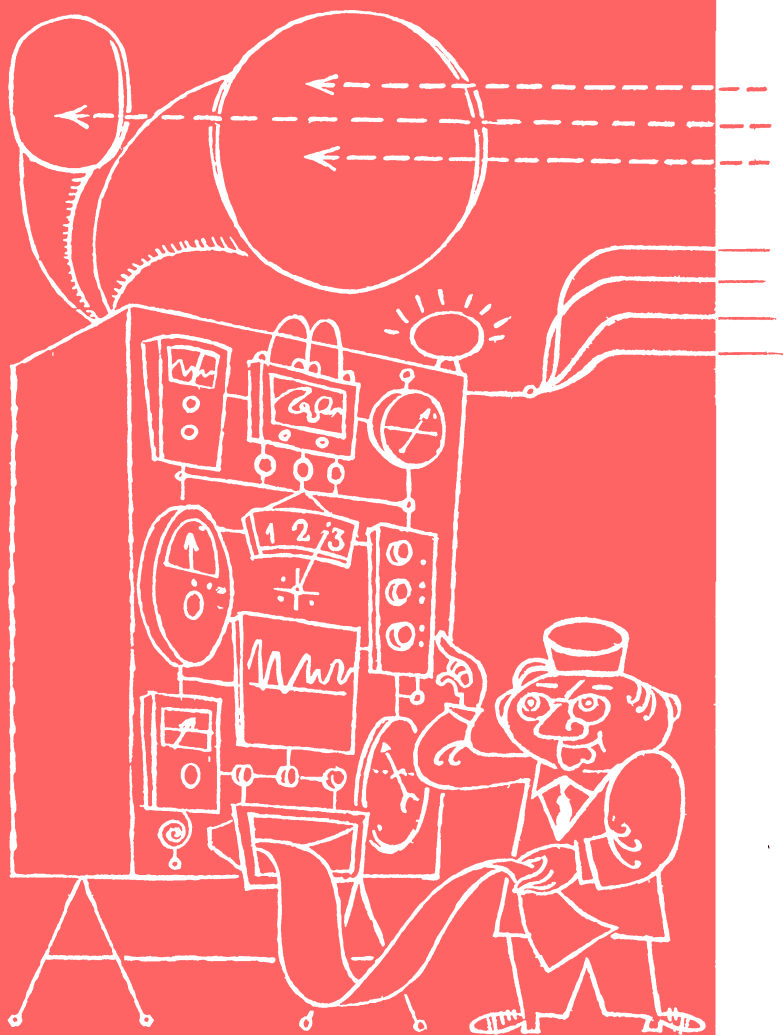
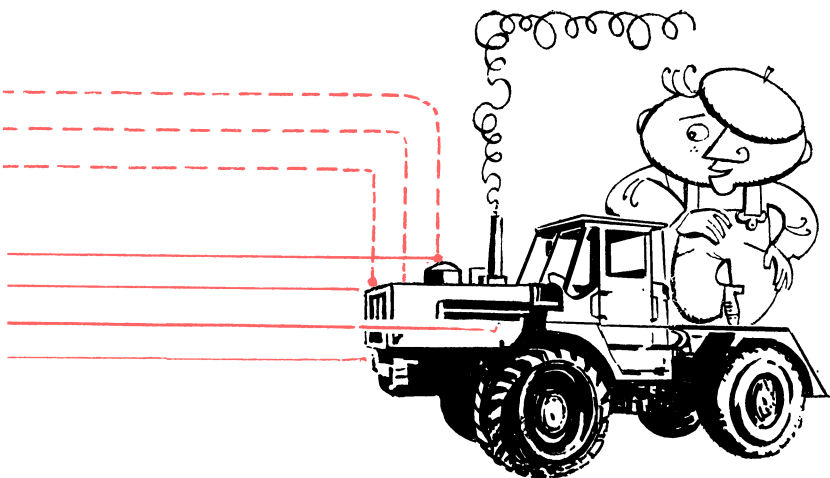


Б.В. ПАВЛОВ  
**ДИАГНОСТИКА**  
**\* БОЛЕЗНЕЙ \***  
**МАШИН**

*Научитесь понимать  
язык машины, и она  
расскажет вам о своем  
самочувствии и своих  
недугах.*







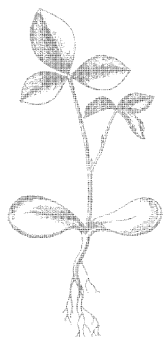
Б.В. ПАВЛОВ

# ДИАГНОСТИКА \* БОЛЕЗНЕЙ \* МАШИН

*(Как инженеры овладевают  
языком машин)*

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ  
И ДОПОЛНЕННОЕ

МОСКВА «КОЛОС» 1978



631.3

П12

УДК 631.3—192

**Павлов Б. В.**

**П 12** Диагностика «болезней» машин. (Как инженеры овладевают языком машин.) Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Колос», 1978.

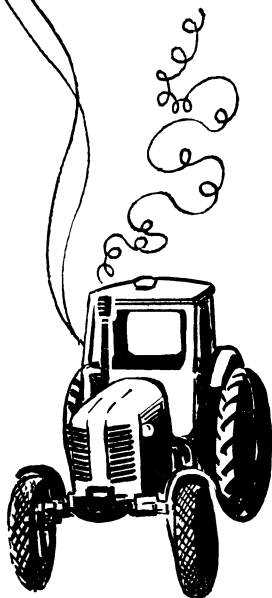
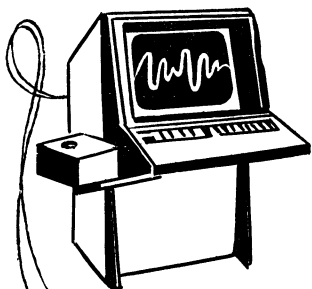
143 с. с ил.

В предлагаемой книге в занимательной форме рассказано о современной теории надежности машин; о сигналах, которые посылают детали машины, нуждающиеся в регулировке, ремонте или замене; о способах расшифровки этих сигналов.

Второе издание (первое вышло в 1971 г.) по сравнению с предыдущим дополнено новыми сведениями о методах и способах технической диагностики. Книга рассчитана на широкий круг читателей.

П  $\frac{40202-093}{035(01)-78}$  35—78

631.3



## От издательства

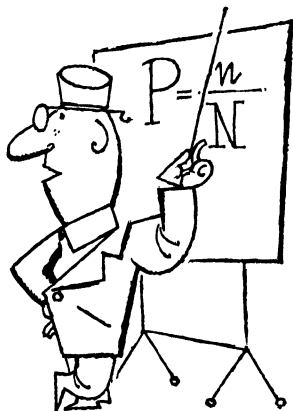
*Проблема повышения надежности техники — одна из главных проблем нашего века. Развитие технической диагностики — одно из основных направлений борьбы за повышение эффективности общественного производства. Объективный контроль готовой продукции должен закрыть доступ недоброкачественных изделий к потребителям, а точные знания о происходящих в машине изменениях во время ее эксплуатации позволят принимать обоснованные решения при обслуживании и ремонте.*

*Любая машина подробно рассказывает о своем состоянии, своих недугах — нужно только понимать ее язык. Как это делается, как инженеры овладевают языком машин, станет понятным, если читатель познакомится с содержанием данной книги, где автор в простой и сжатой форме изла-*

гает современные представления о проблеме технической диагностики, достигнутые результаты и направления ее дальнейшего развития. Как работник сельского хозяйства, автор прежде всего имел в виду потребности сельской инженерной службы, где проблема надежности техники приобрела в настоящее время особую остроту.

Книга предназначена для механизаторов и инженерно-технических работников, занятых в области эксплуатации, технического обслуживания и ремонта машин.

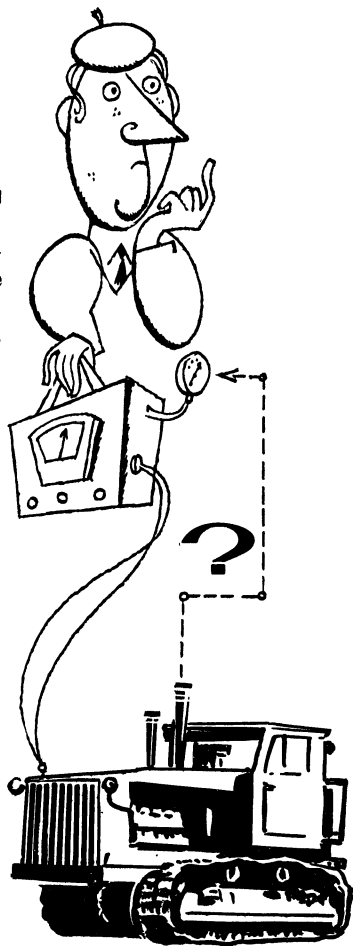
Отзывы просим присылать по адресу: Москва, К-31, ул. Держинского, д. 1/19, издательство «Колос».



## Вместо предисловия

В предисловии к «Персидским письмам» Монтескье так объяснил, почему он избегает касаться обстоятельств собственной биографии: «У самой книжки достаточно изъянов, зачем же представлять критике еще и недостатки ее автора». Но, вопреки этим соображениям и традиции, эту научно-популярную книжку мне хочется начать с воспоминаний...

В 1953 году тысячи инженеров промышленности и транспорта изъявили желание поехать в деревню, чтобы улучшить использование техники, поставки которой увеличивались из года в год. Мне тоже пришлось сменить благоустроенный город Ригу на затерявшуюся среди псковских болот деревню Большое Загорье. Я родился, вырос,





а затем и партизанил вблизи этих мест, но Ленинград и Рига за несколько лет превратили деревенского паренька в закоренелого горожанина. Сельская жизнь, изображаемая в кинофильмах и книгах, казалась мне более правдоподобной, чем собственные впечатления детства и юности. Поэтому встреча с земляками не обошлась без недоразумений с обеих сторон.

— Вот это настоящий инженер, даже в шляпе! — передавала на следующее утро квартирная хозяйка первые впечатления соседок о ее постояльце.

...Принимал я дела от бывшего главного инженера МТС Андрея Розанова. Хотя состоял он в этой должности с довоенных лет, но по манерам, стилю работы так и остался разъездным механиком. Даже совсем юные трактористы не проявляли к нему особого почтения и при обращении называли просто Андреем. Распоряжаться судьбой машин, действовать ключом и отверткой ему было легче и отраднее, чем организовывать работу людей и анализировать ход событий на бумаге.

Смену положения Розанов воспринял болезненно. Мне было жаль его, но отступать было поздно, да это и не помогло бы ему — не меня, так другого дипломированного инженера обязательно прислали бы на его место.

Сначала Розанова назначили механиком-контролером ремонтной мастерской, но он вместо того, чтобы пользоваться новеньким, с большим трудом приобретенным комплектом точных измерительных приборов, подносил подшипник к уху, и встряхнув его несколько раз, говорил трактористу:

— Ставь его смело! Лето отработает как миленький.

А приборы так и лежали в кладовой — с них даже не смыли заводскую смазку. После нескольких безрезультатных попыток перевоспитать старого механика пришлось перевести его в снабженцы.

...В напряженной суете и хлопотах зима промелькнула как один день. Начался мой первый весенний сев.

Как-то вечером я возвращался на мотоцикле из кол-

хоза, где три дня налаживал работу техники. Ощущение было такое, как у матери, отходящей на цыпочках от уснувшего ребенка — неосторожное движение и он проснется. Я уже несколько раз делал попытки покинуть колхоз, но всякий раз меня догоняли с сообщением об очередной аварии. Но сейчас как будто все было в порядке — кругом над полями в вечерющем воздухе растекался спокойный гул моторов. Я уже хотел прибавить газу, как наперерез с боковой дороги выскочил велосипедист — тракторист из соседнего колхоза. Молодой паренек, чуть не плача, сообщил, что уже четыре дня они не могут наладить трактор.

Трактор стоял в белой, прозрачной березовой рощице, на краю поля. Бригадир, его помощник и второй тракторист устанавливали на место капот после очередной разборки мотора. Потом бригадир намотал шнур на маховик пускового двигателя и, сильно дернув его, запускал мотор.

Все застыли, провожая взглядом клубы дыма, выбрасываемого из выхлопной трубы. Когда смолк треск пускового двигателя, добродушный рокот заработавшего мотора показался здоровым и бодрым. Лица посветлели. Но это длилось несколько мгновений. Глухой и грубый шум выхлопов отчетливо прорезал тонкий металлический звон, как робкая жалоба на боль, и этот пронзительный звук острой болью вонзился в сердце каждого, кто стоял у трактора.

— Это стучит поршневой палец, — решительно заявил я.

— Пальцы и втулки мы все заменили, — удрученно возразил бригадир.

— Уж пять раз разбирали этот чертов двигатель до последнего болтика, — раздраженно пояснил тракторист. — Теперь ему только килограмма динамита не хватает.

— Проклятые дизели! — подал голос пожилой помощник бригадира. — Ничего в них не разберешь. Зачем их только ставят на тракторы! У керосиновых моторов все детали были на виду.

— Ты их тоже ругал, — меланхолично заметил бригадир, — когда тебя с телеги на трактор пересаживали.

За ужином, у костра, разговор вертелся вокруг стуков в двигателях. Припоминали различные случаи. В прошлом году у одного трактора тоже долго не могли устранить стук, а оказалось, что в головке блока была трещина и в цилиндры попадала вода.

Головку сняли быстро. Никаких трещин не обнаружили, но на всякий случай решили ее заменить запасной. Снова напряженное ожидание, надежда, но когда двигатель снова завели, проклятые молоточки по-прежнему отчетливо и вызывающе стучали по металлу в его железных внутренностях.

Несколько минут все удрученно молчали, и я чувствовал на себе вопрошающие взгляды.

— И что теперь будем делать? — раздраженно спросил тракторист, который был постарше.

— А может, постучит, постучит и перестанет, — робко подал голос второй тракторист — тот, что встретил меня на велосипеде.

— Нужно послать за Розановым, — решительно предложил бригадир.

От сознания своего бессилия было стыдно и горько, но я был наслышан о талантах бывшего главного инженера, поэтому, подавив самолюбие, согласился.

Его привезли на моем мотоцикле. Прежде всего он неторопливо свернул козью ножку и закурил, рассеянно слушая горестные жалобы на капризный мотор. Один из трактористов, распалясь, раздраженно пнул сапогом по стальной гусенице трактора и сердито крикнул:

— У, зараза!

Розанов посмотрел на него прищуренным глазом и укоризненно заметил:

— Ухаживать за машиной надо.

— А чего за ней ухаживать — она железная!

Прежде чем завести мотор, Розанов поправил хомутики, крепящие топливопроводы, чтобы медные трубки не тер-

лись о чугунный блок, и погладил двигатель, словно прихворнувшую лошадь. Рука у него была легкая, спокойная, уверенная — все почувствовали, что машина сейчас получит помощь.

Двигатель запустили. Розанов посмотрел на клубы выхлопного дыма, постоял, послушал и махнул рукой, чтобы заглушили мотор.

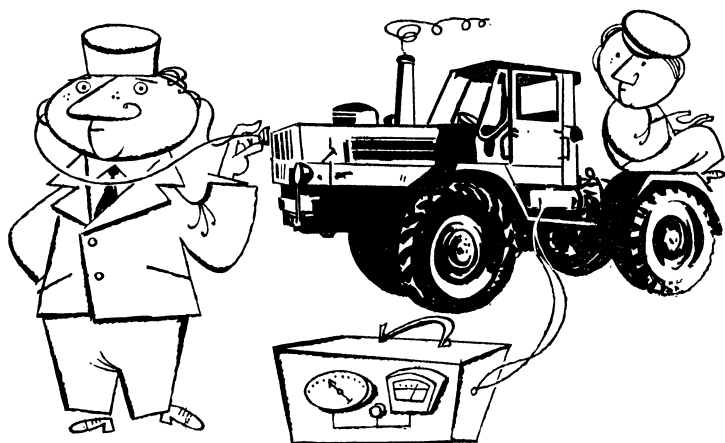
Ему понадобилось ровно пятнадцать минут, чтобы изменить начало подачи топлива в цилиндры, но когда трактор завели, мотор заработал ровно и спокойно, словно никаких молоточков у него внутри никогда не было.

Трактор быстро пошел по полю, оставляя за собой тяжелые черные пласты земли, перевернутой плугом, а подъехавший незадолго перед тем председатель колхоза философски изрек:

— Да, в институте такому не научишься. Это дар божий, талант! — и, помолчав, добавил: — Но на божьем даре механизацию не построишь.

После я много раз наблюдал, как Розанов ставит диагноз машине. В цилиндрах, над поршнями взрываются заряды топлива, поднимаются и опускаются клапаны, детали скользят друг по другу, сталкиваются, шумят, стараясь перекрычать друг друга, а он в этом хаосе звуков слышит и узнает голосок каждой из них, ловит их жалобы и просьбы.

Розанову не удалось передать мне свою чуткость и интуицию. Иногда я не видел и не слышал ничего подозрительного в машине, которая через несколько минут должна была развалиться. Другой раз я улавливал стуки и скрежеты, но не мог сообразить, откуда они идут и о чем предостерегают. Но, наблюдая за действиями талантливого механика, я понял, что для того чтобы суметь поставить диагноз машине, нужно научиться выделять из ее шума голоса отдельных деталей и по этим голосам распознавать их недуги. Об этом я постарался рассказать в этой книге.



### Надежность машины

Когда хотят подчеркнуть особую регулярность наступления и постоянство действия каких-либо событий в природе, в обществе, в судьбе человека, то ход событий уподобляют действию машины.

Сердце спортсмена и вообще здорового человека принято сравнивать с мотором. Под этим подразумевается его безотказная и надежная работа. А между тем нет сравнения менее точного, чем это.

Всего около 100 часов в среднем работает трактор от одной поломки до другой, а комбайн и того меньше. Частые поломки и длительные простои оборудования отрицательно сказываются на произ-

**ОТ СТИХИИ АВАРИЙ  
К ИХ ПРОГНОЗУ  
И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ**

водительности машинно-тракторного парка, увеличивают издержки производства и ухудшают условия труда механизаторов. Но дело усугубляется тем, что поломки в машинах возникают неожиданно. Кого не брала досада, когда в напряженную, горячую страду вдруг неожиданно останавливался трактор или комбайн!

Опасность появления неисправностей у различных машин неодинакова: одни ломаются чаще, другие — реже. Степень нашего доверия к машине обычно выражают словом надежность.

Взросшая роль техники в производстве и в повседневной жизни современного человека привлекла внимание многих ученых и инженеров к проблеме поломок машин.

Эта проблема стала одной из важнейших научно-технических проблем нашего времени. За последние годы сформировалась самостоятельная отрасль науки о неисправностях в технических устройствах — теория надежности. Она изучает закономерности, которым подчиняются эти неприятные явления, и ищет пути снижения ущерба, который с ними связан.

Любая современная наука начинается с измерения. Теория надежности также началась с установления количественных показателей, которыми можно измерить степень доверия к машине. Сейчас существуют больше полсотни таких показателей, которые называются критериями надежности. Мы коротко расскажем о трех из них, которые применяются чаще других.

Организуем наблюдение за работой  $N$  однородных машин, скажем тракторов одной марки. За время наблюдения  $T$  мы зарегистрируем у этих машин  $n$  поломок. Поскольку общее время работы всех машин равно произведению  $NT$ , то отношение этой величины к числу поломок

$\tau = \frac{NT}{n}$  будет характеризовать среднее время безаварийной работы машины. Эту величину в теории надежности называют средней наработкой машины на один отказ. Очевидно, чем больше машина работает от одной

поломки до другой, т. е. чем больше величина  $\tau$ , тем выше ее надежность. Для современного трактора наработка на один отказ составляет примерно 100 часов, а для некоторых тракторов, скажем Т-4 или Т-150, она значительно меньше. У трактора, прошедшего капитальный ремонт, отказы возникают примерно в два раза чаще, чем у нового, и, значит,  $\tau$  у него в два раза меньше. Показатель  $\tau$  очень удобно использовать для сравнения надежности машин, выпущенных разными заводами или отремонтированных в разных мастерских. Этот критерий надежности характеризует культуру производства и ремонта.

Поскольку поломки происходят неожиданно, моментом их возникновения управляет случай, то степень доверия к машине удобно измерять вероятностью, что она исправно проработает заданное время.

Если за время наблюдения  $T$  у  $m$  машин из  $N$  произойдут поломки, а  $N - m$  машин проработают это время исправно, то отношение  $P(T) = \frac{N - m}{N} = 1 - \frac{m}{N}$  будет ха-

рактеризовать вероятность безаварийной работы данного вида машины в течение  $T$  часов. Очевидно, эту вероятность можно принять в качестве оценки нашего доверия к машине. О надежности часто так и говорят, что это вероятность исправной работы машины в течение установленного времени в заданных условиях эксплуатации. Этот критерий надежности обычно используют при расчетах элементов системы технического обслуживания (необходимое число «летучек» для обслуживания парка машин, размер обменного фонда агрегатов, оптимальный уровень запаса деталей в складе и т. д.).

Частота поломок — важный показатель надежности. Но не менее существенна быстрота, с которой испортившаяся машина возвращается в строй. Обозначим  $\theta$  среднюю длительность простоя машины после аварии. Отношение  $K = \frac{\tau}{\tau + \theta}$  характеризует относительное время пребывания машины в работоспособном состоянии. Этот

показатель называют коэффициентом готовности машины. Он указывает, что борьбу с простоями техники следует вести по двум направлениям: во-первых, нужно повысить качество изготовления, ремонта и обслуживания машин, чтобы увеличить  $\tau$ , и, во-вторых, система обслуживания должна обладать высокой оперативностью, чтобы каждый выход машины из строя устранялся как можно быстрее.

Начало теории надежности положили специалисты в области электронных устройств, и прежде всего специалисты по вычислительным машинам. Они первые столкнулись с трудностями создания условий для безотказной работы очень сложного оборудования. Электронная вычислительная машина состоит из десятков и даже сотен тысяч элементов. Если не принять своевременных мер, то она и часа не проработает исправно. Не один, так другой элемент за это время обязательно выйдет из строя. Сложность устройства и его надежность тесно связаны между собой. Обычный молоток — практически безотказный инструмент, потому что он состоит всего из двух деталей. Но надежность, скажем, пневматического молота уже значительно ниже, так как в нем много деталей, и каждая из них таит в себе потенциальную возможность сломаться или выйти из строя по другим причинам.

