степени изменять резонансную частоту этого резонатора. В случае ослабления поджатия в резонаторе изменение жесткости пассивных пьезоэлементов оказывает меньшее влияние на частоту резонанса, так как доминирующей является жесткость самого слабого элемента конструкции. На рис.6 показано влияние силы поджатия болтом на изменение резонансной частоты многослойного резонатора в результате короткого замыкания пассивной группы пьезоэлементов. Эксперименты показывают, что с помощью такого простого измерения можно своевременно распознать ослабление поджатия в многослойных резонаторах до того, как датчик выйдет из строя.

Эффект управляемой жесткости пьезокерамики может найти применение в ультразвуковых эхолотах, датчики которых имеют четвертьдлинноволновый слой для согласования акустических импедансов преобразователя и нагрузки. Накладки резонаторов обычно изготавливают из металлических сплавов, а для согласования с воздухом используются полимеры, имеющие низкий акустический импеданс. При этом температурные зависимости скоростей звука металлов и полимеров сильно отличаются. В результате датчик, согласованный при комнатной температуре, становится рассогласованным и теряет эффективность при повышенных или пониженных температурах. С помощью подстройки частоты резонанса вибратора благодаря изменению упругости пьезоэлементов можно улучшить акустическое согласование датчика со средой и тем самым повысить его эффективность в широком интервале температур.

Последний пример иллюстрирует принцип адаптации чувствительного элемента к условиям эксплуатации. Отличительной особенностью таких адаптивных датчиков является возможность влиять на их механические параметры с помощью электронных цепей. Это направление в разработке чувствительных элементов пока довольно ново и его потенциал в полной мере еще не раскрыт.

Подводя итоги, можно прийти к следующему заключению. В разработке вибрационных пьезоэлектрических датчиков выделяются три основные направления, связанные с интеллектуализацией приборов:

- контроль чувствительного элемента на внезапный отказ;

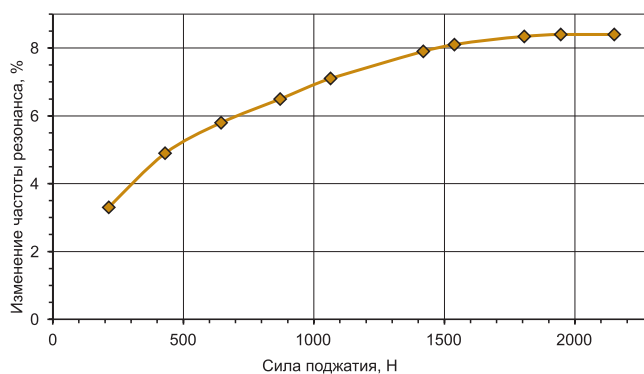


Рис. 6. Влияние силы поджатия в многослойном резонаторе на изменение частоты резонанса в результате короткого замыкания электродов. Измерения выполнены на преобразователе с двумя стальными накладками толщиной 15,5 мм и кольцевыми пьезоэлементами из Sonoх P5 с внешним диаметром 11 мм, внутренним – 6 мм и толщиной 1,5 мм; активная часть состояла из двух таких пьезоэлементов, а пассивная – из восьми

- предсказуемое поведение чувствительного элемента и мониторинг степени его эксплуатационной пригодности;
- адаптация чувствительного элемента к условиям эксплуатации, осуществляемая электронным образом.

Использование таких чувствительных элементов в совокупности с микропроцессорной техникой позволяет реализовать более надежные алгоритмы обработки измеряемой информации и приблизить функции контрольно-измерительной аппаратуры к таким важным функциям живых организмов, как возможность адаптации к окружающей среде, самообучение, регенерация утраченных функций, самоконтроль и прогнозирование функциональной пригодности.

#### Список литературы

1. Лопатин С.С., Пфайффер Х. Датчики предельного уровня для жидкостей. Физические принципы работы и возможности вибрационных датчиков // Автоматизация в промышленности. 2004. №12.
2. Lopatin S., Muller A. Method and device for determining and/or monitoring the level of medium in a container, or for determining the density of a medium in a container. Int. Veröffentlichungsnummer WO 02/42724 A1.
3. Getman I., Lopatin S. Vorrichtung zur Bestimmung und/oder Überwachung der Viscosität eines Mediums in einem Behälter. Offenlegungsschrift DE 10050299 A1.
4. Dreyer V., Struett B. Device for determining and/or monitoring a predetermined material level in a container. Pat. US 5631633.
5. D'Angelico S., Lopatin S. Method and apparatus for establishing and/or monitoring the filling level of a medium in a container. Pat. US 6389891 B1.

*Лопатин Сергей Семенович — канд. хим. наук,  
инженер отдела вибрационных датчиков уровня компании Endress+Hauser GmbH+Co.KG.  
Контактный телефон (495) 783-28-50. E-mail: serguei.lopatin@pctm.endress.com*

Уважаемые читатели! Продолжается подписка на журнал "Автоматизация в промышленности" на 2006 г.  
Оформить подписку Вы можете:

В любом почтовом отделении

Индексы в каталоге "Роспечать" – 81874,  
в Объединенном каталоге "Пресса России" – 39206

В редакции и

Сети Интернет по адресу: [www.avtprom.ru](http://www.avtprom.ru)