Тракторы, комбайны, автомобили — тоже очень сложные устройства, причем с каждым годом их конструкции усложняются. Современный трактор состоит из десяти тысяч деталей. По сравнению с первым трактором «Фордзон» или СХТЗ конструкция дизельного трактора стала сложнее в несколько раз. Говоря о надежности машин, можно иметь в виду не только отдельные из них, но и весь машинно-тракторный парк, а это будет уже система, не уступающая по сложности вычислительной машине.

Основная задача теории надежности — это предсказание аварий и поиск путей их уменьшения. Один из таких путей очевиден — это улучшение качества деталей, из которых собирают машину. Однако следует иметь в виду, что улучшение качества одной-двух деталей не приведет



к существенному повышению надежности машины. Примером может служить коленчатый вал тракторного дизеля. За последнее время, после внедрения центробежной очистки масла, износостойкость коленчатого вала увеличилась в 2,5—3 раза, а между тем число поломок трактора и его простои не уменьшились. Чтобы существенно повысить надежность машины, нужно улучшить качество изготовления и ремонта всех или по крайней мере большинства деталей.

Многие механизаторы условно делят детали трактора на ответственные и неответственные. Ответственными считают коленчатый вал, поршневую группу, блок цилиндров, корпус заднего моста и некоторые другие детали, на которые приходится основная тяжесть работы, выполняемой трактором. При отнесении детали к этой группе немалую роль играет ее стоимость. К таким деталям и отношение ответственное. При укладке в блок коленчатого вала обязательно присутствует заведующий мастерской или механик-контролер, при сборке поршневой группы тщательно подгоняют поршневые пальцы к отверстиям в бобышках поршня и к втулкам шатуна. При преждевременном выходе из строя ответственной детали ищут виновников, на завод или в ремонтную мастерскую посылают рекламацию. Иное отношение к неответственным деталям.

Мало кому придет в голову посылатъ на завод рекламацию при выходе из строя распылителя форсунки, при изломе питательной трубки или разрыве сальника. Стоимость этих деталей соизмерима со стоимостью почтовой марки.

Но такая калькуляция обманчива. Исследования, проведенные учеными Сибирского научно-исследовательского института механизации и электрификации сельского хозяйства (СибИМЭ), показывают, что так называемые неответственные детали являются виновниками 75% поломок и простоев тракторов. В машине нет неответственных деталей, поэтому в борьбе за повышение надежности ма-

шины нужно стремиться к тому, чтобы каждая ее деталь была высокого качества и без дефектов.

Зеркалом производственной культуры служат мелочи, от них в основном зависит надежность машины. Если у выходящего из мастерской трактора помят капот, плохо закрываются двери кабины, болтаются питательные трубки, там и здесь видны подтеки масла, то доверия к такой машине нет никакого. Она подведет хлебороба в страду, даже если ремонтники поклянутся, что «внутренности» у трактора отличные.

Однако это не единственный путь повышения надежности техники. Другая возможность состоит в дублировании ненадежных элементов. Этот прием называется *резервированием*. Он часто используется в технике и широко распространен в природе. Человек имеет два глаза, два уха, две руки, две почки, два легких. При отказе одного из этих органов другой обеспечивает полноценное функционирование организма. Следуя примеру, продемонстрированному природой, конструкторы оснащают автомобиль двумя тормозами — ручным и ножным, устанавливают на него две фары. Но в механических устройствах такое резервирование в чистом виде встречается нечасто. Если на трактор в целях повышения его надежности установить два двигателя, две коробки передач, два задних моста, то машина станет неоправданно сложной и громоздкой. Поэтому поступают иначе. Для того чтобы справиться с работой, несмотря на возможные аварии машин, хозяйство приобретает резервные тракторы, комбайны, сеялки и т. д. Этой же цели служит обменный фонд запасных узлов, который позволяет быстро заменить исправным вышедший из строя агрегат. Резервированием является и запас деталей, который хранится на складе запасных частей, а иногда и непосредственно на тракторе.

Поскольку резервирование связано с затратами, возникает вопрос, что выгоднее: содержать в запасе целые машины или только их разрозненные агрегаты, а может лучше ограничиться запасом деталей? Теория надежности

дает строгие методы решения этой задачи. Зная состав парка и частоту выхода из строя машин и их элементов, можно рассчитать, пользуясь формулами теории надежности, сколько тех или иных узлов и деталей следует иметь в хозяйстве, чтобы уложиться в норматив средств, выделенных на создание резерва, и чтобы простои техники при этом были минимальны.

Из теории надежности вытекает, например, такая практическая рекомендация, которую следует иметь в виду, создавая обменный фонд. При равных условиях и ограниченных денежных средствах сложные агрегаты выгоднее расчленить на отдельные узлы. Это и понятно. Если мы храним в запасе исправный двигатель, то он позволит нам быстрее пустить в ход только один трактор, потерпевший аварию. Пройдет немало времени, прежде чем испортившийся двигатель будет отремонтирован и его снова можно будет использовать в качестве обменного агрегата. Но если этот же запасной двигатель расчленить на узлы (топливную аппаратуру, клапанный механизм с головкой блока, муфту сцепления и т. д.), то мы сможем устранить аварии одновременно у нескольких тракторов. Ведь никогда не бывает так, чтобы у всех испортившихся тракторов сразу вышли из строя одни и те же узлы. Расчеты при помощи формул теории надежности показывают, что один запасной двигатель, расчлененный на отдельные узлы, дает примерно такой же эффект, как и пять запасных двигателей, хранящихся в сборе. Надежность машин существенно зависит от организации их обслуживания. Теория надежности и здесь приходит на помощь. Сколько аварий следует ожидать за тот или иной промежуток времени, какова должна быть производительность системы технического обслуживания, сколько нужно иметь в хозяйстве автопередвижных мастерских, сколько бригад мастеров-наладчиков — формулы теории надежности позволяют получить ответ на все эти вопросы.

Например, при организации работы передвижных мастерских всегда возникает вопрос, что лучше: объеди-

нить ли все мастерские, подчинив их диспетчеру колхоза, или совхоза, или за каждой из них закрепить определенную группу тракторов, чтобы каждая мастерская обслуживала только одну такую группу? Формулы теории надежности позволяют однозначно ответить на этот вопрос. При централизации мастерских (и вообще средств обслуживания) простой потерпевших аварию машин в ожидании мастерской значительно уменьшаются, а коэффициент использования мастерских повышается по сравнению с тем случаем, когда за каждой из них закреплена определенная группа машин. Такие расчеты, например, были проведены в одном из совхозов Новосибирской области. Они показали, что эффективность использования передвижных мастерских при их централизации почти в 2,5 раза выше, чем при децентрализации.

Здесь хотелось бы сделать одно замечание о техническом обслуживании вообще. С обслуживанием сельскохозяйственной техники связана деятельность миллионов людей, но результат их труда существенно отличается от продукции других отраслей материального производства. Если земледелец выращивает хлеб, машиностроитель делает машины, шахтер добывает уголь, то рабочий, производящий ремонт, регулировку или заправку машины, или ставящий ей диагноз, не производит нового вещественного продукта. В чем же полезный эффект его труда? Кажущаяся нематериальность продукции системы обслуживания порождает многие заблуждения и ошибочные действия. Так, руководитель колхоза или совхоза обычно с легким сердцем посылает на прополку сорняков, заготовку сена, копку картофеля сотни людей и в то же время часто пытается экономить на механиках, наладчиках и ремонтных рабочих. Между тем пущенная ими в работу машина может заменить десятки людей, занятых непроизводительным трудом. Ведь продукция, вырабатываемая системой обслуживания, — это дополнительное время работоспособности машины. А еще К. Маркс отмечал, что любая экономия в конце концов сводится к экономии

времени. Поэтому все показатели системы обслуживания и ремонта должны быть сведены к измерению времени готовности машины к работе или измеряться противоположной величиной — простоем машин.

Основной инструмент специалиста по теории надежности машины — теория вероятностей. Это и понятно, потому что он имеет дело со случайными событиями: трактор может сегодня сломаться, а может и без всяких происшествий выполнять возложенную на него задачу.

Многие явления, происходящие в природе и в технических устройствах, целесообразно рассматривать как случайные и использовать для их описания и анализа теорию вероятностей. Явление называют случайным, когда в заданных условиях оно может произойти или нет. Так, машина в течение некоторого времени может испортиться, а может исправно проработать заданный срок. Поскольку точно неизвестно, когда и как произойдет авария, то говорят, что она зависит от случая.

Конечно, любое явление обусловлено какими-то причинами. Поломка трактора может произойти из-за чрезмерного износа детали, или из-за имеющегося в ней скрытого дефекта, или из-за плохого ремонта, или из-за небрежности тракториста. В тракторе несколько тысяч деталей, и каждую из них может вывести из строя бесчисленное количество причин. Поэтому часто мы не можем проследить всю ту цепь причин и следствий, которые приводят трактор к аварии, а иногда от многообразия действующих факторов целесообразно просто отвлечься, чтобы не усложнять дело.

И тут нам на помощь приходит теория вероятностей. Правда, она не подскажет, когда должно произойти то или иное случайное событие, но зато с ее помощью можно определить вероятность его наступления.

Словом «вероятность» в повседневные речи обычно обозначают догадку, недостоверное знание, более или менее правдоподобное утверждение. Для количественной оценки уверенности в наступлении какого-либо события

говорят «невероятно», «маловероятно», «очень вероятно». Как математическая наука, теория вероятностей возникла в XVII веке. Предметом ее изучения стали массовые явления. Вероятность приобрела строгую количественную оценку. Ее стали измерять частотой наступления события при серии однородных испытаний.

Пусть проводится  $N$  наблюдений какого-нибудь явления. Если при этих наблюдениях интересующее нас событие наступает  $n$  раз, то говорят, что вероятность  $P$  наступления события равна отношению (частоте)  $P = \frac{n}{N}$ .

Так, еще в древнем мире было известно, что на 100 рождений приходится примерно 52 мальчика. Значит, если семья ожидает младенца, то вероятность, что им будет мальчик равна  $P = \frac{52}{100} = 0,52$ .

Эта величина вероятности очень устойчива, она практически не меняется со временем и одинакова в разных городах и государствах. Появление в семье мальчика или девочки — событие случайное, и его никто не может предсказать. Но такова особенность вероятностных закономерностей, что они не зависят от особенностей отдельных событий.

Массовый характер явлений сглаживает индивидуальный ход событий.

Теория надежности, являясь технической наукой, стремится выражать найденные закономерности поломок машин количественно, в виде математических формул. Теория вероятностей для этой цели оказывается особенно удобной.

Ее мощный и сравнительно простой аппарат позволяет не вникать в многообразие причин, приводящих машину к аварии, и в то же время предсказывать, сколько машин постигнет это бедствие в течение того или иного времени, а значит, и рассчитать потребную мощность аварийной службы, необходимый запас деталей и узлов обменного фонда и многие другие показатели, необходимые для пра-

вильной организации обслуживания машин\*. Так, зная вероятность поломки машины  $q = 1 - P$  в течение  $T$  часов, можно примерно предсказать число поломок, которые произойдут у машин за это время:  $n = Nq$ . Так, например, для гусеничного трактора (типа ДТ-54) вероятность аварии в течение 10 часов равна 0,12. Следовательно, если в хозяйстве, скажем, 50 таких машин, то можно ожидать, что в период интенсивных работ (весенний сев, уборка) ежедневно в среднем шесть из них будут терпеть аварию.

На многие вопросы может ответить теория надежности при помощи формул теории вероятностей, и только на один вопрос она не дает ответа: когда сломается данная конкретная машина?

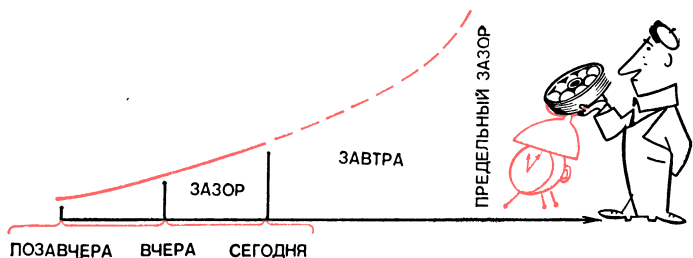
Вероятностный характер выводов теории надежности позволяет ей делать предсказания только о больших группах машин, причем чем больше машин в группе, тем точнее прогноз. К одиночным же объектам теория вероятностей, а значит, и построенная на ней теория надежности неприменимы. Точно так же, зная вероятность появления на свет мальчиков, нельзя предсказать, какого пола будет ожидаемый младенец. Конечно, полезно и интересно знать, какова вероятность аварии трактора, но, выезжая в поле, механизатор и агроном больше беспокоятся о том, не подведет ли данная машина, не сломается ли она, не закончив работу. Однако ответить на этот вопрос теория надежности не может.

### **Можно ли предсказать аварию!**

Хотя авария почти всегда происходит неожиданно, как стихийное бедствие, но это совсем не значит, что события в машине развиваются мгновенно. Всегда требуется время,

---

\* Б. В. Павлов, П. В. Пушкарёва, П. С. Щеглов. Проектирование комплексной механизации сельскохозяйственных предприятий. М., «Колос», 1973.



*Рис. 1. Так мы сможем предсказать, сколько времени проработает подшипник.*

часто значительное, прежде чем небольшой дефект в машине станет катастрофическим. Правда, мы не видим, что делается внутри железного организма, поэтому авария застает нас врасплох. Но раз авария не мгновенный взрыв, а результат более или менее длительного процесса разрушения деталей, то имеется какая-то возможность ее предсказания.

Момент времени, в который в машине должна произойти поломка, определяется двумя факторами: начальным состоянием машины в период прогнозирования и внешними воздействиями, которым она будет подвергаться от периода прогнозирования до поломки. Аварии случайны и неожиданны потому, что ни того, ни другого фактора мы не знаем.

Возможности предсказания будущих событий всегда основываются на знании закономерностей протекания явлений в прошлом и на знании текущей ситуации.

Допустим, что вчера и сегодня мы, не разбирая машины, измерили зазор в одном из ее подшипников и установили, что он изменился на 0,01 мм. Тогда, предположив, что и завтра подшипник будет изнашиваться с такой же скоростью, как и раньше, можно предсказать величину зазора на конец следующего дня. На малый срок точность прогноза в такой простейшей форме вполне достаточна.



Для долгосрочного прогнозирования работоспособности элементов машины нужно знать не только скорость их разрушения, но и ускорение этого процесса, т. е. скорость изменения скорости. Для этого диагноз машине нужно поставить не два, а три раза, скажем, позавчера, вчера и сегодня. Это позволит определить скорость износа деталей за первые и вторые сутки и оценить ее изменение, т. е. ускорение процесса. Таким образом, умение ставить диагноз машине позволяет раскрыть динамику процесса износа и разрушения во всей ее полноте и делает возможным их прогнозирование.

### **«Идеальный механизм», состояние механизма**

В 1801 году к президенту Соединенных Штатов Америки Томасу Джефферсону явился молодой владелец небольшой фабрики хлопкоочистительных машин Эли Уитни. Он предложил заключить договор на поставку правительству 10 000 мушкетов по 13,4 доллара за штуку. В то время в Америке не было фабрик огнестрельного оружия. Наиболее умелые кузнецы делали ружья вручную, некоторые ружья отличались очень высоким качеством, но их не хватало для вооружения армии молодой республики. В доказательство серьезности предложения Уитни высыпал на стол президента кучу деталей мушкета и, беря первые попавшиеся из них, собрал несколько затворов на глазах у изумленных зрителей. Одноименные детали разных ружей были близнецами, как отпечатки гравюр. Так был нанесен удар по ручному, штучному производству и началась эра стандартизации и массового выпуска изделий.

Среди пионеров машинных предприятий был и Самюэл Кольт — изобретатель знаменитого револьвера. Его фабрика выпускала 1000 револьверов в день и, кроме того, изготавливала оборудование для других оружейных заводов.

Идея стандартизации и массового производства состоит во взаимозаменяемости деталей. Их не нужно подгонять друг к другу — бери любую и ставь на место. У ремесленников же каждое изделие было индивидуальным, отражало настроение его создателя. Поэтому процесс сборки машины сопровождался длительной и кропотливой подгонкой деталей.

Чтобы детали мушкета были одинаковы, Уитни использовал шаблон — металлическую пластину, которая имела форму детали и направляла резец станка по заданной траектории, причем совершенно одинаково при обработке каждой детали. Сейчас для этой цели все чаще применяют станки с программным управлением. Форма изготавливаемых деталей задается набором чисел, которые обозначаются отверстиями на бумажной ленте или импульсами на магнитофонной ленте. Чуткие датчики следят за движением резца и посылают сигналы в вычислительное устройство, которое следит за правильностью обработки детали и выполняет необходимую коррекцию.

Но в мире нет совершенства, об идеале человек только мечтает. Детали, поступающие в сборочный цех, или собранные из них машины, сходящие с конвейера, почти неразличимы, но не одинаковы.

Механизаторы знают также, что качество тракторов, комбайнов и других машин, поступающих в колхозы и совхозы, неодинаково. Одни из них два-три года работают хорошо и не требуют ремонта. Но нередко бывает и так, что новая машина попадает не на поля, а в ремонтную мастерскую и вместо радости доставляет сельским труженикам одни только хлопоты и огорчения.

В связи с тем что качество продукции подвержено очень сильным колебаниям — от первоклассных изделий до явного брака, на каждом заводе есть специальный отдел технического контроля (ОТК), задача которого состоит в аттестации продукции и выявлении недоброкачественных изделий. Эталоном для контролеров служит изделие, которое в точности соответствует замыслу конст-

руктора. В машиностроении его называют «идеальным механизмом». Все параметры такого механизма в точности соответствуют проекту.

Вообще говоря, «идеальный механизм» — это воображаемая система, потому что все устройства более или менее отличаются от их идеального прототипа. К понятию «идеальный механизм» можно подойти путем предельного перехода, устраняя в реальном изделии хотя бы мысленно все, даже самые малейшие отклонения от проекта. Понятие «идеальный механизм» нужно для того, чтобы задать начало отсчета нарушений в структуре контролируемых механизмов.

С интуитивным представлением о неизбежности отклонений в размерах, в форме, в регулировках и в других свойствах элементов механизма от идеального связано важнейшее понятие диагностики — состояние механизма.

Реальный механизм может отличаться от идеального бесчисленным количеством признаков: могут быть различные зазоры в кинематических парах, разное качество поверхностей деталей, могут не совпадать твердость, цвет, степень блеска и многие другие свойства. Но среди этого многообразия отличий можно выделить главные признаки, от значения которых существенно зависит работоспособность и надежность механизма. К подобным признакам в двигателях относятся: зазоры в подшипниках, величина ошибки зацепления шестеренчатых пар, фазы открытия и закрытия клапанов, угол опережения подачи топлива, натяг пружины форсунки и другие аналогичные параметры, которые влияют на величину действующих на детали сил и на синхронность работы всех систем машины.

Отклонение в размерах, в форме, во взаимном расположении деталей и в других свойствах можно выразить количественно в виде упорядоченного набора чисел:  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Этот набор чисел называют состоянием механизма.

Понятие состояния механизма вводится как характерис-

тика степени отклонения его структуры от структуры идеального механизма, принятого за начало отсчета отклонений. Состояние механизма можно считать известным, если известна величина отклонения каждого существенного признака, характеризующего его структуру. Их определение и составляет задачу диагностики. Чтобы подчеркнуть, что параметры состояния являются искомыми неизвестными диагностической задачи, мы их обозначили той же буквой, которой чаще всего обозначают неизвестные в алгебраических уравнениях.

Специфика диагностической задачи состоит в том, что отклонения в размерах, в форме и в других свойствах деталей, которые мы назвали состоянием механизма, недоступны для непосредственного измерения. Когда механизм собран, мы не можем измерить зазоры в подшипниках и других его кинематических парах, погрешности шестерен, затяжку пружин, так как доступ к деталям преграждают стенки корпусов. Нужно иметь что-то вроде рентгеновского аппарата, который позволил бы проникнуть внутрь машины. Правда, рентгеновский аппарат здесь не поможет. И дело не только в том, что лучи рентгена с трудом проникают сквозь металл. Даже имея возможность увидеть, скажем, подшипник, шестерню или пружину, нельзя определить по их внешнему виду, все ли у них в порядке. Но если дефекты в машине нельзя увидеть, то можно ли их услышать? Да, и очень часто.

В современном машиностроении важнейшей контрольной операцией, завершающей изготовление машины, является ее прослушивание. Даже на заводах, выпускающих такую продукцию, как автомобильные и тракторные двигатели, топливную аппаратуру дизелей, станки, электромоторы, путевку в жизнь готовым изделиям дают «слушачи».

Название этой своеобразной категории работников полностью раскрывает характер их труда. Без «слушачей» не обходится ни одно машиностроительное производство. Но не только на заводах прослушивают машины. Шофер,

тракторист, токарь ни на минуту не теряют звуковой контакт со своей машиной и немедленно остановят ее, как только изменится ее «голос».

О чем же рассказывает машина своим слушателям? Ответить на этот вопрос и должна наша книга.

## **Функции состояния**

До сих пор мы интересовались структурой механизма и для описания ее изменений ввели понятие «состояние механизма». Но механизм характеризуется также показателями его работы. Мы можем забыть о том, что механизм состоит из деталей, и сосредоточить свое внимание на процессах, которые связаны с его функционированием. Мы можем следить за изменением скорости вращения колес трактора, за прозрачностью и цветом выпускных газов, за мощностью издаваемого им шума, за температурой в различных его точках. Это так называемый функциональный подход к механизму.

Протекание каждого процесса, связанного с работой механизма, можно оценить количественно с помощью того или иного показателя. Вращение вала характеризуется частотой, выпуск отработавших газов — степенью прозрачности, шум — частотой и мощностью звука, нагрев подшипника — его температурой и т. д.

Параметры, характеризующие протекание процессов, связанных с работой механизма, мы будем в дальнейшем обозначать  $s_1, s_2, \dots, s_n$ . Значение каждого такого параметра зависит от трех факторов: от заданного механизму режима работы, состояния окружающей среды и состояния самого механизма. Поскольку целью диагностики является определение состояния механизма, то при диагностировании стремятся исключить влияние на показатели его работы всех остальных факторов. Поэтому мы будем считать, что режим работы механизма и условия окружающей среды во время постановки диагноза заданы и не изменяются. Таким образом, показатели рабочих процессов

механизма во время диагностирования зависят только от его состояния. Чтобы подчеркнуть это обстоятельство, мы их будем называть **функциями состояния**.

Различают три вида функций состояния. **Первую группу функций состояния** составляют технико-экономические показатели механизма, например мощность и удельный расход топлива двигателя, коэффициент полезного действия трансмиссии, точность движения резца металлообрабатывающего станка и т. д. Их называют **критериями эффективности**. Роль этих критериев в диагностике двояка. С одной стороны, задача диагностики может состоять в определении критериев эффективности механизма, например мощности двигателя. С другой стороны, когда значение критериев эффективности известно, они могут выступать как симптомы неисправностей. Например, установив, что двигатель перерасходует топливо, мы можем уже более целеустремленно искать в нем неполадки.

Говоря о надежности, мы много внимания уделили поломкам тракторов, комбайнов и других машин. Они действительно представляют большое бедствие для сельскохозяйственного производства. Но однажды ученые, занимающиеся проблемой поломок, заинтересовались исправными тракторами. А что собой представляют машины, которые не стоят беспомощно в борозде, а напряженно работают и в исправности которых у механизаторов нет сомнений? Оборудовали передвижную диагностическую лабораторию и поехали по колхозам и совхозам Новосибирской области.

Участники экспедиции, проезжая мимо сломавшихся тракторов, ожидающих ремонта, были непреклонны, когда трактористы просили их определить при помощи электронных приборов, что нужно «закапризничавшей» машине или почему из выпускной трубы валит такой черный дым, будто это работает паровоз. Ученых интересовали только абсолютно исправные тракторы. Найдя такую машину, они уже не жалели ни времени, ни сил, чтобы досконально обследовать все ее элементы, зарегист-

рировать каждый показатель. Чувствительные электронные приборы измеряли ее мощность, угол опрежения подачи и давление топлива в форсунке, прослушивали стуки и скрежеты, термопары с точностью до долей градуса регистрировали температуру во всех важнейших точках машины. Так были обследованы многие десятки абсолютно здоровых тракторов. Когда же подвели итоги, то они озадачили и самих исследователей и всех тех, кому пришлось ознакомиться с результатами. Оказалось, что исправные тракторы на 17% в среднем слабосильнее и на 27% прожорливее, чем им положено быть по техническим условиям. Если результаты исследований распространить на весь тракторный парк страны, а это с известным приближением можно сделать, то окажется, что неизвестно куда исчезли миллионы лошадиных сил и сотни тысяч тонн топлива. Только для Новосибирской области такое снижение мощности тракторов равноценно потере 4000 машин.

Немалый ущерб связан и с бесполезным сжиганием одной четверти дизельного топлива, отпускаемого сельскому хозяйству. «Кто не заметил, что он обокраден, тот ничего не потерял», — сказал когда-то остроумный мудрец. Многие и с неисправными тракторами не горюют, так как снижение мощности трактора на 17% нельзя обнаружить на ощупь, а увеличение расхода топлива двигателем на 27% не уловишь на глаз. Но потери здесь реальны, поэтому правила технического обслуживания машинно-тракторного парка предусматривают при техническом обслуживании № 3 проверку мощности и удельного расхода топлива у тракторных и комбайновых двигателей. Для этой цели Сибирским научно-исследовательским институтом механизации и электрификации сельского хозяйства (СибИМЭ) разработаны портативные и сравнительно дешевые приборы ИМД и «Импульс». ИМД — измеритель мощности двигателей весит всего 2 кг и позволяет оперативно, за 2—3 минуты, без специальных стендов измерить мощность любого трактор-

ного и комбайнового двигателя в целом и по отдельным его цилиндрам. Этот прибор выпускается серийно и поставляется для оснащения сельской инженерной службы.

«Импульс», тоже портативный прибор, позволяет, кроме мощности, измерять в условиях эксплуатации удельный расход топлива, определять правильность настройки и установки топливного насоса и регулятора, а также оценивать механический к.п.д. двигателей.

Функциональная диагностика, направленная на оценку технико-экономических и агрозоотехнических показателей машин, является первой и важнейшей ступенью всей диагностической системы.

Вторую группу функций состояния машины составляют показатели ее надежности, например *м о т о р е с у р с*, т. е. время, которое машина может проработать до очередной поломки. Этот показатель зависит от состояния машины, поэтому мы его и относим к функциям состояния.

Надежность, моторесурс машины, безусловно, являются ее важнейшими технико-экономическими показателями, но тем не менее их целесообразно отличать от других критериев эффективности. Дело в том, что мощность, расход топлива, к.п.д., точность движения резца и другие аналогичные показатели могут быть хотя бы в принципе измерены непосредственно на работающей машине. Приборы для таких измерений существуют и постоянно совершенствуются. Иное дело — надежность машины, в частности ее моторесурс. Их определение связано с прогнозированием, с предсказанием будущих поломок, а для этого необходимо прежде всего научиться определять состояние каждого элемента машины в текущий момент. Ведь виновницей аварии может быть любая ее деталь. Поэтому, чтобы определить время, которое машина сможет проработать до очередной поломки, нужно знать состояние каждой ее детали. Надежность машины всегда выступает как искомое диагностической задачи, причем необходимость ее определения влечет основные



трудности диагностики и сложность диагностического оборудования.

При внедрении технического новшества всегда возникает вопрос, а какой эффект от него можно ожидать и оправдаются ли затраты выгодами от новинки.

С эффектом от внедрения приборов для измерения мощности двигателя, удельного расхода топлива и других технико-экономических показателей все ясно. Убытки от того, что двигатели тракторов и комбайнов не дают 17% мощности и перерасходуют 27% топлива, подсчитать легко, и ими определяется эффект от внедрения диагностических приборов, которые позволяют поддерживать технико-экономические показатели машин на номинальном уровне.

Несколько сложнее обстоит дело с подсчетом эффекта от диагностических приборов, которые позволяют оценивать моторесурс машин и предсказывать, когда машина потребует ремонта. Эффект здесь может быть получен, во-первых, за счет резкого сокращения простоев техники и, во-вторых, за счет резкого сокращения объема ремонта. Если нам удастся ликвидировать случайность поломок, то это позволит нам быть всегда готовыми к устранению неполадок в машине и не тратить времени на вызов «летучки», на поиск нужных запасных частей и вообще избавиться от аварий машин в поле с неизбежной при этом дезорганизацией производственного процесса.

Диагностика должна существенно уменьшить объем ремонта. Сейчас машины часто разбирают только потому, что механизаторы не знают, что делается у них внутри, и они не уверены, что техника их не подведет в разгар работ.

Кроме того, оценка моторесурса, которую мы называем структурной диагностикой, должна стать обязательной контрольной операцией после завершения ремонта или изготовления машины. Она должна стать заслоном для недоброкачественных изделий.

К третьей группе функций состояния относятся па-

раметры рабочих процессов, которые сами по себе не имеют большого значения, но зато служат признаками, или, как говорят медики, симптомами происшедших отклонений в структуре механизма. Так, цвет выпускных газов для нас безразличен (это не мощность двигателя!), но его изменение позволяет нам судить о протекании процесса сгорания, а значит, и о состоянии двигателя, связанном с мощностью.

Механизаторам хорошо известно, что черный цвет выпускного дыма у дизеля свидетельствует о большой подаче топлива или о позднем его впрыске в цилиндр. Если выпускной дым синего цвета, то пора менять поршневые кольца. Значит, в камеру сгорания поступает через неплотности в поршневой группе масло из картера, которое и окрашивает дым в синий цвет. При белом цвете выпускного дыма следует обратить внимание на опережение впрыска топлива, скорее всего впрыск топлива в цилиндр происходит раньше, чем следует.

Нас особенно не интересовал бы и характер шума машины (конечно, если бы он лежал в пределах санитарных норм), но он несет информацию о динамических процессах, протекающих в кинематических парах, и служит для обнаружения неполадок.

Подобные признаки мы будем называть параметрами диагностического сигнала, а полную их совокупность — **д и а г н о с т и ч е с к и м с и г н а л о м**. Таким образом, диагностический сигнал — это система параметров  $s_1, s_2, \dots, s_m$ , характеризующих протекание процессов, связанных с работающим механизмом, которые могут быть непосредственно измерены и которые используются для определения неизвестного состояния механизма.

Вместо того чтобы измерять недоступные внутренние параметры машины (зазоры в кинематических парах, погрешности шестерен, разрегулировку клапанов и т. д.), в диагностике измеряют параметры внешнего процесса, порождаемого машиной, например интенсивность ее шума, температуру, прозрачность выпускных газов, что не вы-

зывает затруднений, а затем, используя зависимость этих параметров от состояния элементов машины, выносят заключение о том, когда можно ожидать поломку той или иной ее детали, о потребности в ремонте и обслуживании. Таким образом, в диагностике речь идет о замене трудно осуществимых или вообще неосуществимых прямых измерений размеров, форм или взаимного расположения деталей более доступными измерениями параметров, характеризующих работу механизма.

## **Диагностика**

Диагностика — слово греческое. *Diagnostikos* значит способный распознавать. В медицине диагностикой называют раздел науки, изучающий признаки болезней, а также методы, при помощи которых дается заключение о характере и существовании болезней. Термином диагностика обозначают также весь процесс исследования больного и рассуждения врача при определении болезни и состояния больного. Распознавание болезни составляет основу лечения больного и профилактики заболевания. Медицинская диагностика как наука состоит из трех основных разделов: методики обследования больного, учения о признаках различных заболеваний (симптомах), методики рассуждений врача, в результате которых формулируется диагноз, т. е. краткое заключение о характере и сущности болезни.

Мы уделили внимание медицинской диагностике потому, что техническая диагностика имеет с ней много общего, хотя машина, конечно, более простой объект для обследования, чем организм человека.

Техническая диагностика — раздел науки об измерениях, разрабатывающий методы и приборы, при помощи которых определяют скрытые параметры механизма по параметрам его внешних процессов. Термином техническая диагностика обозначают также процесс обследования механизма для определения его состояния.

Он состоит из пяти основных этапов: 1) обеспечение определенного режима работы обследуемого механизма, в частности задания ему определенной скорости и нагрузки; 2) регистрации процесса, который служит диагностическим сигналом; 3) разделение сигнала на составляющие, каждая из которых принадлежит только одному элементу механизма; 4) измерение параметров этих составляющих; 5) принятие решения о состоянии каждого элемента механизма в зависимости от значения параметров диагностического сигнала.

Возможны различные формулировки диагностической задачи в зависимости от того, что мы собираемся узнать о машине и как намерены использовать полученную информацию. Различают следующие виды диагностики: 1) функциональную, при которой определяют степень нарушения основных функций механизма, например уменьшение его мощности, увеличение расхода топлива, увеличение погрешностей обработки материала рабочим органом и т. д.; 2) структурную, выявляющую в механизме поврежденные детали и оценивающую характер дефектов; 3) казуальную (от слова казус), при которой определяют причины разрушения элементов механизма; 4) прогноз, предсказывающий характер протекания процессов износа и разрушения элементов механизма и время выхода его из строя.

Наиболее общей формулировкой задачи является структурная диагностика, и к ней, вообще говоря, можно свести любую другую задачу диагноза. Цель структурной диагностики — измерение параметров деталей механизма. Умение проводить такие измерения позволяет дать ответ на любой вопрос, который может быть задан диагносту.

### **Диагностика и электроника**

Нельзя утверждать, что техническая диагностика — новая проблема. С тех пор как появились первые машины, начался поиск методов обнаружения в них дефектов и про-

гнозирования аварий. Еще наши деды, отправляясь в путь, качали руками колесо телеги, чтобы оценить износ оси и втулки и убедиться, что телега не сломается в дороге.

Длительный опыт эксплуатации тракторов и комбайнов миллионной армией механизаторов позволил выработать некоторые практические рецепты диагностики машин, которые затем были узаконены инструкциями по их эксплуатации. Простой осмотр машины, ощупывание и остукивание деталей, расположенных снаружи, позволяют вскрыть большое число дефектов и предотвратить аварию.

Для обнаружения потеков топлива, масла, воды вряд ли нужно изобретать специальные приборы, с этой задачей успешно справляются глаза механизаторов. Остукиванием гайки можно проверить ее затяжку, ощупыванием проверяют натяжение ремня вентилятора и т. д.

Опытный механизатор может сделать довольно правильный вывод о состоянии машины, понаблюдав некоторое время за ее работой и послушав ее шум. Так, если двигатель не заводится в течение двух-трех минут после начала прокручивания его коленчатого вала (зимой это время увеличивается до пяти—восьми минут), значит, он неисправен, а если работает с перебоями («троит», как говорят механизаторы), значит, в систему питания попадает воздух или отказала форсунка. О многом может сообщить цвет выпускных газов, характер стука двигателя, устойчивость скорости вращения коленчатого вала и многие другие внешние проявления, которые можно увидеть, услышать или осязать.

Простейшие приспособления позволяют повысить объективность диагноза. Так, если подержать кусок белой бумаги над выпускной трубой двигателя полминуты, то отпечаток, оставленный выпускными газами на бумаге, позволит обнаружить масляные пятна, свидетельствующие об износе маслосъемных колец, или пятна, оставленные несгоревшим топливом, которые указывают на нарушение процесса горения в цилиндре двигателя.

Кусок фильтровальной бумаги может служить анализатором качества масла в картере. При работающем двигателе при помощи масломерной линейки достают и наносят на бумагу несколько капель масла и подсушивают бумагу на головке блока. На ней образуются пятна в виде характерных концентрических колец с темным ядром в центре. По отношению диаметров колец можно оценить качество масла.

Проблема технической диагностики постоянно привлекает внимание изобретателей, которые создали большое число различных приспособлений для контроля за состоянием машин. Наиболее частой причиной плохой работы двигателя являются неисправности топливной аппаратуры, поэтому вполне естественно, что эта система в первую очередь нуждается в диагностике. Для ее проверки и регулировки в условиях мастерской служат специальные стенды. Наиболее распространен стенд СДТА-1, разработанный Государственным всесоюзным научно-исследовательским технологическим институтом ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка (ГОСНИТИ).

Для проверки элементов топливной системы в полевых условиях используют максиметр. Им проверяют давление впрыска топлива форсункой, герметичность плунжерных пар и некоторые другие показатели. Часто причина снижения мощности двигателя и перерасхода топлива заключается в опережении или запаздывании момента начала подачи топлива в цилиндр. Для измерения этого показателя используют моментоскопы. Наиболее известный из них — стеклянная трубочка с надетой на нее резиновой трубочкой. Ее укрепляют на штуцере первой секции топливного насоса и начинают ручную прокручивать коленчатый вал двигателя, следя за моментом, когда столбик топлива в стеклянной трубочке начнет подниматься. Так фиксируется момент начала подачи топлива насосом. Положение коленчатого вала в этот момент укажет на величину запаздывания или опережения начала впрыска топлива.

Важной системой двигателя является цилиндро-поршневая группа. Величина износа ее элементов служит одним из основных показателей при решении вопроса о необходимости ремонта двигателя. Степень износа цилиндро-поршневой группы можно оценить или с помощью анализа картерных газов или по величине сжатия в камере сгорания.

Для измерения степени сжатия в цилиндре служит компрессиметр. Прибор устанавливают на головку блока цилиндров вместо форсунки. Дизель прокручивают вручную или при помощи пускового двигателя. Величину сжатия в цилиндре показывает стрелка манометра. В некоторых типах компрессиметров давление в цилиндре двигателя создается специальным компрессором, а манометр служит для оценки скорости утечки воздуха из камеры сгорания через неплотности цилиндро-поршневой группы и клапанного механизма.

Характерной особенностью всех известных сейчас приспособлений для диагностики является то, что для их использования требуется частичная разборка машины. Это и способствует увеличению износов, поскольку после каждой разборки скорость износа машины возрастает.

Проводили такой эксперимент: снимали и снова ставили не место головку блока цилиндров, поршни и заменяли поршневые кольца. Обнаружили, что даже простое снятие головки блока и установка ее на место значительно ускоряет износ двигателя.

Вызывает неудовлетворение также тот факт, что в каждом приспособлении используется свой физический принцип — одни из них оперируют с давлением газов, другие с перемещением столба топлива в стеклянной трубке, третьи основаны на измерении температуры и т. д.

Приспособлений для диагностики машин очень много. И вместе с тем диагностической службы в сельском хозяйстве по существу нет. 75% двигателей отправляется в ремонт преждевременно, потому что механизаторы не имеют возможности определить их потребность в ремонте.

В разгар полевых работ по техническим причинам стоит каждый пятый трактор, причем большая доля вины за это падает на простые, но неожиданные аварии — они заставляют механизаторов врасплох, не дают возможности к ним своевременно подготовиться.

Из-за отсутствия эффективной диагностики зимой приходится разбирать почти каждый трактор, чтобы убедиться, что он не подведет весной, а это, в свою очередь, вызывает излишний расход запасных частей: когда трактор разобран, никто не хочет ставить в него хотя и годные, но уже поработавшие детали. Обследование выброшенных в металлолом деталей показывает, что около 80 % из них могли бы еще работать целый сезон.

Некоторые специалисты в области эксплуатации машин считают, что всему виной является нехватка приспособлений для диагностики машин. Стоит изобрести еще десяток-другой приборов вроде компрессиметра или максиметра, и проблема диагностики будет решена. Но это большое заблуждение. Если идти таким путем, то сельской инженерной службе придется вооружаться не одной сотней диагностических приспособлений, а эффект будет невелик. Вспомните, сколько кинематических пар у трактора, комбайна, автомобиля, и для каждой из них нужно иметь специальный диагностический прибор. Иначе диагностика не получится. Если мы будем иметь возможность диагностировать, скажем, шестерни, а что делается в подшипниках того же механизма, узнать не сможем, то пользы от такой диагностики не будет.

Сотни приспособлений потребуют большой грузовик для их перевозки. Механику понадобятся годы, чтобы научиться свободно пользоваться таким многообразием приборов. Но и это еще не самое главное. Одно из основных требований, предъявляемых к диагностике, — это быстрота. Если на диагностирование машины требуются сутки, то, видимо, проще ее разобрать и посмотреть, что у нее делается внутри, чем манипулировать с приборами. Только 10—15 минут — вот приемлемое время на обследо-



вание машины. Но с приспособлениями типа компрессиметра такой быстроты не достигнуть. Чтобы этим прибором измерить компрессию в цилиндре двигателя, нужно снять форсунку, закрепить на ее место наконечник прибора, снять показания, а затем поставить форсунку на место. Не меньше получаса потребуется на эти операции, а у двигателя четыре цилиндра, и, кроме компрессии, нужно проверить еще десятки других показателей.

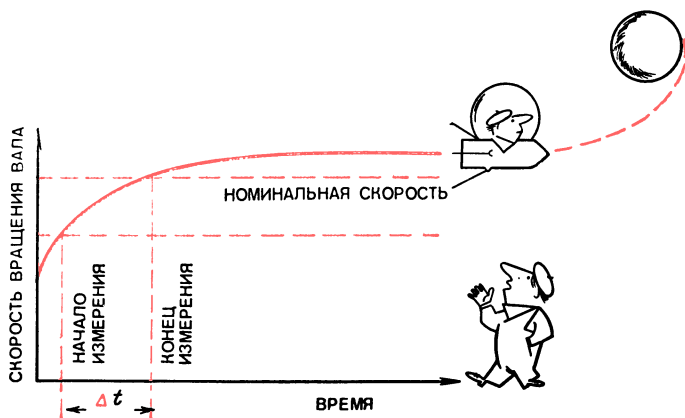
Отсюда вывод — диагностические приборы должны быть электронными и действовать автоматически. Пока ничто не может конкурировать в быстродействии с электроникой.

Многие механизаторы знают, а возможно, и пользовались пневматическим передвижным тормозом для измерения мощности тракторных двигателей, которые еще недавно поставлялись сельскому хозяйству. Весил он около 850 кг. Его прицепляли к «летучке» и перетаскивали от трактора к трактору. Но немного машин можно обследовать этим агрегатом за рабочий день.

На вооружение сельской инженерной службы сейчас поступает другой прибор для измерения мощности двигателей, разработанный сотрудниками СибИМЭ. Это небольшой чемоданчик весом 2 кг, а измерить мощность с его помощью можно у любого двигателя: и у моторчика, установленного на машине для обкашивания газонов, и у огромного дизеля, движущего океанский корабль. Всего одна-две минуты уходят на подключение прибора к мотору и измерение мощности. С таким «чемоданчиком» механик может объехать за день десятки тракторов.

Такое быстродействие и универсальность обеспечивает электроника. Принцип, заложенный в прибор, очень прост, и его знали давно. Но реализовать его удалось только тогда, когда за дело взялись специалисты, которые хорошо знали устройство двигателей и электронику.

Как известно, ускорение маховика  $j$  во время разгона прямо пропорционально эффективному крутящему моменту  $M$  и обратно пропорционально моменту



*Рис. 2. Изменение скорости коленчатого вала после включения полной подачи топлива. Чем меньше интервал времени, тем больше мощность двигателя.*

инерции вращающихся частей  $J$ :  $j = \frac{M}{J}$ . Момент инерции  $S$  двигателя — величина постоянная, и ее можно рассчитать или измерить заранее. Поэтому если измерить ускорение маховика во время разгона, то по приведенной формуле можно определить крутящий момент двигателя. В свою очередь, мощность двигателя  $N$  равна произведению крутящего момента на скорость коленчатого вала  $\Omega$ :  $N = M\Omega$ .

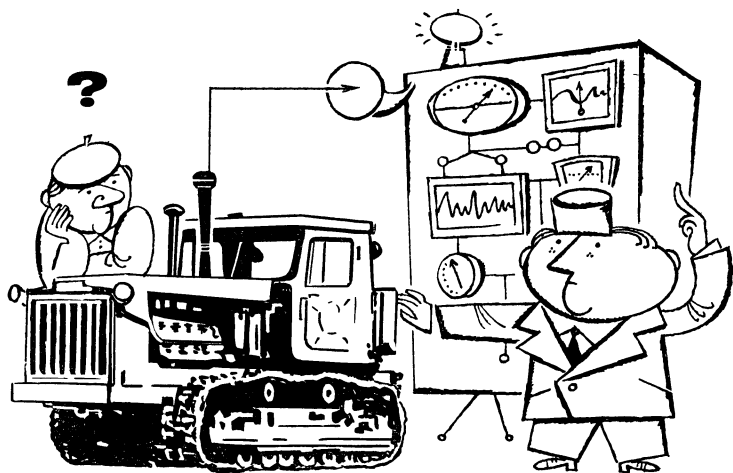
Разгон тракторного дизеля при резком включении акселератора от скорости вращения вала 900 оборотов в минуту до номинальной скорости длится примерно 10 оборотов, что составляет 0,5—0,9 секунды. А для измерения мощности двигателя ускорение маховика нужно измерить в течение 0,1 секунды, причем в тот момент, когда его скорость вращения достигнет номинального значения. Конечно, никакими механическими устройствами этого сделать нельзя. А в электронном приборе все делается очень

просто. Механик вставляет в отверстие в картере маховика специальный датчик. При вращении зубья маховика проходят мимо датчика, который при этом вырабатывает электрические импульсы. Чем быстрее вращается маховик, тем чаще проходят его зубья мимо датчика, чаще следуют импульсы.

Перед измерением двигатель работает на малой скорости. Затем механик резко включает полную подачу топлива и двигатель начинает набирать обороты. Специальный счетчик, который установлен в приборе, считает приходящие электрические импульсы и, как только частота их поступления в счетчик будет соответствовать номинальному числу оборотов, в приборе включается второй счетчик, который измеряет изменение скорости маховика в этот момент. Это и укажет его ускорение, которое затем прибор умножит на момент инерции двигателя  $I$  и на номинальную скорость вращения коленчатого вала  $\Omega$ . В результате стрелка прибора покажет мощность в лошадиных силах, которую развивает двигатель.

Мы рассказали о сравнительно простой проблеме — об измерении мощности двигателей. Неизбежность применения электроники станет особенно очевидной, когда речь пойдет о проблеме диагностики во всей ее сложности.

Конечно, всякое новшество несет с собой определенные затруднения. Так было, когда крестьянин от сохи переходил на трактор, так было, когда в начале пятидесятых годов на смену керосиновым тракторам в сельское хозяйство пришли сложные дизельные машины. Будут трудности и при перевооружении сельской инженерной службы электронным оборудованием. Но научно-технический прогресс неумолим: Он не делает исключений и не обойдет стороной сельское хозяйство. Мы живем в век электроники и вычислительных машин — они должны стать нашими помощниками в организации производительного использования мощной сельскохозяйственной техники.



## Элементы диагностического процесса

**ИНФОРМАЦИЯ,  
ЛОГИКА, ДИАГНОЗ**

Опытный механик определяет состояние машины по внешним признакам ее работы. Он прислушивается к шуму, присматривается к дыму, выталкиваемому из выпускной трубы, ощупывает корпус подшипников, чтобы оценить их температуру. После такого обследования он выносит заключение, чем «больна» машина и в каком «лечении» нуждается. При постановке диагноза механику помогают знания, предшествующий опыт, интуиция, а иногда он просто надеется на удачу. Он может ошибиться по двум причинам: могут подвести органы чувств и

логика. В привычном шуме машины механик может не уловить угрожающего постукивания, он может и не заметить изменений, происшедших в цвете выпускного дыма, и, наоборот, нормальный нагрев подшипника может показаться ему чрезмерным. С другой стороны, обнаружив нарушение в каком-либо процессе, механик может приписать вину не той неисправности, которая на самом деле имеется в машине. Стук поршневого пальца можно принять за стук клапана, потемнение выпускного дыма из-за плохой работы форсунки приписать позднему впрыску топлива, а перегрев подшипника из-за перекоса вала объяснить плохой смазкой.

Правильность диагноза зависит от качества выполнения двух операций: от точности оценки параметров выходных процессов машины (симптомов) и от обоснованности логического вывода. Поэтому усовершенствование диагностики идет двумя путями: а) за счет замены органов чувств оператора чувствительными приборами и б) путем механизации логического процесса.

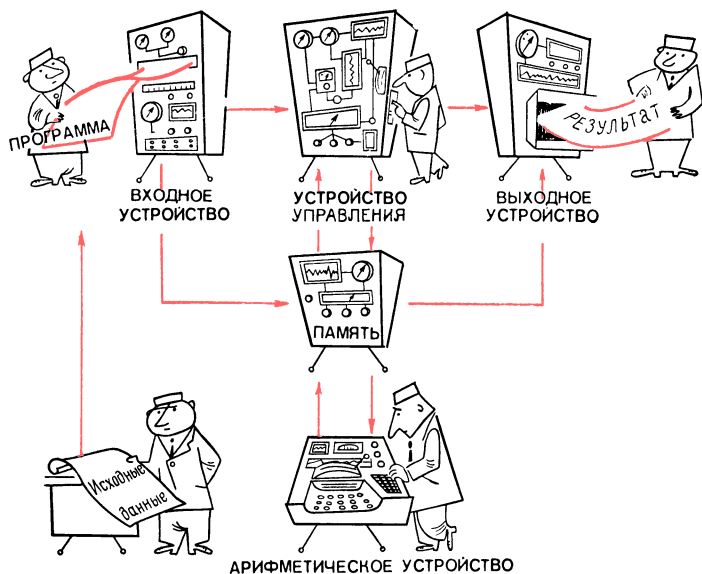
Инженерная мысль всегда была направлена на то, чтобы облегчить труд людей, заменить мускульную силу машиной. Так, молотобойца заменил пневматический молот, землекопа — экскаватор. В настоящее время появилась большая потребность в механизации умственного труда. С этой задачей успешно справляются электронные вычислительные машины, которые автоматически и очень быстро выполняют самые сложные расчеты.

Промышленность выпускает вычислительные машины, которые за одну секунду выполняют до миллиона арифметических операций, и это не предел. Ученые и инженеры ищут пути повышения их быстродействия до миллиарда операций в секунду.

Вычислительные машины применяются и для решения сельскохозяйственных задач. Взять, например, такую проблему, как определение оптимальной структуры машинно-тракторного парка колхоза или совхоза. Необходимый объем работ в установленные агрономами сроки

можно выполнить парком машин различного состава, но и издержки производства при этом будут разными. Для каждого хозяйства существует только один набор машин, который обеспечивает минимум затрат на производство сельскохозяйственной продукции. Он называется оптимальным парком. Но определение оптимального для хозяйства парка является довольно сложной задачей, потому что он зависит от структуры посевных площадей, конфигурации и размеров полей, климатических условий, от обеспеченности хозяйства механизаторскими кадрами и многих других факторов.

Промышленность поставляет сельскому хозяйству только для растениеводства около тысячи наименований



*Рис. 3. Исходные данные и программа вычислений вводится в память машины через входное устройство. Арифметическое устройство выполняет также различные логические операции.*

различных машин. Простое чтение такого длинного прейскуранта требует изрядного времени, не говоря уже о сопоставлении их технико-экономических показателей. А между тем стихийно складывающийся в колхозах и совхозах парк приводит к увеличению себестоимости продукции на 20—30 % по сравнению с ее себестоимостью при оптимальном парке.

Ученые СибИМЭ для решения задачи об оптимальном парке разработали специальные математические методы. Используя их, «Сельхозтехника» начала переходить на новые формы планирования поставок техники колхозам и совхозам. Во Владимирской области уже несколько лет специалисты хозяйств получают от «Сельхозтехники» не пустой бланк заказа на новые машины, который они должны были бы заполнить, а научнообоснованный проект заявки, подготовленный вычислительной машиной. Вместе с проектом заявки поступает также оптимальный план использования техники, разработанный ЭВМ, который позволяет специалистам хозяйств убедиться в обоснованности проекта заявки. После выделения области фондов на новую технику ЭВМ производит их оптимальное распределение по колхозам и совхозам области.

Кроме того что ЭВМ позволяет лучше спланировать техническое оснащение хозяйств, она освобождает специалистов от больших затрат времени на подготовку и свод заявок, на что раньше в «заявочную» кампанию уходило до двух месяцев.

Если бы вычислительные машины могли только решать с большой скоростью математические задачи, то и тогда их значение для науки и техники трудно было бы переоценить. Но они способны на большее: управляют заводами, переводят статьи и книги с одного языка на другой, выполняют работу диспетчера, управляют зенитным огнем и т. д. Создание вычислительных машин имеет для человечества такое же значение, что и расщепление атомного ядра и овладение атомной энергией. Наше время можно назвать веком вычислительной техники.

Вычислительные машины имеют непосредственное отношение к технической диагностике. Совершенствование диагностики возможно на базе использования вычислительной техники, и одна из задач нашей книги — показать это.

Вычислительная машина перерабатывает информацию. С таким же материалом оперируют и в диагностике. Задача диагностики — получение сведений о внутренних свойствах механизмов и определение возможностей их работы. Прежде чем эти сведения придут к нам в виде показаний приборов или уже отпечатанными на специальном бланке, они должны проделать долгий и трудный путь из недр механизма к датчикам, а от датчиков по цепям диагностической аппаратуры к потребителю. Задача диагностической аппаратуры состоит в том, чтобы так обработать информацию, полученную от обследуемого механизма, чтобы ею удобно было пользоваться. Такая же цель стоит и перед вычислительной машиной. Решая задачу, она преобразует введенную информацию об исходных данных в форму, удобную для тех, кто воспользовался ее услугами.

Появление вычислительных машин стимулировало развитие целого ряда отраслей науки. С двумя из них нам следует хотя бы бегло познакомиться, потому что они имеют определенное значение для совершенствования диагностики, — это теория информации и математическая логика.

## **Информация**

Современный человек живет в бушующем океане информации. На него обрушиваются поток газет, журналов, книг. Электромагнитные волны сотен радио- и телевизионных станций торопятся доставить ему со скоростью света разнообразные сведения. Два миллиона научных работников сидят у приборов, чтобы добыть новые знания об устройстве мира и сообщить их людям. Если в 1800 году во всем мире выпускалось около 100 научных журналов,



то теперь их выходит около 100 000. Значит, не зря сидят ученые у приборов и ведут исследования, им есть чем поделиться с современниками.

Наше время отличается стремительным расширением номенклатуры изделий и услуг. На наших глазах вошел в жизнь капрон, нейлон и многие другие материалы; полки магазинов сейчас заставлены десятками видов телевизоров, стиральных машин, пылесосов, электробритв, которые 15—20 лет тому назад были редкостью.

Система машин для сельского хозяйства перед войной насчитывала всего 40 образцов техники, а сейчас только для растениеводства ее номенклатура превышает полторы тысячи наименований.

Чтобы справиться с таким обилием информации, в 40-х годах была создана специальная наука — теория информации. Она изучает закономерности, связанные с передачей, приемом и обработкой информации. Ее основоположником считается выдающийся американский математик и инженер Клод Шеннон.

Всякая теория начинается с уточнения используемых ею слов или терминов. С уточнения смысла слова «информация» началась и новая наука. Смысл этого термина лучше всего можно пояснить, если связать его с другим знакомым словом «неопределенность».

О неопределенности говорят, когда рассматриваемая ситуация может иметь несколько исходов. С ней мы встречаемся перед диагностированием механизма, поскольку для него возможно несколько состояний, а в каком из них механизм находится, мы не знаем. Снять эту неопределенность, указать из множества возможных состояний одно, в котором в действительности находится механизм, — это и составляет задачу диагностики.

Неопределенность — это то же самое, что и недостаток информации. Чем больше неопределенность ситуации, тем больше информации о ней недостает. Мы указали на связь неопределенности с информацией, но как их оценить числом? Язык инженера — это язык формул.

Пока научному понятию не найдена количественная оценка, его нельзя использовать для построения теории.

Рассмотрим в качестве примера неопределенности результат падения подброшенной монеты. Возможны два исхода: монета может упасть вверх гербом или решкой. Если начнем угадывать заранее результат ее падения и после многих подбрасываний подведем итог, то окажется, что примерно в половине случаев мы предсказали результат правильно и в половине случаев — ошиблись.

Будем подбрасывать одновременно четыре монеты. При каждом броске теперь возможны 16 исходов: первая монета упадет вверх гербом, а три остальные — решкой, вторая — вверх гербом, а остальные — решкой и т. д. Если обозначить выпадение герба 0, а решки — 1, то все 16 возможных исходов одного бросания четырех монет можно изобразить так:

0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	10	1010
3	0011	11	1011
4	0100	12	1100
5	0101	13	1101
6	0110	14	1110
7	0111	15	1111

Предсказание результата такого бросания оправдается только в одном из 16 случаев. Очевидно, что неопределенность результата при бросании четырех монет больше, чем при бросании одной монеты. За меру неопределенности ситуации можно было бы взять число  $n$  ее возможных исходов. В первом случае  $n = 2$ , во втором  $n = 16$ . Но по ряду причин, в которые мы здесь вдаваться не будем, неопределенность  $H$  оказалось удобнее оценивать логарифмом по основанию 2 от числа возможных исходов:

$$H = \log_2 n.$$

При бросании одной монеты неопределенность равна 1:

$$H = \log_2 2 = 1.$$

Такая величина неопределенности служит единицей измерения и называется битом\*. Неопределенность результата бросания четырех монет равна 4:

$$H = \log_2 16 = 4.$$

Неопределенность состояния машины перед постановкой ей диагноза зависит от количества отсутствующей информации, необходимой для решения стоящей задачи. Пусть нам нужно знать о состоянии машины только одно, исправна ли она. Здесь два возможных исхода диагноза, поэтому неопределенность равна одному биту, как и при бросании одной монеты. А теперь пусть нам нужно знать, исправен или нет каждый из четырех агрегатов машины — двигатель, трансмиссия, ходовая часть и рулевое управление. При такой постановке задачи диагноза возможны 16 исходов, значит, неопределенность состояния машины равна 4. Если машина состоит из деталей и о каждой из них нужно знать, исправна она или нет, то возможных состояний машины будет:  $n = 2^m$ , а неопределенность состояния:  $H = m$ .

Неопределенность снимается поступлением информации. Поэтому за меру информации, необходимой для устранения неопределенности, можно взять величину неопределенности с обратным знаком. Чем она больше, тем большую информацию должны содержать симптомы, используемые для постановки диагноза машине.

Как же оценить информационную ценность симптома? Пусть у машины различаются  $n$  состояний, т. е. неопределенность ее состояния перед диагностированием  $H = \log_2 n$ . При обнаружении у машины некоторого симптома число ее возможных состояний уменьшится, так как некоторые из них несовместимы с данным симптомом. Обозначим:  $n_1$  — число возможных состояний машины после обнаружения симптома;  $H_1$  — ее неопределенность. Тогда количество информации  $I$ ,

---

\* *Bit(binary digit)* — двоичный разряд.

доставляемой этим симптомом, будет равно разности  $I = H - H_1 = \log_2 \frac{n}{n_1}$ . Если после обнаружения симптома состояние машины будет полностью определено, т. е.  $n_1 = 1$ , то ее неопределенность станет равной 0, так как  $\log_2 1 = 0$ , а количество информации, доставляемой таким симптомом, равно первоначальной неопределенности. Для того чтобы поставить диагноз машине, информация, содержащаяся в используемых симптомах, должна быть не меньше неопределенности состояния машины перед диагностированием.

Говоря о неопределенности, мы несколько упростили вопрос. Дело в том, что неопределенность ситуации зависит не только от числа ее возможных исходов, но и от вероятности их наступления. Неопределенность — эта мера случайности исхода рассматриваемой ситуации. Так, если известно, что вероятность застать машину в некотором состоянии равна 0,99, то и без ее диагностирования можно утверждать, что она находится в этом состоянии. При этом мы ошибемся только в одном случае из ста. Значит, здесь неопределенность очень мала. Поэтому для оценки неопределенности существует более сложная формула, чем та, которую приводили выше. Она учитывает упомянутую здесь вероятность состояний:

$$H = P_1 \log_2 P_1 + P_2 \log_2 P_2 + \dots + P_i \log_2 P_i + P_n \log_2 P_n,$$

где  $P_i$  — вероятность застать машину в состоянии  $i$ .

Входящие в формулу вероятности определяются наблюдением за изменением состояния машин подопытной группы. Известно, что одни неисправности появляются чаще, другие реже. В зависимости от частоты появления различных состояний им приписываются соответствующие вероятности. Для примера в таблице указаны вероятности отказа различных элементов трактора, если известно, что он неисправен. Мы видим, что большинство неисправностей приходится на двигатель, а из элементов двигателя — на топливную систему.

Определим неопределенность состояния трактора ДТ-75:

$$H = 0,19 \log_2 0,19 + 0,40 \log_2 0,40 + 0,08 \log_2 0,08 + \\ + 0,05 \log_2 0,05 + 0,13 \log_2 0,13 + 0,10 \log_2 0,10 + \\ + 0,05 \log_2 0,05 = 2,4225 \text{ бита.}$$

Наименование элементов	Вероятность их неисправности для тракторов		
	ДТ-75	ДТ-54	«Беларусь»
Двигатель:	0,72	0,67	0,68
клапанный механизм			
с головкой блока	0,19	0,19	0,16
топливная аппаратура	0,40	0,22	0,38
система охлаждения	0,08	0,20	0,07
шатунно-поршневая			
группа и другие узлы			
двигателя	0,05	0,06	0,07
Трансмиссии:	0,23	0,22	0,16
коробка перемены			
передач	0,13	0,08	0,12
задний мост	0,10	0,14	0,04
ходовая часть	0,05	0,11	0,16

Для облегчения расчетов в книгах по теории информации\* обычно приводятся таблицы величин  $P \log_2 P$ .

Подсчитаем также неопределенность состояния тракторов ДТ-54 и «Беларусь». Они оказываются равными  $H = 2,6826$  бита и  $H = 2,4665$  бита соответственно, т. е. неопределенность состояния трактора ДТ-54 несколько больше, чем других машин, а значит, и его диагноз сложнее. Это объясняется тем, что вероятности отказов распре-

---

\* А. М. Я г л о м и И. М. Я г л о м. Вероятность и информация. Гос. изд. физико-математической литературы. М., 1960.

делены по узлам трактора ДТ-54 более равномерно. Поэтому, если обнаружено, что трактор неисправен, то угадать заранее, какой узел виновен в этом, для трактора ДТ-54 труднее, чем для других машин. Например, у трактора ДТ-75 40 % поломок приходится на топливную аппаратуру, поэтому, не ставя ему диагноза, можно наугад заявить, что неисправна топливная аппаратура, и в сорока случаях из ста это подтвердится. Такая неравномерность отказов вообще характерна для новой неотработанной конструкции.

Создание теорий не является самоцелью. Их разрабатывают для решения практических задач. «Нет ничего более практичного, чем хорошая теория», — сказал в свое время знаменитый немецкий физик Макс Планк. Поэтому, если бы теория информации только и могла делать, что подсчитывать неопределенность, то пользы от нее было бы мало.

Основная практическая задача, для решения которой служит теория информации, — это передача сообщений без искажения.

## **Сигнал**

Доставку информации потребителю обеспечивают сигналы. Сигнал — это то, на что мы всегда реагируем. Сигналом может служить процесс любой физической природы, способный перемещаться на расстояние. В радиосвязи в качестве сигналов используются электромагнитные волны. Они переносят информацию на огромные расстояния с большой скоростью, равной скорости распространения света (300 000 км/сек).

В диагностике сигналами могут служить упругие волны, возбуждаемые в механизме соударениями деталей. Они несут в себе следы событий, происходящих в кинематических парах, и, свободно распространяясь по металлу, без труда доставляют информацию из недр машины. В механизмах путь сигнала от посылающей его детали

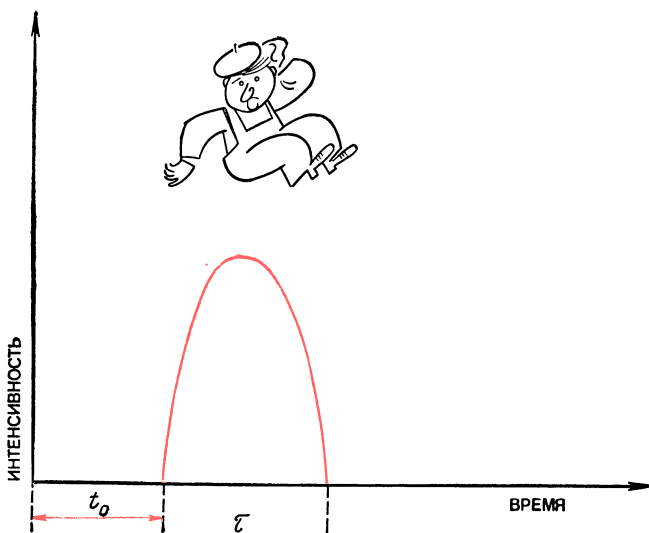


Рис. 4. Импульс.

до приемника, расположенного на корпусе, короткий, поэтому не удивительно, что к приемнику приходят «голоса» всех деталей.

Сигнал может переносить информацию благодаря тому, что некоторые его параметры способны изменяться в зависимости от содержания информации. Процесс наполнения сигнала информацией называют кодированием. О кодировании более подробно мы расскажем в следующем параграфе. А сейчас рассмотрим два вида сигналов, с которыми приходится иметь дело в диагностике.

Различают сигналы импульсные и непрерывные. Сигнал, величина которого отлична от нуля только в течение конечного интервала времени, называется импульсным. Между собой такие сигналы отличаются амплитудой  $A$ , длительностью  $\tau$ , положением на

оси времени относительно начала отсчета  $t_0$  и формой. Все эти параметры импульса могут изменяться, а поэтому и переносить информацию.

Для передачи сообщений редко используются одиночные импульсы. Обычно импульсный сигнал представляет собой последовательность импульсов, возникающих один за другим. Таким сигналом, например, будут соударения деталей в работающей кинематической паре. При движении механизма удары деталей в кинематической паре повторяются через определенные интервалы времени.

Вместе с импульсным почти всегда передается опорный сигнал. Им задается шкала отсчета времени, поэтому иногда его называют тактирующим сигналом. Опорный сигнал представляет собой периодическую последовательность импульсов произвольной формы и амплитуды. Интервал времени  $T$  (период) между импульсами опорного сигнала постоянен. В результате смещения импульсов основного сигнала относительно опорных происходит передача информации.

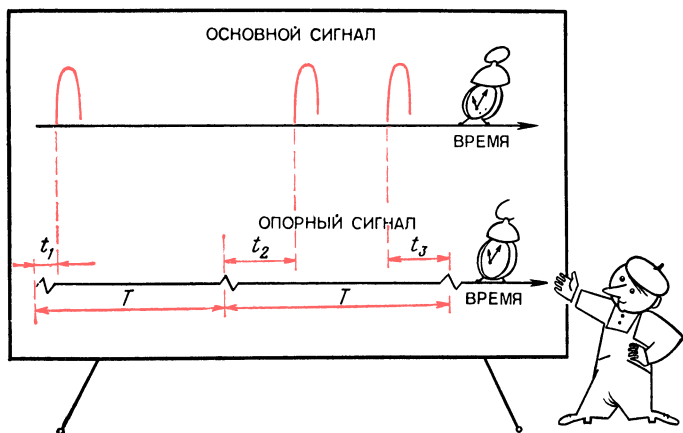
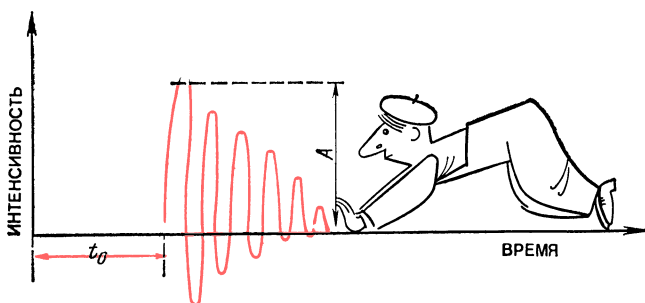


Рис. 5. Последовательность импульсов и опорный сигнал.





*Рис. 6. Импульс с высокочастотным заполнением.*

В диагностике для выработки опорного сигнала выбирают какую-либо характерную фазу движения механизма и устанавливают на механизм специальный датчик для ее регистрации. Так, в двигателях внутреннего сгорания за начало отсчета времени принимают момент, в который поршень одного из цилиндров проходит верхнюю мертвую точку (в.м.т.). Для регистрации этого момента в соответствующем месте маховика просверливают отверстие или наносят риску. Датчик, установленный на картере маховика, регистрирует момент прохождения мимо него отверстия или риски и вырабатывает в этот момент импульс, который служит опорным сигналом и синхронизирует работу всех блоков диагностической аппаратуры. По величине смещения импульсов, возбуждаемых ударами клапанов, иглой форсунки и другими элементами двигателя относительно опорного импульса, можно оценить степень их разрегулировки.

Непрерывный сигнал равен нулю только в некоторые моменты времени, а все остальное время отличен от нуля. В нем различают высокочастотное заполнение и его огибающую. В радиотехнике высокочастотное заполнение называют также несущей. Она представляет собой очень быстрое колебание — миллионы циклов в секунду. Сиг-

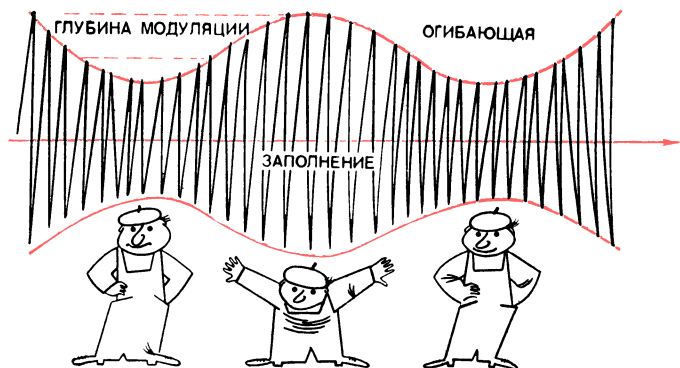


Рис. 7. Непрерывный сигнал.

налы, передаваемые различными радиостанциями, отличаются частотой колебаний несущей, это и позволяет радиоприемнику принимать сигнал только нужной станции. Огибающая радиосигнала имеет сравнительно низкую частоту — от нескольких десятков до нескольких тысяч колебаний в секунду. Ее изменение происходит в такт передаваемого сообщения, т.е. ее форма соответствует колебаниям мембраны микрофона при восприятии речи диктора или музыки. Собственно говоря, информация, переносимая радиосигналом, содержится только в его огибающей. Поэтому, чтобы ее воспроизвести, в радиоприемнике имеется специальное устройство — детектор, который выделяет огибающую радиосигнала и направляет ее в громкоговоритель. Эффективность передачи сообщения существенно зависит от г л у б и н ы м о д у л я ц и и. Грубо говоря, глубина модуляции колебаний — это разность между горбом и впадиной огибающей, отнесенная к величине горба.

Мы подробно остановились на радиосигнале потому, что он имеет много общего с сигналом, используемым в диагностике. Здесь также имеется высокочастотное запол-

нение (несущая) и огибающая. Заполнение, как и в радиотехнике, используется для выделения нужной «станции», которой здесь являются кинематические пары, посылающие сигналы. Но в отличие от радиосигналов, несущая которых представляет простое синусоидальное колебание, в диагностике несущая образуется как смесь очень многих синусоидальных колебаний разных частот. Основная информация диагностического сигнала как в радиосигнале содержится в его огибающей, поэтому диагностические приборы почти всегда имеют детектор, который позволяет отделить огибающую от несущей. Эффективность диагностики очень существенно зависит от глубины модуляции сигнала, поэтому позже мы уделим этому вопросу определенное внимание.

Многообразие сигналов, используемых для передачи сообщений, не поддается перечислению. Мы рассмотрим только два, которые считаются элементарными, т. к. из них можно построить сигнал любой формы. Один из этих сигналов будет импульсным, другой — непрерывным.

Представьте очень короткий импульс, длительностью которого можно пренебречь, но площадь которого имеет конечную величину  $q_0$ . Чтобы удовлетворить такие требования, мы должны принять, что амплитуда нашего импульса бесконечно велика. Очевидно, что в природе такие импульсы не встречаются. Даже самые быстротечные процессы имеют конечную длительность. Так, соударение деталей продолжается всего пятьдесят — сто миллионных долей секунды, но все же это время больше нуля.

Не встречаются в природе и бесконечно большие интенсивности. В момент удара деталей в зоне их контакта возникает огромное давление, измеряемое тысячами атмосфер, но оно имеет конечную величину. И тем не менее мы рассмотрим такой идеализированный импульс. Идеализация вообще является основным методическим приемом науки. Наука рассматривает, как правило, искусственные схематизированные объекты с очень прозрачной структурой. Именно на них удобнее всего решать принципиаль-

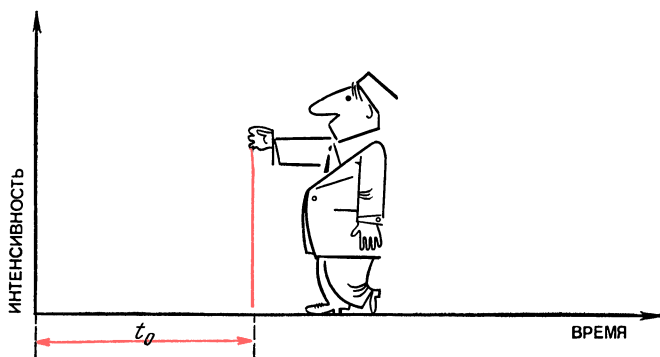


Рис. 8. Дельта-импульс.

ные вопросы. Познание — сложный и многогранный процесс отражения действительности. Он развивается согласно ленинской формулировке: от живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике.

Если площадь, ограниченная рассматриваемым импульсом, равна  $q_0 = 1$ , то такой импульс называют дельта-импульсом Дирака, по имени знаменитого английского физика. У дельта-импульса имеется только один параметр, который способен изменяться, а значит, и переносить информацию. Это момент времени  $t$ , в который возникает импульс. В дельта-импульс можно ввести еще один переменный параметр  $q_0$ , соответствующий его интенсивности.

Другим элементарным и тоже идеализированным сигналом будет синусоидальный процесс:

$$S(t) = A \sin(\omega t + \varphi).$$

Форму этого сигнала можно получить, если закрепить на конце маятника перо, заставить его колебаться и перпендикулярно плоскости колебаний с постоянной скоростью протащить бумажную ленту. Перо нарисует на бумаге синусоиду.

Величина  $A$  в формуле характеризует размах колебаний, она называется амплитудой.  $\omega$  — частота колебаний, измеряемая числом радиан в секунду. Эта частота называется круговой и используется только для упрощения формул. Обычно частоту колебаний измеряют в натуральных единицах, числом полных колебаний в секунду. Одно колебание в секунду называют герцем. Герц служит обычно единицей измерения частоты. Частоту колебаний, выраженную в герцах, мы будем обозначать  $\nu$ . Для перехода от круговой частоты к натуральным единицам можно использовать следующую формулу:  $\omega = 2\pi\nu$ , где  $\pi = 3,14\dots$

Величина  $\varphi$  называется начальной фазой. Она определяется положением начала отсчета времени.

В естественных науках существуют два основных методических подхода к изучению различных явлений: временной и спектральный. В первом случае интересуются развитием процесса во времени. Примером временной картины является осциллограмма колебаний механизма, зарегистрированная датчиком. На ней мы видим моменты времени, в которые амплитуда колебаний имеет максимальную и минимальную величины, видим изменение огибающей, т. е. весь ход процесса.

При спектральном подходе процесс рассматривается как набор синусоидальных колебаний. Этот набор называется спектром процесса. Его можно изобразить графически. Каждая синусоидальная составляющая изображается вертикальной линией. Положение этой спектральной линии указывает частоту колебаний синусоиды, а высота — амплитуду. На спектре процесса можно видеть, какие синусоиды входят в его состав и какова их интенсивность. При спектральном рассмотрении один процесс отличается от другого частотой образующих его синусоид и их интенсивностью. Многие процессы, в частности импульсы, а также акустический сигнал механизмов, имеют спектр, линии которого сливаются. Такой спектр называется сплошным. Он показывает, что процесс образован

бесконечно большим числом синусоид, частоты которых непрерывно заполняют определенный частотный диапазон.

Кроме указанных спектров, которые называются амплитудными, каждый процесс имеет также спектр фаз. Но с ним нам в дальнейшем встретиться не придется.

Разложение процесса на синусоидальные составляющие называется спектральным анализом. Для его осуществления имеются специальные приборы — спектральные анализаторы. Они устроены так, что если на их вход подать какой-либо процесс, например колебание механизма, то на выход они пропускают из всего процесса только одну, представляющую определенный интерес синусоиду или несколько синусоид с близкими частотами, так что можно измерить их интенсивность.

Оба подхода к изучению явлений, временной и спектральной, равноправны. Существуют методы, которые называются преобразованиями Фурье, позволяющие по развитию процесса во времени определить его спектр и, наоборот, по спектру восстановить картину протекания процесса. Но каждый из этих подходов обладает спецификой и наиболее удобен для отражения определенных свойств изучаемого явления.

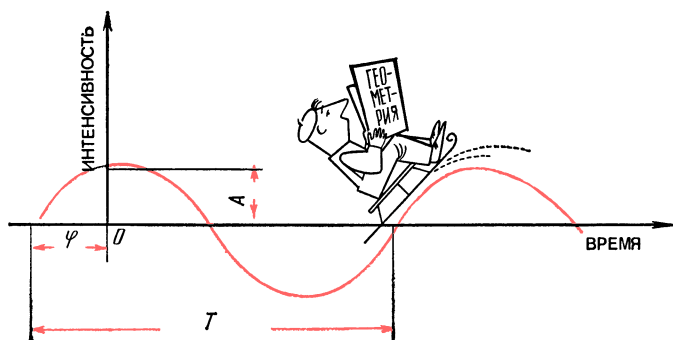
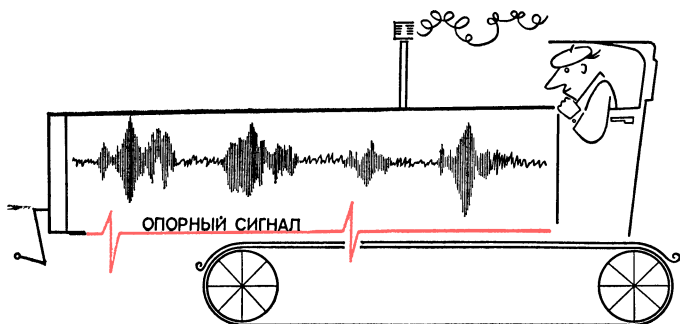


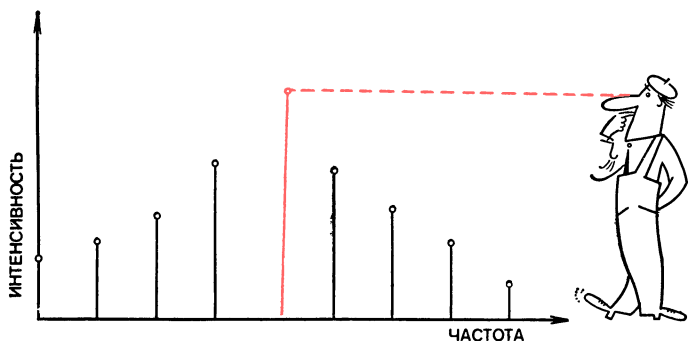
Рис. 9. Синусоида.



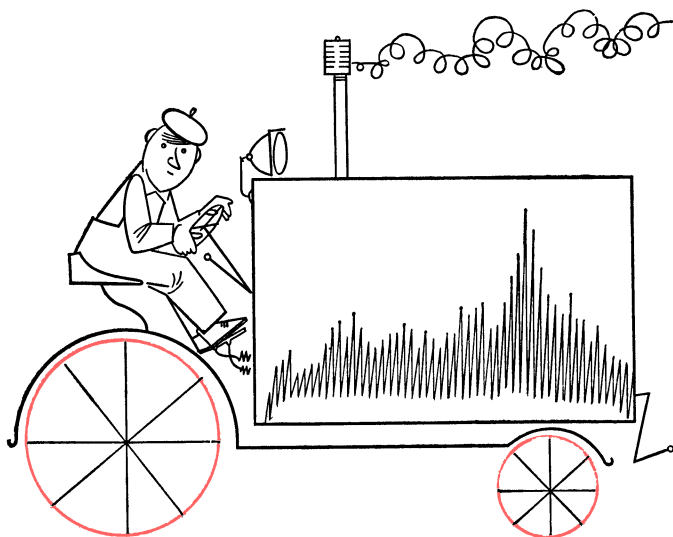
*Рис. 10. Осциллограмма колебаний двигателя.*

При решении проблем передачи, приема и преобразования информации преобладает спектральный подход. Чаще рассматривают не изменение сигнала во времени, а его спектр. Поскольку проблема диагностики — это проблема получения информации, то очень многие вопросы приходится обсуждать, пользуясь спектральным языком.

С чем связана необходимость использования спектров вместо рассмотрения изменений сигналов во времени? Методические преимущества спектрального подхода состоят в основном в том, что, разложив сигнал на элементарные части (синусоиды), мы можем проследить за всеми его преобразованиями, изучая преобразования каждой синусоиды в отдельности. При передаче сигнала по каналу связи каждая его синусоидальная составляющая проходит независимо от других. Правда, это наблюдается только в так называемых линейных каналах, но многие реальные каналы можно считать линейными. Преимущество спектрального подхода состоит еще и в том, что синусоида обладает замечательным свойством — форма ее не меняется при прохождении по большинству каналов. Ниже мы часто будем пользоваться спектрами и по ходу изложения давать дополнительные пояснения.



*Рис. 11. Положение спектральных линий указывает частоту синусоид, входящих в состав сигнала, их высота — интенсивность составляющих.*



*Рис. 12. Спектр колебаний двигателя непрерывный, то есть указывает на то, что в состав сигнала входят синусоиды всех частот. Такой спектр имеет одиночные импульсы и случайные сигналы (шумы)*



Если в океан вылить стакан горячей воды, то температура его повысится. Но можно ли измерить на какую долю градуса стали теплее океанские волны? Этим примером известный специалист в области космической связи член-корреспондент Академии наук СССР В. И. Сифоров проиллюстрировал чувствительность аппаратуры, с помощью которой принимают сигналы от кораблей, летящих к Марсу или Венере.

Почему трудно принимать слабые сигналы и есть ли предел чувствительности приборов? Например, можно ли с помощью микрофона и усилителя, находясь в Москве, слышать топот муравья, ползущего по дереву в Африке?

Простейший усилитель, состоящий из транзистора, двух сопротивлений и конденсатора, может усилить сигнал в 50 раз. Два таких усилителя, соединенных последовательно, увеличат сигнал в  $50 \times 50 = 2500$  раз. Казалось бы, что нет предела чувствительности наших приборов. Четыре усилителя позволяют усилить сигнал более чем в миллион раз, а это будет очень простой прибор — четыре транзистора, несколько сопротивлений и конденсаторов. Ничто не мешает соединить нужное число усилителей, чтобы обеспечить достаточную громкость стука муравьиных лапок. Но это не совсем так.

Трудность приема слабых сигналов определяется отнюдь не трудностью их усиления. Это довольно простая задача. Но как добиться, чтобы, усиливая нужный сигнал, не усилить в такой же степени заглушающие его помехи. Усиливая топот муравья, мы неизбежно усилим и шорох листьев, и крики птиц, и все остальное, что шумит вокруг нас. Кому приходилось настраивать приемник на слабую станцию во время грозы, когда голос диктора или музыку заглушает треск атмосферных разрядов, тот знает, что увеличением громкости нельзя улучшить разборчивость передачи. При увеличении громкости сигнала возрастает в такой же мере и громкость помех. Поэтому проблема при-

ема слабых сигналов — это проблема борьбы с помехами. Любой принимаемый сигнал состоит из двух частей. Одна из них содержит полезную информацию. Она называется полезным сигналом или просто сигналом. Другая часть является помехой. Она поступает в приемник вместе с полезным сигналом, искажает его и затрудняет понимание. Поскольку сигнал и помеха поступают в усилитель одновременно, то, усиливая сигнал, мы усилим и помеху. Успех в приеме информации существенно зависит от того, насколько удастся подавить помеху, не повреждая сигнала. Трудности проблемы диагностики, сложность аппаратуры для ее осуществления главным образом определяются необходимостью борьбы с помехами.

Научный фундамент при решении этой задачи дает теория информации. Прием сигналов в условиях помех — основной объект ее исследования. В последующих главах мы познакомимся с методами, которыми сигнал очищается от помехи в системе диагностики. А сейчас только заметим, что борьба с помехами основывается на использовании различий в свойствах сигнала и помехи. Чем больше они отличаются друг от друга, тем легче отделить сигнал от помехи. Такая ситуация напоминает просеивание муки через решето. Чем крупнее примесь, тем легче ее отделить от муки. Поэтому, чтобы научиться хорошо диагностировать машины, нужно обстоятельно изучить свойства сигналов и помех и выявить все их различия.

В диагностике полезным сигналом является колебание механизма, возбуждаемое интересующей нас в данный момент кинематической парой. Именно оно доставляет к датчику информацию о состоянии кинематической пары. Но датчик, установленный на корпусе механизма, воспримет не только его. К нему придут сигналы и от других кинематических пар. Ведь они в это время тоже работают и возбуждают в механизме колебания. Поэтому их следует считать помехой. Они заглушают сигнал от нужной пары и мешают его приему. Чтобы освободить сигнал от воздействия помех, нужно узнать, чем отличаются сигналы,

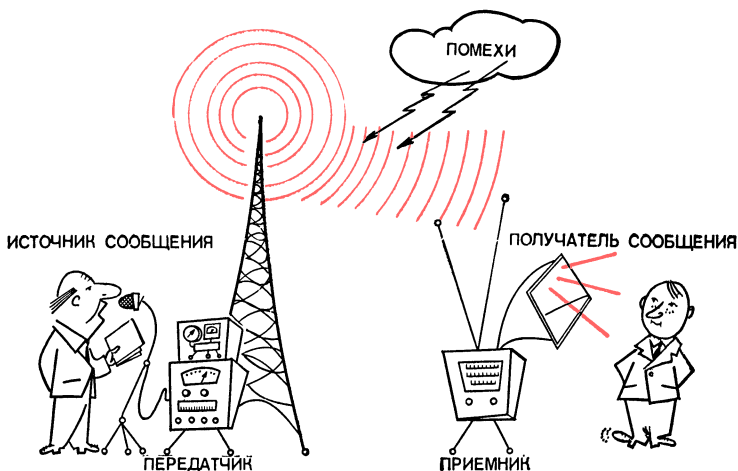
посылаемые различными кинематическими парами. Тогда на пути сигнала можно будет поставить соответствующий фильтр, который пропустит сигнал и задержит помехи.

## **Канал связи**

Систему, предназначенную для передачи информации, называют каналом связи. Канал состоит из следующих элементов: источника сообщения, кодирующего устройства, линии передачи, декодирующего устройства и потребителя информации. Чтобы пояснить назначение этих элементов, рассмотрим передачу информации по каналу акустической диагностики. Здесь источником информации о состоянии механизма служат упругие колебания, возбуждаемые соударением деталей, соединенных в кинематические пары. Они воспринимаются датчиком, установленным на корпусе механизма, и расшифровываются диагностическим прибором.

Источником сообщения в канале акустической диагностики является кинематическая пара, т. е. соединение двух деталей, которые могут перемещаться одна относительно другой. Кинематическими парами служат подшипники качения и скольжения, шестеренчатая пара, сочленения: поршень — гильза, клапан — головка блока, игла форсунки — корпус распылителя и т. д.

Сообщение, которое передает кинематическая пара, — это информация о ее состоянии: о величине зазора, погрешностях шестеренчатого зацепления, запаздывании или опережении открытия и закрытия клапана, о начале и продолжительности впрыска топлива в цилиндр двигателя и о других показателях. Чтобы сообщение поступило к получателю, оно должно быть превращено в сигнал. Эта операция называется кодированием и заключается в том, что определенные параметры процесса, выбранного для передачи сообщения, изменяются в зависимости от содержания передаваемой информации.



*Рис. 13. Канал связи.*

В акустической диагностике кодирование сообщения о состоянии кинематической пары выполняется в несколько этапов.

Вначале сигнал формируется в виде последовательности импульсов соударения деталей. Информация о состоянии кинематической пары находит отображение в амплитуде и в их положении относительно опорного сигнала. Скажем, чем больше зазор между деталями, тем интенсивнее их столкновение. Разрегулировка механизма приводит к тому, что удар деталей происходит или позже или раньше запроектированного момента времени.

Импульсы соударения деталей возбуждают в механизме упругие колебания. Это второй этап кодирования. Информация о состоянии кинематической пары отражается в параметрах колебания. Датчик, установленный на корпусе механизма, преобразует механические колебания в электрический сигнал. Затем сигнал поступает в блоки

диагностической аппаратуры, где подвергается многостадийной процедуре расшифровки (декодирования). Ее результат выдается потребителю в виде заключения о состоянии машины.

Здесь следует сказать несколько слов о кодировании сигнала в самой диагностической аппаратуре. Как мы уже упоминали, расшифровка сигнала представляет собой последовательность его преобразований. Очевидно, что при каждом преобразовании в сигнал могут быть внесены погрешности, которые исказят содержащуюся в нем информацию. Поэтому целесообразно придать ему такую форму, чтобы возможность искажений была минимальной. При следовании сигнала по материалу механизма от пославшей его кинематической пары до датчика возможности преднамеренно влиять на сигнал крайне ограничены, поскольку он является естественным процессом, связанным с работой механизма.

Иное дело сигнал, проходящий по блокам диагностической аппаратуры. Эти блоки специально разрабатываются для манипуляции с сигналами, поэтому при их проектировании можно предусмотреть возможность работы с сигналами любой формы.

Установлено, что с точки зрения помехоустойчивости большими преимуществами обладают сигналы, представленные в виде импульсной модуляции. Это существенно дискретные сигналы в отличие от непрерывных, поступающих в диагностическую аппаратуру с датчиков. Поэтому возникает вопрос, как превратить с наименьшими погрешностями непрерывный сигнал в последовательность импульсов. Такая процедура называется квантованием. В результате непрерывный сигнал заменяется последовательностью его мгновенных значений в определенных точках. В свою очередь, величину непрерывного сигнала в точках отсчета можно представить несколькими способами. Во-первых, можно сделать так, что амплитуда импульсов будет равна значению сигнала в момент появления импульса. Такая система кодирования непрерывного

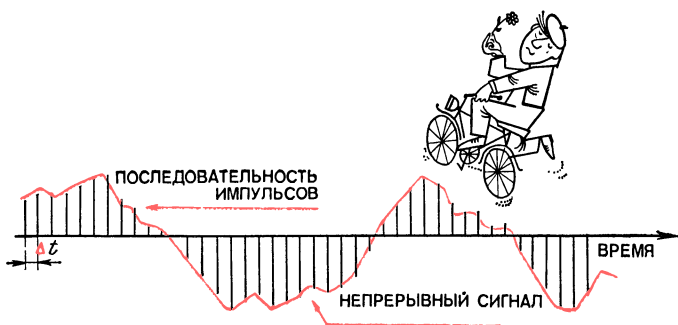


Рис. 14. Квантовые непрерывного сигнала.  $\Delta t$  — шаг квантования.

сигнала называется амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ). Она широко используется в системах диагностики. Вторая система кодирования заключается в том, что величина сигнала в точке квантования заменяется пачкой периодических импульсов, причем чем больше значение сигнала, тем больше импульсов в пачке. Такое кодирование применяется в диагностике перед измерением амплитуды сигнала. Вместо того чтобы измерять эту амплитуду, дело сводится к счету импульсов. Очевидно, что при счете возможность ошибки меньше, чем при обыкновенном измерении.

И, наконец, последняя система кодирования — это кодово-импульсная модуляция (КИМ). Она состоит в том, что величина сигнала в точке отсчета заменяется комбинацией импульсов, т. е. условным обозначением величины сигнала. Кодовые комбинации импульсов представляют собой числа, записанные в двоичной системе.

В повседневной жизни мы пользуемся десятичными числами. Каждое число представляет собой сумму:

$$\alpha \cdot 10^0 + \beta \cdot 10^1 + \gamma \cdot 10^2 + \dots$$

Например,

$$378 = 8 \cdot 10^0 + 7 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^2 = 8 + 70 + 300.$$

В двоичной системе числа имеют вид:

$$\alpha \cdot 2^0 + \beta \cdot 2^1 + \gamma \cdot 2^2 + \dots$$

Например, число 5 в двоичной системе записывается так:

$$5 = 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 4 + 0 + 1 = 101.$$

С числами, представленными в двоичной системе, сейчас работают почти все вычислительные машины. Это связано с тем, что каждый разряд числа может быть представлен системой, имеющей всего два устойчивых состояния, например двухпозиционным переключателем (тумб-

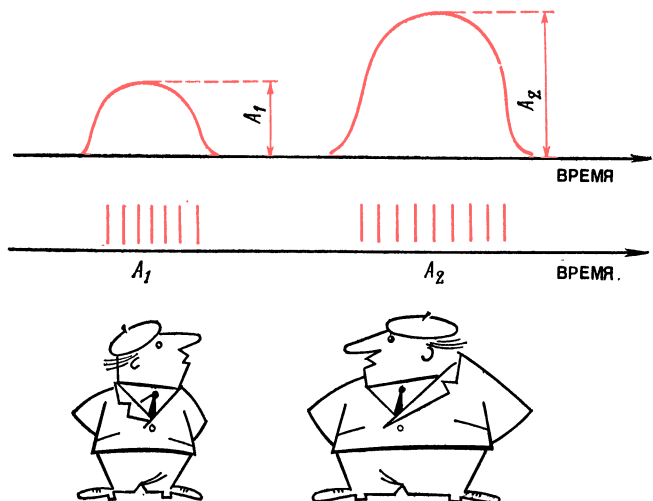
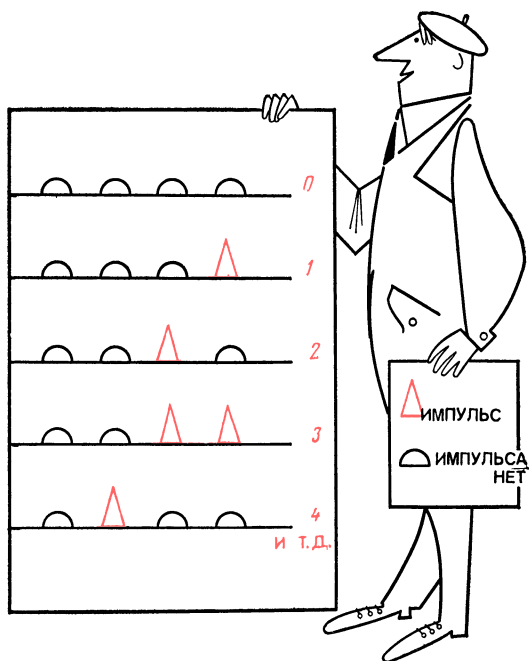


Рис. 15. Величина амплитуды сигнала представляется определенным числом импульсов. Чем больше амплитуда, тем больше импульсов в пакете.

лером): 1 — тумблер включен, 0 — тумблер выключен. Такие числа очень удобно представлять и импульсами: 1 — есть импульс; 0 — импульса нет. Очевидно, что пропустить импульс или, наоборот, обнаружить там, где его нет, — это менее вероятная оплошность, чем просто погрешность в измерении амплитуды сигнала.

В системах диагностики кодово-импульсная модуляция применяется главным образом в двух случаях: при выдаче результатов диагноза на автоматическое печатающее устройство и при использовании в системе диагности-



*Рис. 16. При кодово-импульсной модуляции числа представляются комбинациями импульсов.*



ки электронной вычислительной машины. С одной из таких систем мы познакомимся ниже.

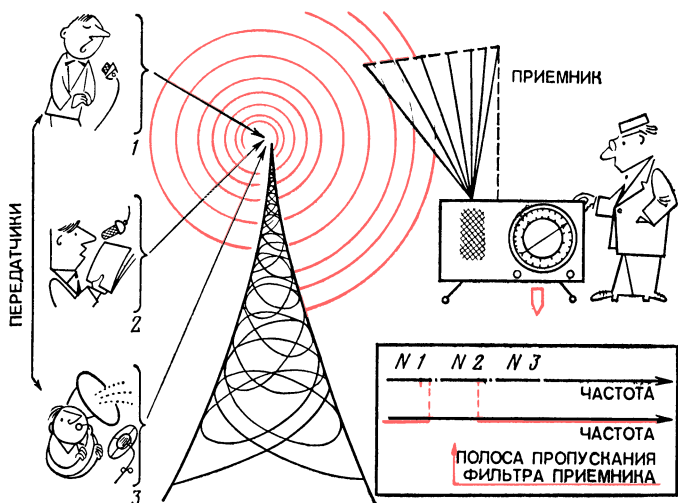
Для преобразования непрерывного сигнала в цифровой код применяются так называемые аналого-цифровые преобразователи (АЦП) во многих модификациях.

При квантовании непрерывного сигнала большое значение имеет правильный выбор величины интервалов, через которые производятся отсчеты сигнала. Очевидно, чем быстрее протекает процесс, тем чаще следует брать отсчеты, чтобы ошибка была меньше. И, наоборот, если процесс изменяется медленно, то отсчеты можно брать реже. Существует теорема, доказанная академиком В. А. Котельниковым, которая утверждает, что практически каждый непрерывный сигнал может быть заменен с любой наперед заданной точностью, последовательностью импульсов. Эта же теорема указывает, как следует подходить к выбору шага квантования.

### **Многоканальные системы**

Первой технической системой связи, которая широко используется и сейчас, является телеграф. Первую телеграмму из Капитолия в Вашингтоне послал своему сотруднику в Балтимор в 1844 году Самюэл Морзе — изобретатель известного телеграфного кода. Эта телеграмма и открыла эру телеграфа. Триумф телеграфа произошел в 1858 году, когда английская королева Виктория отправила телеграмму президенту Соединенных Штатов Америки Бьюкенену по трансатлантическому кабелю. По этому случаю в Нью-Йорке два дня продолжался «кабельный карнавал». Правда, примерно в это же время кабель отказал и телеграфная связь Европы с Америкой прекратилась. Лишь через восемь лет после этого закончили укладку нового кабеля, после чего связь восстановили и она действует и сейчас.

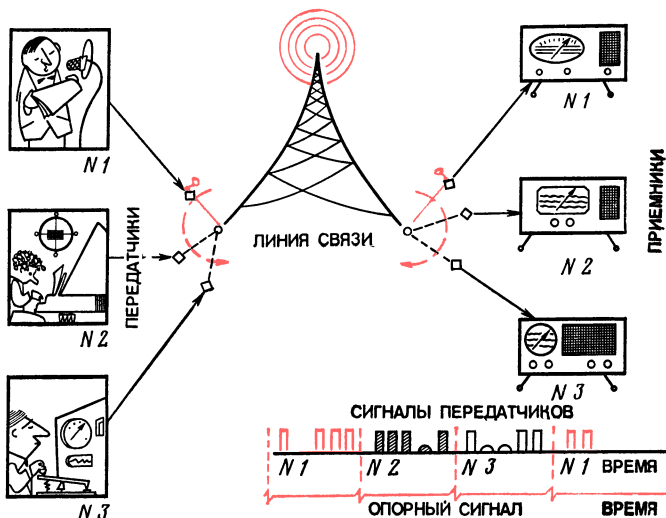
В стоимости телеграфных установок основные капитальные затраты приходятся на строительство самой ли-



*Рис. 17. Радиостанции ведут передачи на разных частотах. Фильтр в приемнике выбирает сигнал одной станции и подавляет сигналы других станций.*

нии. Например, прокладка кабеля через океан обошлась во многие миллионы долларов. Поэтому почти с первого момента появления телеграфной связи начались энергичные поиски возможностей увеличения пропускной способности линии. Первым добился результата французский изобретатель Бодо, разработавший пятизначный код. Он использовал для передачи сигнала одного передатчика паузы между импульсами, передаваемыми другим аппаратом. Таким образом, одновременно можно было передавать по линии два сообщения. Много сделал для повышения пропускной способности телеграфной линии и великий изобретатель Томас Эдисон.

Система, в которой одна линия используется для одновременной передачи нескольких сообщений, называется многоканальной системой связи. Сейчас такие системы



*Рис. 18. При временном разделении передатчики действуют поочередно. Для синхронизации работы системы используется опорный сигнал.*

широко распространены и в телеграфии, и в телефонии, и в системах автоматического управления. Подобной системой является и радиосвязь, возможность которой открыл великий русский ученый А. С. Попов. В 1889 году на лекции для минных офицеров в Кронштадте он продемонстрировал передачу сигналов с помощью электромагнитных волн.

Исследования и изобретения в области радиосвязи после этого начали очень бурно проводиться во всех развитых странах. Уже в 1900 году новое средство связи предотвратило гибель рыбаков, унесенных на льдине в открытое море.

Сейчас радиосвязь в виде радиовещания и телевидения прочно вошла в быт современного человека. Многие

сотни радиостанций и телевизионных центров используют для передачи сообщений единую линию — эфир.

Основная проблема при использовании многоканальных систем связи — это задача разделения сигнала, прошедшего на приемный конец линии, на отдельные сообщения, посланные отправителями. В основном применяются два способа разделения сигнала: частотный и временной. Мы уже о них упоминали.

При использовании частотного способа рабочий диапазон частот разделяется на отдельные интервалы (полосы), и каждому передатчику отводится своя полоса частот. Приемник сигнала устроен так, что он принимает только тот сигнал, спектр которого лежит в нужной полосе. Для этого на входе приемника стоит фильтр, который подавляет все сигналы, лежащие вне полосы приема. На этом принципе работает радиосвязь, телефонная связь высокой частоты (ВЧ) и многие системы автоматики. Следует заметить, что очень трудно уложить сигнал в заданную полосу частот, обычно некоторая часть его выходит за границу полосы и создает для других приемников так называемые внеполосные помехи.

О временном разделении мы также уже упоминали, рассказывая о попытках увеличить пропускную способность телеграфных линий, передавая сигнал во время пауз, образующихся при передаче другого сигнала. На приемном конце такой системы стоят временные фильтры (стробаторы). Это приборы, которые пропускают через себя сигнал только в те моменты времени, когда поступает посылка нужного сигнала, а все остальное время стробатор закрыт для сигналов. Для синхронизации работы передатчика и приемника по системе передаются специальные синхронизирующие импульсы (опорный сигнал).

При разработке систем диагностики, а также при рассмотрении теоретических вопросов удобно представить механизм машины в виде многоканальной системы связи. Источниками сообщений здесь выступают кинематические пары. Они посылают сигнал в единую линию — в тело

самого механизма. Датчик, установленный на корпусе, одновременно воспринимает сигналы, отправленные всеми парами механизма. Поэтому основная задача заключается в том, чтобы разделить общий сигнал на отдельные составляющие, каждая из которых принадлежит только одной кинематической паре.

В диагностике для разделения сигналов, отправленных разными источниками, используются те же два основных приема, что и в других многоканальных системах: частотная и временная фильтрация. Отличие состоит в том, что оба способа в диагностике используются одновременно. Это связано с тем, что ни частотная, ни временная фильтрация, взятые отдельно, не позволяют выделить сигнал нужной кинематической пары и очистить его от помех, образованных другими парами этого же механизма. Если сигналы в обычных системах связи выбираются такими, чтобы их легко можно было отделить друг от друга, то в диагностике приходится пользоваться теми сигналами, которые вырабатывает механизм.

## Логика

Невозможно выработать правила, которыми человек должен руководствоваться во всех случаях жизни. Очень сложна и многообразна жизнь и слишком большую роль в деятельности человека играют эмоции, интуиция и другие, не поддающиеся формализации факторы. Даже в такой ограниченной сфере действия, как постановка диагноза машине, человек полагается не столько на четкие предписания, сколько на настроение, догадку и предшествующий опыт.

Чтобы устранить субъективизм в диагнозе и повысить его эффективность, нужно возложить выполнение этой операции на чувствительные и беспристрастные приборы. Любое диагностическое устройство представляет собой металлический ящик, набитый проводами, транзисторами, сопротивлениями, конденсаторами и другими радио-

детальми. Эмоции, интуиция, догадка и другие характерные для человека мотивы поведения совершенно чужды этому устройству. Оно может действовать только согласно строгим и подробным предписаниям, которые заранее вложил в него человек.

Программа действий, т. е. точное предписание об определенном порядке выполнения операций при решении задачи, называется алгоритмом.

Процесс диагностирования машины тесно связан с процессом рассуждения о симптомах и неисправностях. Заключение о ее состоянии получается путем логического вывода из других утверждений. Этот процесс не всегда протекает гладко, часто встречаются довольно запутанные ситуации. Для формализации процесса рассуждений и сведения его к последовательности стандартных операций, которые может осуществить не только человек, но и автоматическое устройство, полезно использовать математическую логику.

Логика — это наука, которая разрабатывает правила построения одних утверждений из других. Она изучает формы и законы рассуждений. О существовании таких законов знали еще в древнем мире. Строгую систему логики, которой пользуются и поныне, разработал древнегреческий философ Аристотель.

Правила логики очень похожи на правила арифметики. И действительно, английскому математику Джону Булю удалось разработать своеобразную алгебру, которую позднее называли математической логикой, или исчислением высказываний. Она выражает логические правила математическими формулами. В настоящее время математическая логика развилась в обширную науку. Это связано с тем, что она нужна для проектирования электронных вычислительных машин.

С точки зрения логики процесс диагностического рассуждения включает в себя два вида утверждений: высказывания о наличии симптомов и заключение о состоянии машины. Эти утверждения могут быть истинными или

ложными. Истинные утверждения будем обозначать через 1, а ложные — 0. Сами высказывания обозначим буквами, как это делается в алгебре по отношению к числам. Высказывания о наличии определенных симптомов у обследуемой машины обозначим буквами  $x, y, z, \dots$ , а утверждения о том или другом ее состоянии —  $w_1, w_2, \dots, w_n$ . Таким образом, переменные величины  $x, y, z, \dots$  и  $w_1, w_2, \dots, w_n$  могут принимать только два значения: 0, когда обозначенное ими высказывание ложно, и 1, когда оно истинно. Утверждение о том, что машина находится в некотором состоянии  $w_i$ , является функцией высказываний о наблюдающихся симптомах.

$$w = f(x, y, z, \dots).$$

Теперь расскажем о том, как строятся и вычисляются функции указанного вида. Здесь имеется большое сходство с обычной алгеброй. Алгебраические формулы включают в себя несколько стандартных действий над аргументами: сложение, умножение, извлечение корня, возведение в степень и т. д. Логические формулы также обозначают некоторую последовательность элементарных действий, поэтому прежде всего познакомимся с ними.

**Л о г и ч е с к о е   с л о ж е н и е** (дезъюнкция) двух высказываний. Эта операция обозначается так:  $x \vee y = w$ .

Таблица для ее вычисления напоминает таблицу умножения:

$$0 \vee 0 = 0$$

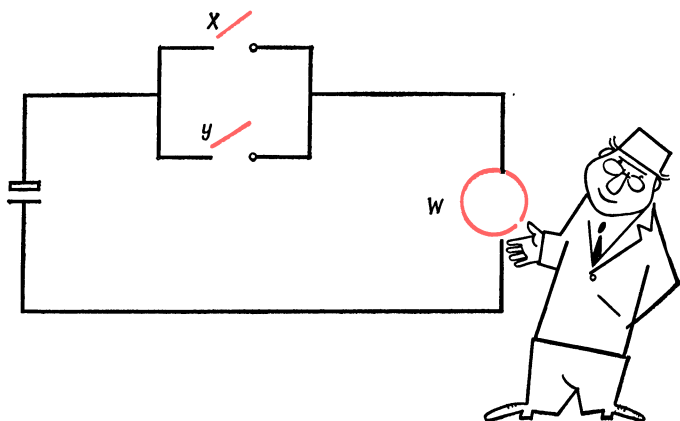
$$1 \vee 0 = 1$$

$$0 \vee 1 = 1$$

$$1 \vee 1 = 1$$

Сложное утверждение, имеющее форму логического сложения, ложно только в том случае, если ложны оба составляющие его высказывания.

Если обозначить  $x$  высказывание *выпускной дым трактора синего цвета*,  $y$  — *данный трактор перерасходует картерную смазку*,  $w$  — *большой износ маслосъемных ко-*



*Рис. 19. Логическое сложение — два параллельных переключателя. Включенное положение — истинное высказывание, выключенное — ложное.*

лец, то утверждение  $x \vee y = w$  можно прочесть так: если выпускной дым синего цвета или трактор перерасходует картерную смазку, это означает, что у него изношены маслосъемные кольца.

Логическое умножение (конъюнкция) — это такое сложное утверждение, которое истинно только в одном случае, если истинны оба образующие его высказывания. Логическое умножение обозначается так:  $x \wedge y = w$  и имеет следующую таблицу истинности:

$0 \wedge 0$	$= 0$
$1 \wedge 0$	$= 0$
$0 \wedge 1$	$= 0$
$1 \wedge 1$	$= 1$

Логическим умножением будет, например, такое утверждение: у трактора поздний впрыск топлива, если он «не тянет» и выпускной дым черного цвета.



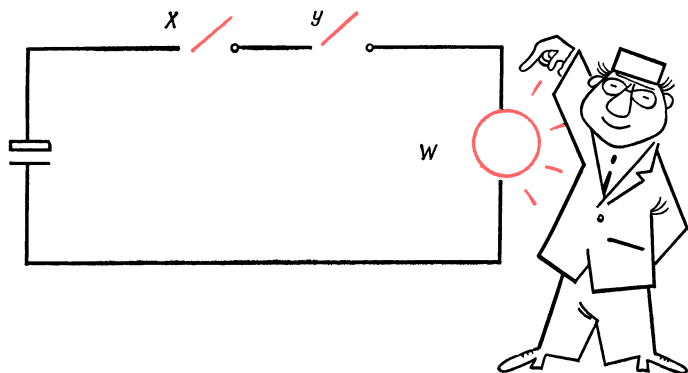


Рис. 20. Логическое умножение. Лампочка загорится только тогда, когда будут включены оба переключателя.

Существует еще несколько логических операций, используемых при построении сложных логических функций, но мы упомянем еще об одной, которая часто применяется при разработке логики диагностических приборов.

Несовпадение высказываний, таблица истинности имеет следующий вид:

$x$	$y$	$w$
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

При разработке системы диагностики какого-либо механизма каждое из его возможных состояний  $w$  представляют как логическую функцию симптомов и сводят эти функции в таблицу соответствия. Она имеет примерно такую форму.

Неисправ- ности \ Симптом	Симптомы				
	$x$	$y$	$z$	$\dots$	$v$
$w_1$	1	0	0		0
$w_2$	0	1	1		0
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$w_n$	1	0	1		1

Каждая строчка таблицы соответствует определенному состоянию машины, а столбец — симптому. На пересечении строки и столбца ставится 1, если данный симптом соответствует состоянию, в противном случае ставится 0. Каждая строка представляет собой число, записанное в двоичной системе, которое можно считать шифром данного состояния.

При составлении таблицы могут встретиться такие случаи: 1) каждому состоянию соответствует своя, отличная от других комбинация нулей и единиц; 2) в двух или более строках встречаются одинаковые комбинации; 3) в одном или нескольких столбцах стоят только 1 и 0. Первый случай соответствует правильно сформулированной задаче диагностики, когда система симптомов однозначно описывает каждое возможное состояние машины. Во втором случае набор симптомов недостаточен, и однозначное опознание каждого состояния невозможно. В третьем случае некоторые симптомы не меняются при изменении состояния машины, т. е. они не содержат никакой диагностической информации, и их нужно исключить из перечня симптомов.

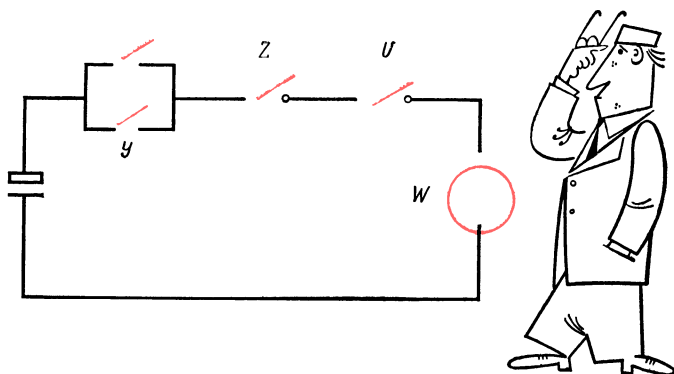
Логические операции легко могут быть реализованы с помощью электрических и электронных схем. Электронные вычислительные машины и представляют собой систему элементов, каждый из которых может выполнять одно из логических действий. Логические переменные,

принимающие всего два значения — 1 или 0, соответствуют двум состояниям двухпозиционного переключателя (включен — выключен). Простейшее диагностическое устройство, основанное на использовании правил математической логики и предназначенное для обеспечения объективности диагностического заключения, было разработано несколько лет назад в СибИМЭ.

На верхней панели устройства размещены 26 тумблеров (двухпозиционных переключателей) и 30 прозрачных табличек с указанием неисправностей, которые встречаются в гидросистеме трактора. Под каждой табличкой имеется электрическая лампочка. У каждого тумблера обозначен симптом, т. е. внешний признак работы гидросистемы, свидетельствующий о неисправности. В зависимости от симптомов, обнаруженных у обследуемого агрегата, механик включает те или иные тумблеры. Горящая лампочка указывает на неисправность, соответствующую комбинации обнаруженных симптомов. Основу прибора составляет диодная матрица — дешифратор, в которой закомутированы связи симптомов с неисправностями.

Рассмотрим одну какую-либо неисправность и покажем, как она обнаруживается логическим устройством. Пусть это будет поломка крестовины запорного клапана гидросистемы. Этой неисправности соответствуют следующие симптомы:  $x$  — навесное орудие не поднимается,  $y$  — поднятое орудие нельзя опустить. Кроме того, наблюдаются еще такие признаки:  $z$  — рукоятка распределителя самопроизвольно возвращается в нейтральное положение;  $v$  — при попытке удержать рукоятку рукой срабатывает предохранительный клапан.

Поломку крестовины мы видеть не можем, а движение навесного орудия при включении гидросистемы происходит на наших глазах. То же самое можно сказать и о других внешних признаках, поэтому они и называются симптомами. Но даже в случае одной неисправности четыре ее симптома запоминаются не сразу. Ситуация значительно усложняется, когда приходится иметь дело с тридцатью



*Рис. 21. Схема для обнаружения поломки крестовины запорного клапана гидросистемы.*

неисправностями, причем одни и те же симптомы могут относиться к различным неисправностям, различаются лишь их комбинации. Логическое устройство и предназначено, чтобы облегчить анализ симптомов.

Для указанной выше неисправности и ее симптомов можно написать логическое соотношение

$$(x \vee y) \wedge z \wedge v = w.$$

и смоделировать его электрической схемой. Лампочка загорится и укажет на неисправность только в том случае, если будут включены тумблеры симптомов  $x$  или  $y$  или оба одновременно, а кроме того, тумблеры  $z$  и  $v$ . В противном случае лампочка гореть не будет, что означает отсутствие в гидросистеме указанной неисправности.

Логическое устройство, описанное выше, в некоторой степени имитирует процесс постановки диагноза опытным механиком. А поскольку его проектировали специалисты, хорошо представляющие связь симптомов с неисправностями, то возможность логической ошибки при анализе симптомов здесь сведена к нулю. И вместе с тем это уст-

ройство не гарантирует от ошибок в диагнозе, поскольку обнаружение симптомов возложено на органы чувств оператора, а их острота и объективность неоспоримы.

Более совершенную систему разработали американские специалисты. Она предназначена для диагностики неисправностей силового агрегата танка (двигателя, трансмиссии, системы охлаждения). Основу системы составляет универсальная электронная вычислительная машина, которая анализирует симптомы и указывает на неисправность в обследуемом объекте. Но задача обнаружения симптомов и их оценки здесь возложена не на человека, а на специальные датчики, которых в системе более 60. Перед обследованием танка датчики устанавливают в различных точках машины, а их сигналы через усилители и специальные преобразователи подаются непосредственно в вычислительное устройство, которое их тщательно анализирует. Анализ проводится по правилам математической логики, для чего в память вычислительной машины заранее вводится таблица соответствия неисправностей различным комбинациям симптомов, вроде той, что приведена на странице 81. Конечно, возможности вычислительной машины значительно шире простого логического устройства, поэтому в ее задачу, кроме анализа симптомов, входит также управление режимом обследуемого двигателя. Диагноз проводится на нескольких скоростных и нагрузочных режимах, затем результаты автоматически сопоставляются и, если в них нет противоречий, вычислительная машина печатает диагноз двигателя на специальной карточке. Кроме выявленных неисправностей, в ней также приводится инструкция по ремонту и указываются номера деталей, подлежащие замене.

По чувствительности и объективности датчики, конечно, превосходят органы чувств человека. Но почему их так много в американской системе? Дело в том, что танковый двигатель — очень сложный механизм, состоящий из большого числа деталей, и каждая из них может оказаться неисправной. Все датчики нужны для того, чтобы

получить о двигателе как можно больше информации. Здесь учитывается основной закон диагностики, о котором мы расскажем дальше и который требует согласования количества информации, содержащейся в симптомах, с величиной неопределенности состояния машины. Чаще всего этот закон выступает в виде требования, чтобы число независимых параметров используемого диагностического сигнала было не меньше числа параметров, которыми определяется состояние машины.

Каждый датчик американской системы диагностики выдает один параметр сигнала, например среднюю температуру охлаждающей жидкости, или среднее давление в системе смазки, или среднюю скорость поступления воздуха в карбюратор и т. д. Так много датчиков потребовалось для того, чтобы получить нужное число параметров сигнала, которых должно быть не меньше числа параметров, определяющих состояние танкового двигателя. Известны системы диагностики, используемые в авиации, которые насчитывают сотни датчиков.

Но неужели использование многих десятков или даже сотен датчиков для диагностирования более или менее сложной машины неизбежно? Ведь такая перспектива будет мало отличаться от того, что мы говорили о гряде диагностических приспособлений, каждое из которых используется для обследования только одного элемента машины.

### **Основной закон диагностики**

Несовершенство органов чувств человека, его склонность нарушать законы логики при рассуждении давно беспокоят специалистов по диагностике и заставляют их делать попытки заменить человека чуткими и беспристрастными приборами. «Слухачи» были выбраны первыми для такой замены, поскольку прослушивание машины — основная диагностическая операция и в условиях эксплуатации, и при заводском контроле готовых изделий.

Машины во время работы всегда шумят, и шум это, как правило, — признак их несовершенства. Неточность изготовления деталей, их износ, погрешности сборки — все приводит к увеличению интенсивности ударных взаимодействий в кинематических парах и как следствие к возрастанию колебаний и шума машины. Замечено: чем больше в машине дефектов, тем выше уровень ее шума. Поэтому идея прибора, который должен прийти на смену «слушачам», напрашивается сама собой. Этот прибор должен показывать интенсивность шума, а его шкала должна быть откалибрована в единицах, которыми измеряют дефекты деталей и кинематических пар.

Прибор для измерения уровня шума изобретать не нужно, он давно существует и называется шумомером. Чем громче шум, тем больше отклоняется стрелка прибора. Вот только откалибровать шкалу шумомера в единицах износа и погрешностей изготовления машины пока никому не удалось. И дело здесь не в отсутствии желающих и не в их пассивности, а в том, что намерение использовать шумомер для диагностики находится в противоречии с законами теории информации. Здесь наблюдается полная аналогия с вечным двигателем, который противоречит физическим законам, а поэтому и не может быть изобретен, несмотря на бесчисленные попытки.

Количество информации, содержащейся в сигнале, предназначенном для устранения неопределенности ситуации, не должно быть меньше, чем величина снимаемой неопределенности. Таков закон. В диагностике неопределенность связана с тем, что неизвестно состояние машины, которое, в свою очередь, определяется состоянием элементов, а их в ней довольно много. Показание же шумомера дает в наше распоряжение всего одно число — уровень шума, т. е. неопределенность состояния машины и количество информации, доставляемой перемещением стрелки шумомера, несоизмеримы. Причиной увеличения шума машины может быть увеличение зазора в подшипнике, разрушение зубьев шестерен, нарушение регули-

ровки клапанов, ранний впрыск топлива, если речь идет о дизеле, и многие другие дефекты деталей. Как узнать причину того, что машина стала шуметь громче? Стрелка шумомера может отклоняться на одинаковую величину и при небольшом износе многих деталей и при одном, но достаточно крупном дефекте.

Анализ показывает, что неудачи, часто постигающие изобретателей новых диагностических приборов, как и в случае с шумомером, объясняются пренебрежением к законам информации. Поэтому естественно возникает вопрос: при каких условиях разрешима задача диагноза? Этот же вопрос можно задать несколько иначе: каким условиям должен удовлетворять диагностический сигнал, чтобы, получив его, можно было однозначно оценить состояние механизма? Исчерпывающий ответ на вопрос об условиях разрешимости диагностической задачи требует привлечения математического аппарата, знакомство с которым не предполагается у читателей этой книги\*. Поэтому ограничимся рассмотрением лишь одного условия и сформулируем его так: если состояние машины определяется  $n$  параметрами, то ее диагностирование возможно лишь в том случае, если число  $m$  независимых параметров в диагностическом сигнале не меньше  $n$ .

В большинстве случаев  $n$  равно числу кинематических пар механизма, так как знание их состояния позволяет принять обоснованное решение о необходимости ремонта, регулировок и других операций по обслуживанию механизма. Так, для диагностики тракторной коробки передач нужно определить значение около 30 параметров состояния ее элементов, а для тракторного дизеля и того больше. Поэтому шумомер, обеспечивающий измерение только одного параметра сигнала, не может помочь при диагнос-

---

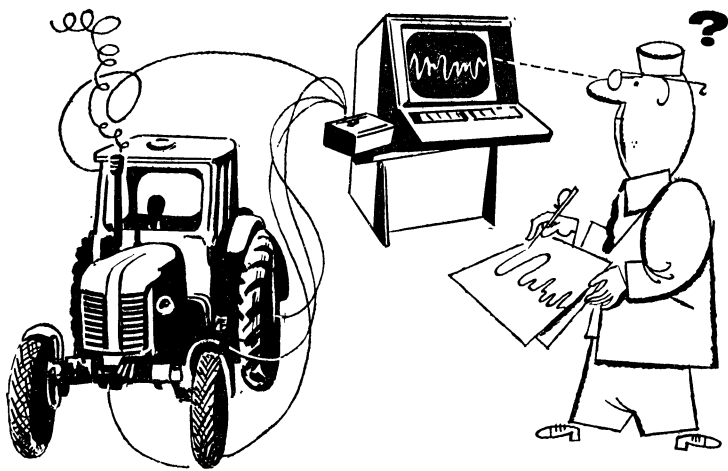
\* Б. В. Павлов Акустическая диагностика механизмов. М., изд. «Машиностроение», 1971.



тировании таких сложных устройств. Где же взять нужное число параметров диагностического сигнала? Об одной возможности мы уже упоминали, когда рассказывали об американской системе диагностики танкового двигателя, — это установка на машину нужного числа датчиков. Каждый датчик, как и шумомер, доставляет всего одно число, характеризующее состояние машины. Но поскольку датчиков много, то снятые с них показания позволяют составить довольно полное представление о состоянии машины. Но это не единственный путь.

Представьте многолюдную площадь и микрофон, улавливающий голоса людей. Микрофон «слышит» все голоса, и если мы его подключим к магнитофону, то на ленте будет запечатлена вся информация, которую сообщают люди на площади. Правда, при проигрывании ленты мы не поймем, о чем они говорили, потому что голоса смешаны. Но это уже другая проблема. Существенно то, что один датчик (микрофон) уловил и доставил нам голос каждого человека и всю информацию, которую сообщали люди на площади, и поэтому, хотя бы в принципе, она может быть расшифрована. Для этого нужно разложить общий шум толпы на голоса отдельных людей.

Машину мы можем представить как шумную толпу народа — это ее кинематические пары. Микрофон или датчик, установленный на корпусе работающей машины, улавливает все звуки, а значит, и всю информацию о взаимодействии деталей и их состоянии. Шумомер действует грубо. И без того смешанные «голоса» он перемешивает еще больше и в результате выдает всего один показатель — уровень шума толпы. А действовать нужно наоборот: воспринятую датчиком смесь звуков следует разложить на «голоса» отдельных кинематических пар, тогда каждый «голос» принесет нам информацию о состоянии, породившей его кинематической пары. В этом корень проблемы акустической диагностики.



## Об акустических методах диагностики

Акустика — наука о звуковых явлениях. Читателю, конечно, известно, что звук — это колебания воздуха. Однако он может распространяться не только в воздухе, но и в жидкости, и в твердых телах. Существенно, что для прохождения звука требуется упругая среда. В отличие от радиоволн он не может распространяться в пустом пространстве.

О среде, по которой передается звук, говорят, что в ней происходит волновой процесс. Звук идет от источника, например от говорящего человека, до приемника (слушателя) в виде волн. Поэтому акустика — это учение о волнах.

Волновые процессы часто встречаются в природе — свет, радиосигналы, землетрясения и т. д. Любой волновой процесс связан с колебаниями. При появлении волн щепка, плавающая в воде, начинает колебаться — она периодически поднимается и опускается. Такие же колебания совершает корабль в океане. Колеблется и датчик, установленный на корпусе механизма при возникновении в механизме волнового процесса. В такт колебаниям он вырабатывает электрический сигнал. Поэтому акустика тесно связана с наукой о колебаниях. Ее можно назвать учением о колебаниях упругой среды.

Чтобы в среде возник волновой процесс, требуется вывести из состояния покоя одну или несколько ее точек — создать возмущение. Но не всякое движение вызывает волновой процесс. Если мы быстро сблизим ладони, то услышим хлопок, что свидетельствует о возбуждении волн в воздухе. Но если сведем ладони медленно, то хлопка не услышим — волны не появились. Падение камня в воду вызывает волны, а медленное его опускание — нет. Удар молотка по рельсу заставляет последний колебаться, но если мы просто надавим молотком на рельс, хотя и очень сильно, колебаний не будет. Данный пример имеет прямое отношение к диагностике. Используемые там сигналы своим рождением обязаны соударению деталей. Информация, которую они приносят, — это сведения об ударах деталей одна о другую.

Итак, мы наметили ряд вопросов, которые рассмотрим в этой главе. Речь пойдет о волнах, распространяющихся в материале машины. Они возбуждаются ударами деталей, соединенных в кинематические пары, и служат сигналами, переносящими информацию из недр механизма к диагностической аппаратуре, находящейся снаружи. Приемником волн служит датчик колебаний, устанавливаемый обычно на корпусе машины. Когда волны проходят мимо датчика, он, как поплавочный рыбак, колеблется вместе с поверхностью среды и вырабатывает электрический сигнал, повторяющий эти колебания.

Когда говорят об акустике, то прежде всего имеют в виду звуковые волны, распространяющиеся в воздухе. Поэтому может возникнуть вопрос: почему сигнал в акустической диагностике регистрируется датчиком колебаний, устанавливаемом на машину, а не микрофоном?

Соударения деталей действительно находят отражение в шуме машины. Именно его ловят «слухачи». Поэтому сигнал, принятый микрофоном, содержит информацию о состоянии машины, но эта информация будет из «вторых рук», а значит, менее надежна и достоверна. Шум, который мы слышим, — это вторичный эффект соударения деталей. Вначале колебания возбуждаются в самом механизме, а уже затем этими колебаниями возбуждаются волны в воздухе. Кроме того, звуковой сигнал в воздухе — очень «капризный» переносчик информации. Его форма существенно зависит не только от колебаний механизма, которыми он возбуждается, но и от находящихся вблизи предметов. Стена сарая или дерево, около которых стоит трактор, могут до неузнаваемости изменить его шум. Вот почему в акустической диагностике предпочтение отдают датчику колебаний, а не микрофону. Даже при обычном прослушивании машины механик часто вооружается стетоскопом вроде медицинского. Иногда его заменяют простой палочкой: один конец ее приставляют к машине, а другой берут в зубы. Стетоскоп и палочка позволяют воспринимать колебания, которые распространяются в самом механизме, а не те, что возбуждаются им в воздухе.

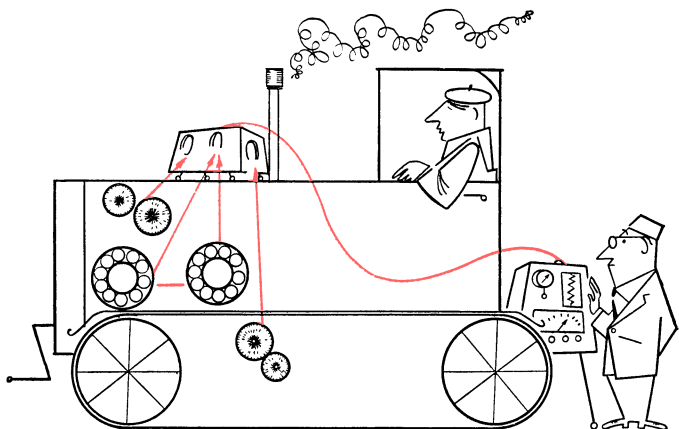
Методы акустической диагностики обладают рядом преимуществ перед другими методами. Во-первых, они позволяют получить о состоянии машины наиболее полные сведения. Акустический сигнал порождается силовыми взаимодействиями деталей. Но скорость их износа и разрушения также определяется этими взаимодействиями. Таким образом, акустический сигнал машины и ее разрушение — два параллельно протекающих процесса, вызванные одной и той же причиной. А, заботясь о диаг-

ностике, мы прежде всего стремимся овладеть способом оценки скорости износа и разрушения деталей, чтобы иметь возможность предсказывать аварии и назначать машине тот ремонт и обслуживание, в которых она нуждается в данный момент. Следовательно, поняв, о чем шумит машина, мы получим сведения о ее состоянии из «первых рук». Такую информацию о состоянии деталей, которая содержится в акустическом сигнале, нельзя получить, даже если разобрать машину на части и измерить каждую деталь. Свойства деталей наиболее полно проявляются в процессе их взаимодействия, а о детали, вынутой из механизма, не всегда можно сказать с полной определенностью, насколько она хороша или плоха. Машиностроителям и ремонтникам, например, давно известно, что работоспособность одной шестерни существенно зависит от успешного подбора другой шестерни.

Малое число используемых датчиков — второе преимущество акустической диагностики. Акустический сигнал отличается большой информационной емкостью, поэтому он один способен доставить информацию о состоянии всех кинематических пар механизма.

И, наконец, третье преимущество акустической диагностики — быстродействие приборов.

В основе теории акустической диагностики лежит почти тривиальная идея о представлении механизма в виде многоканальной системы связи. На ее входе кинематические пары генерируют сигналы, несущие сведения о их состоянии. Сигналы поступают в материал механизма и в форме упругих волн приходят к датчику колебаний, который превращает их в электрический сигнал и направляет его в диагностическую аппаратуру. Задача последней заключается в том, чтобы сначала разделить поступивший сигнал на составляющие, каждая из которых принадлежит только одной кинематической паре, а затем расшифровать их. Мы уже говорили, что первая задача значительно сложнее второй, поэтому основной нашей заботой будет выявление различий в сигналах, генерируе-



*Рис. 22. Механизм — многоканальная система связи.*

мых разными кинематическими парами. Для этого рассмотрим, как передается информация о состоянии кинематической пары изнутри механизма к датчику, установленному на его корпусе.

### **«Паразитные» степени свободы механизма**

Износ и разрушение деталей всегда уменьшает упорядоченность, заложенную в механизм конструктором. Помимо запроектированных движений, детали начинают совершать большое число непредусмотренных. Вал, закрепленный в подшипниках с зазором, помимо собственного вращения, еще и процессирует (блуждает). Погрешности зацепления нарушают равномерное вращение шестерен, у них появляется колебательная составляющая скорости поворота.

Дефекты деталей и кинематических пар создают в механизме дополнительные степени свободы. Их называют

«паразитными». Движение деталей по «паразитным» степеням свободы носит колебательный характер. Но это несколько необычные колебания. Каждый их период распадается на два этапа, соответствующих медленным и быстрым изменениям положения детали. Например, поршень при движении в цилиндре двигателя на всем протяжении своего пути прижат к одной стороне цилиндра. Только достигнув верхней или нижней мертвой точки, он резко перемещается в горизонтальном направлении к противоположной стороне цилиндра. Это происходит из-за мгновенной смены направления горизонтальной составляющей реакции шатуна. Подобные колебания называются релаксационными, или разрывными, и они характерны для движения деталей по «паразитным» степеням свободы.

Чтобы лучше понять механизм релаксационных колебаний, рассмотрим движение вала в подшипнике качения с зазором. На рисунке 23 изображены два харак-

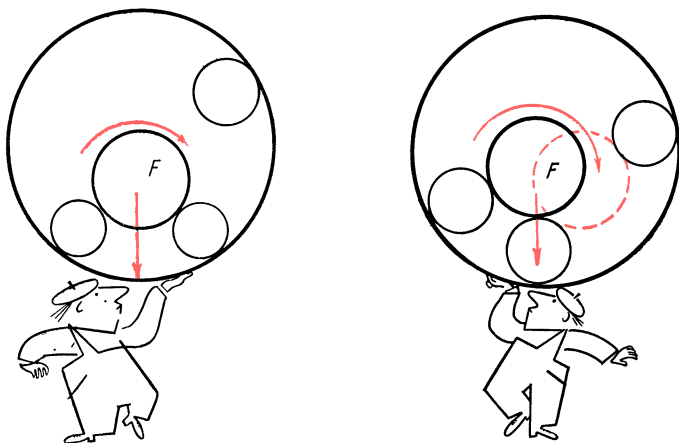
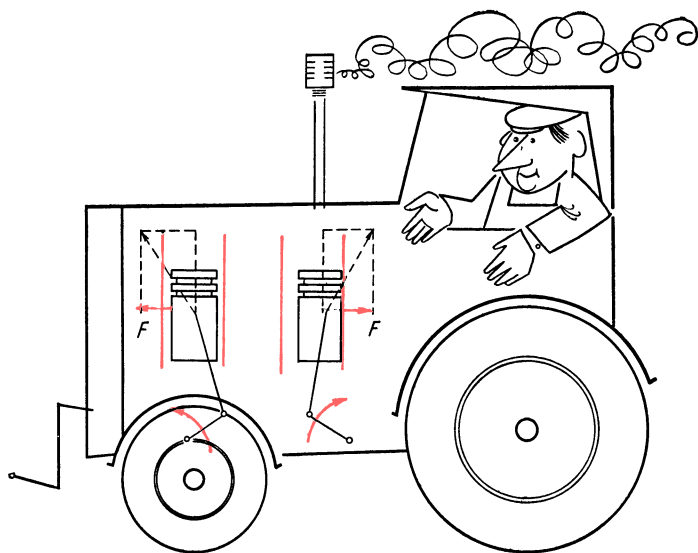


Рис. 23. Движение вала в подшипнике качения.



*Рис. 24. Когда поршень двигателя проходит верхнюю (нижнюю) мертвую точку, составляющая  $F$  реакции шатуна меняет направление, в результате происходит перекадка поршня, сопровождающаяся ударом его о гильзу.*

терных положения вала, которые он занимает во время вращения: самое низкое (слева) и самое высокое (справа). В первом случае вал опирается на два шарика, поэтому его положение устойчиво. Вращаясь, вал вращает шарики и въезжает на них, как на колесах, вверх по беговой дорожке наружного кольца подшипника. На подъем вала требуется затратить энергию. Она поступает от источника, вращающего вал.

Подъем происходит сравнительно медленно и продолжается до тех пор, пока центр одного из шариков не пересечет линии действия радиальной силы (правый рисунок). В этот момент положение вала, опирающегося на одну



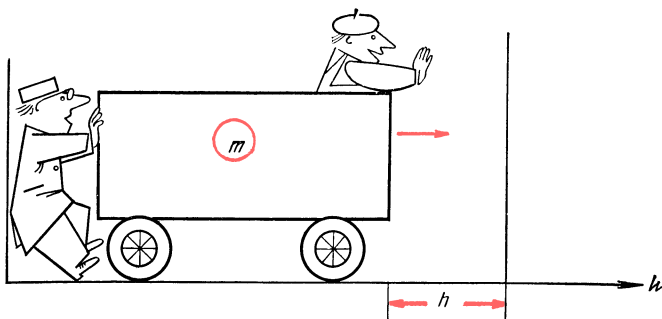
точку, становится неустойчивым, и он самопроизвольно опрокидывается. Накопленная валом во время подъема потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию его падения. Высота падения вала, а значит, и сила его удара зависят от величины радиального зазора. Частота ударов равна частоте пересечения шариками линии действия радиальной силы. Она зависит от размеров элементов подшипника, числа шариков и скорости вращения вала. От состояния подшипника частота ударов не зависит, поэтому она может служить признаком для опознавания кинематической пары, возбуждавшей колебания в механизме. Процесс падения заканчивается ударом о следующий шарик. Кинетическая энергия удара расходуется на разрушение подшипника, его нагрев и на возбуждение в механизме упругих волн.

Релаксационные колебания, как и любые другие, характеризуются периодом, амплитудой (размахом) и начальной фазой. Период движения детали по «паразитной» степени свободы зависит от конструкции кинематической пары и скоростного режима механизма. Так, период опрокидывания вала равен времени между двумя очередными пересечениями линии действия радиальной силы центром шарика. Это время определяется радиусом шариков  $a$ , их количеством в подшипнике, радиусом внутреннего кольца  $R$  и частотой вращения вала  $n$ :

$$T = \frac{120 (R + a)}{RNn}.$$

Для других кинематических пар период движения детали по «паразитной» степени свободы, а значит, и период ударов будут другими. Они будут разными и у подшипников, сидящих на валах, вращающихся с различной скоростью.

Мы установили один из признаков, которым отличаются соударения деталей в разных кинематических парах, — это период следования ударов. Второй признак удобно рассмотреть на примере перекладки поршня. Это



*Рис. 25. В момент потери равновесия деталь массой  $m$  перемещается под действием силы  $F$  по «паразитной» степени свободы до столкновения с другой деталью. Скорость столкновения и время на прохождение зазора зависят от состояния кинематической пары.*

событие всегда начинается в верхней и нижней мертвых точках, когда шатун находится в вертикальном положении и его реакция на поршень меняет направление. У других кинематических пар двигателя (подшипники, клапаны, распылитель форсунки и т. д.) соударение деталей приходится на другие моменты времени. Таким образом, удары в кинематических парах различаются моментами, в которые происходят эти события.

Теперь рассмотрим, к каким эффектам приводит изменение состояния кинематической пары. Приступая к изучению сложных явлений, полезно начать с простых вещей, которые могут быть осмыслены до конца. Теория механизмов, в которой изучаются идеальные системы (обычно с одной степенью свободы), является довольно трудной для изучения научной дисциплиной. Теория реальных устройств неизмеримо труднее, поэтому ее пока не существует. Разрабатываются только отдельные фрагменты такой теории, освещающие те или иные частные явления, происходящие в механизмах, структура которых имеет отклонения от идеального образца. Но развитие

методов акустической диагностики связано прежде всего с пониманием динамики движения «неидеального» механизма, с изучением процесса соударения деталей, с раскрытием закономерностей возбуждения и распространения в механизме упругих волн.

Для изучения реальных явлений обычно конструируют их упрощенные модели. Это общий методический прием науки. Объектом изучения сейчас является для нас движение детали по «паразитной» степени свободы после потери ею равновесия (падение вала в подшипнике, перекладка поршня и т. д.). Примем следующие допущения: сила  $F$ , действующая на деталь в это время, постоянна, трение отсутствует.

Работа силы  $F$ , затраченная на перемещение детали по «паразитной» степени свободы, равна произведению силы на путь  $Fh$ . Она расходуется на увеличение кинетической энергии детали. В момент соударения деталей кинетическая энергия равна работе силы

$$\frac{mv_0^2}{2} = Fh.$$

Отсюда скорость удара равна

$$v_0 = \sqrt{\frac{2Fh}{m}}.$$

Мы видим, что чем больше сила, действующая на деталь, и чем больше перемещение деталей, тем больше скорость соударения. Ниже будет показано, что амплитуда акустического сигнала пропорциональна скорости соударения деталей, поэтому амплитуда сигнала зависит от тех же переменных, что и скорость соударения.

Величина силы  $F$ , приводящей деталь в движение, зависит от скоростного и нагрузочного режимов механизма, которые во время диагностирования имеют определенное значение. Более существенна для нас зависимость скорости соударения деталей, а значит, и амплитуды сигнала

от величины перемещения детали по «паразитной» степени свободы. Это перемещение определяется состоянием кинематической пары. Для сочленения «поршень — гильза» оно равно зазору. В других случаях при перемещении детали зазор полностью не выбирается, но всегда перемещение зависит от его величины. Так, в случае подшипника качения перемещение вала  $h$  по направлению действия радиальной силы  $F$  и радиальный зазор подшипника  $h_0$  связаны соотношением

$$h = \frac{h_0^2}{2(R+a)} \sin^2 \frac{\pi}{N},$$

где  $R$  — радиус внутреннего кольца подшипника;

$a$  — радиус шарика;

$N$  — число шариков в подшипнике.

Подставляя это выражение в формулу для  $v_0$ , найдем:

$$v_0 = h_0 \sqrt{\frac{F}{R+a}} \sin \frac{\pi}{N},$$

т. е. скорость удара в подшипнике, а значит, и амплитуда сигнала пропорциональны радиальному зазору.

Второй эффект, к которому приводит изменение зазора, проявляется в запаздывании удара. Время, которое требуется детали на прохождение «паразитной» степени свободы, равно:

$$t_0 = \sqrt{\frac{mh}{2F}}.$$

Поэтому, измерив запаздывание удара, можно оценить состояние кинематической пары. Скажем, при зазоре между поршнем и гильзой, равном 0,5 мм, коленчатый вал двигателя ДТ-54 успевает повернуться на  $12^\circ$  от верхней мертвой точки и на  $34^\circ$  от нижней мертвой точки, прежде чем произойдет удар поршня о гильзу.

В элементарной механике удар упругих тел считается мгновенным событием. В действительности этот процесс длится определенное время. Продолжительность соударения деталей в большинстве кинематических пар составляет десятитысячные и даже стотысячные доли секунды. Но в акустической диагностике пренебрегать длительностью удара нельзя, поскольку она является одним из трех основных признаков, которыми отличаются удары в различных кинематических парах. Первые два признака: период следования ударов и момент времени удара мы уже указали выше. Сейчас рассмотрим третий признак.

Теорию соударения упругих тел разработал в конце прошлого века знаменитый физик Г. Герц. Развитие событий во время соударения деталей можно представить следующим образом. В первый момент после соприкосновения столкнувшиеся детали продолжают двигаться навстречу друг другу. Перед ударом они обладали кинетической энергией и теперь расходуют ее на сжатие материала. По мере возрастания сжатия растут силы давления между деталями, кроме того, увеличивается площадь контакта — поверхности деталей сплющиваются. Все это приводит к замедлению движения деталей, а затем силы упругости, вызванные деформацией, заставляют их разойтись в противоположные стороны. Металлические детали механизма обладают значительной жесткостью, поэтому область их контакта и деформация сжатия малы, а значит, столкновение длится очень малое время. В результате между деталями возникают огромные силы, иначе они не могли бы изменить направление их движения за такое короткое время.

Соударения деталей характеризуются не только малой длительностью, огромными силами взаимодействия, но и очень большими градиентами (перепадами) напряжений. В малой области контакта давление меняется от десятков тонн на квадратный сантиметр до нуля. В связи

с этим можно указать несколько широко распространенных видов износа, которые непосредственно вызываются соударениями в кинематических парах: отслаивание металла в зоне контакта, питтинг и некоторые другие.

Контактные явления соударения деталей являются существенными и еще полностью не оцененными факторами, определяющими надежность и долговечность механических устройств.

С точки зрения диагностики важнейшим параметром соударения деталей является его длительность. Существенно, что для различных кинематических пар она неодинакова. Это должно быть понятно. Массы деталей, геометрия их поверхностей, иногда их материал у различных кинематических пар неодинаковы, а именно: от этих факторов прежде всего зависит длительность соударения деталей. Поэтому по длительности мы можем узнавать, в какой из кинематических пар механизма произошел удар. Теперь весь вопрос в том, как измерить длительность соударения деталей. Во-первых, она очень мала и нужны довольно точные приборы для измерения. Но главное не это. Датчик, установленный на корпусе механизма, воспринимает не соударение деталей, а только их результат в виде упругих волн. Как отражается длительность удара деталей в характере возбужденных им колебаний механизма? Чтобы разобраться в этом вопросе, надо знать, как возникает в механизме волновой процесс.

### **Модуляция акустического сигнала**

Распространение волн в среде связано с колебанием ее частиц, поэтому напомним некоторые свойства колебательного движения. Это удобно сделать на примере простейшей колебательной системы — грузика с прикрепленными к нему двумя пружинами.

В положении равновесия на грузик с противоположных сторон действуют одинаковые силы, направленные в разные стороны. Если грузик сместить из этого поло-

жения, то давление на него одной пружины увеличится, а другой ослабнет. В результате силы будут стремиться вернуть грузик в положение равновесия. Но если его отпустить, то он не остановится в положении равновесия, а по инерции проскочит эту точку и отклонится в другую сторону. Тогда равновесие нарушится в другом положении грузика и возникнут колебания.

Колебания, которые начнет совершать грузик, выведенный из положения равновесия, называются синусоидальными, или гармоническими, а система, способная совершать такие колебания, — гармоническим осциллятором. Рассмотрение свойств осциллятора играет большую роль в учении о колебаниях. Это связано с тем, что движение любой сложной системы можно представить как колебания определенного набора гармонических осцилляторов. В акустической диагностике моделью механизма служит набор осцилляторов, а акустический сигнал рассматривается как сумма их колебаний.

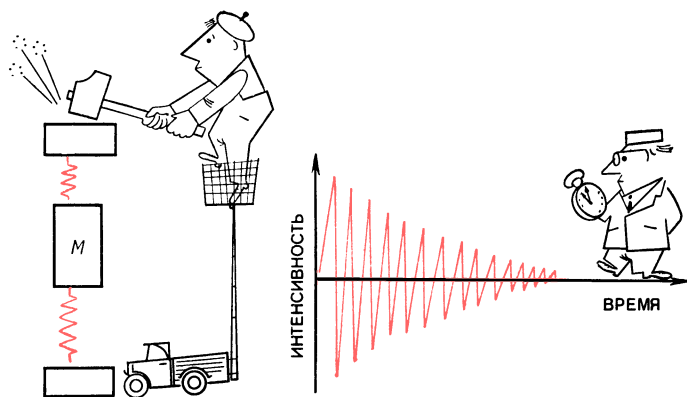
Мы начнем изучение колебаний механизма, считая его простым гармоническим осциллятором. Рассмотрим его движение после возбуждения ударом деталей. Колебание осциллятора после удара будет происходить по закону синусоиды:

$$S(t) = S \sin \omega t.$$

Здесь  $S$  обозначает амплитуду (размах) колебаний,  $\omega$  — их частоту.

Теория колебаний доказывает, что частота колебаний осциллятора при возбуждении его ударом не зависит от характера удара, а целиком определяется свойствами осциллятора: массой грузика и жесткостью пружин. Поэтому она называется собственной частотой осциллятора. Амплитуда колебаний, очевидно, зависит от интенсивности удара: чем он сильнее, тем больше размах колебаний.

Интенсивность удара в механике оценивают величиной импульса силы  $mv_0$ . В нашем случае  $m$  равно приведенной



*Рис. 26. Первоначальная амплитуда колебаний осциллятора после удара зависит от интенсивности удара, а скорость ее уменьшения — от величины коэффициента затухания.*

массе сталкивающихся деталей, а  $v_0$  — скорости их соударения.

Амплитуда колебаний осциллятора определяется следующей формулой:

$$S = \frac{mv_0}{\mu\omega},$$

где  $\mu$  — масса грузика осциллятора.

Мы показали раньше, что скорость соударения деталей зависит от состояния кинематической пары, например от зазора в ней. Поэтому амплитуда осциллятора будет зависеть от состояния пары, возбудившей его колебания. Измеряя амплитуду сигнала, можно оценить состояние пары.

При рассмотрении движения осциллятора мы допустили неточность, пренебрегая трением. Поэтому приведенная выше формула колебаний представляет дело так, как будто после удара осциллятор продолжает со-



вершать синусоидальные колебания вечно. В действительности же всякое колебание со временем затухает. Чтобы отразить этот факт, в формулу синусоиды нужно ввести дополнительный множитель  $e^{-\delta t}$  и записать ее в следующем виде:

$$\tilde{s}(t) = Se^{-\delta t} \sin \omega t,$$

где  $\delta$  — коэффициент затухания. Чем больше его величина, тем быстрее уменьшается амплитуда колебаний от одного размаха к другому.

Необходимо ввести еще одно уточнение. Дело в том, что удары в кинематических парах во время работы механизма повторяются. Поэтому посмотрим, как движется осциллятор при воздействии на него не одним, а серией повторяющихся ударов. Будем считать, что соударения в кинематической паре происходят редко, т. е. между двумя ударами осциллятор успевает совершить большое число колебаний. Именно этот случай наблюдается в механизмах, где частота колебаний осциллятора равна нескольким тысячам герц, а удары деталей происходят с частотой в несколько десятков герц.

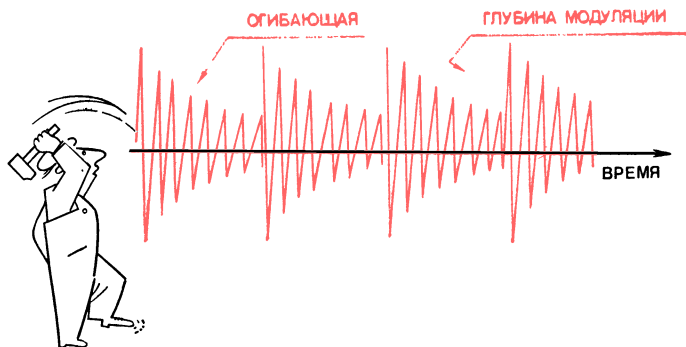


Рис. 27. Колебания осциллятора при возбуждении его серией ударов.

Колебания осциллятора при периодическом воздействии ударов будут иметь характерный вид, изображенный на рисунке. Непосредственно после удара их амплитуда имеет наибольшую величину, но затем она постепенно уменьшается и принимает наименьшее значение в момент, предшествующий очередному удару. Колебание с изменяющейся амплитудой называют модулированным, а изменение амплитуды — огибающей. Информация об ударах, а значит, и о состоянии кинематической пары содержится только в огибающей сигнала. Здесь положение точно такое же, как в радиотехнике. Высокочастотное синусоидальное колебание (несущая) там служит только признаком действия радиостанции, который позволяет настроиться на ее волну. Вся же информация (речь диктора, музыка) заключена в огибающей радиосигнала. Поэтому, прежде чем подать радиосигнал в репродуктор, его детектируют. Эта операция состоит в том, что огибающую сигнала отделяют от несущей. В диагностике сигнал, полученный датчиком, также пропускают через детектор и диагноз кинематической пары ставят на основании изменения параметров огибающей.

При прочих равных условиях точность любого измерения тем выше, чем сильнее сигнал. Интенсивность огибающей зависит от разности максимальной и минимальной амплитуд колебаний ( $A_{\max} - A_{\min}$ ). Для характеристики огибающей вводится специальный показатель — коэффициент глубины модуляции  $R$ .

$$R = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max}}.$$

Чем больше глубина модуляции колебаний, тем легче поставить диагноз кинематической пары, которая их возбуждала. Глубина модуляции зависит от частоты следования ударов. Чем реже они происходят, тем на большую величину успевают затухнуть колебания до очередного удара. В свою очередь, частота ударов зависит от скоростного режима механизма. Чем меньше его скорость, тем

реже происходят удары в кинематических парах. Отсюда следует практическая рекомендация производить диагностику механизма на минимально возможном скоростном режиме. Тогда глубина модуляции акустического сигнала будет наибольшей.

Глубина модуляции акустического сигнала зависит также от коэффициента затухания  $\delta$ . Затухание колебаний в механизмах происходит потому, что их энергия расходуется на некоторые другие процессы: на нагрев материала механизма и на излучение колебаний в окружающую среду. Опыт показывает, что затухание колебаний тем больше, чем выше их частота. Поэтому для увеличения глубины модуляции следует выбирать в качестве сигнала колебание того осциллятора, у которого частота наибольшая.

## **Волны**

Под действием сил все тела изменяют свою форму и размеры, деформируются. Если деформация невелика, то после прекращения действия силы форма тела восстанавливается. Предельная сила, после действия которой еще не наблюдается остаточных деформаций, называется пределом упругости. Механизмы проектируют таким образом, чтобы силы, действующие на их детали, не превосходили предела упругости, в противном случае детали очень быстро утратят форму и механизм выйдет из строя.

Деформации, которые наблюдаются в упругих телах, многообразны, но все они могут быть сведены к двум типам: растяжению (сжатию) и сдвигу. Первый тип деформации связан с изменением объема тела. При сжатии объем уменьшается, а при растяжении — увеличивается. При деформации сдвига изменяется только форма тела. Различные сложные виды деформаций (изгиб, кручение и т. д.) представляют собой комбинацию двух основных типов деформаций.

Изменению объема тел препятствуют возникающие в них внутренние силы. Они характеризуются напряжениями. В отличие от газообразных и жидких тел твердые тела сопротивляются не только изменению объема, но и изменению формы. Чем больше деформация тела, тем больше напряжение, препятствующее ее дальнейшему увеличению. В определенном диапазоне изменений силы, возникшие в теле напряжения, пропорциональны его деформации. Такая зависимость напряжения от деформации называется законом Гука.

Мы пока не затронули вопрос о влиянии на деформацию тела и возникающие в нем напряжения скорости изменения силы, полагая, что эти изменения следуют за изменением силы. Но это наблюдается только при медленном действии силы. В действительности деформация передается в теле от точки к точке не мгновенно, а с некоторым запаздыванием, поэтому при быстром действии силы частицы тела не успевают следовать за ее изменением и в теле некоторое время продолжается движение частиц после прекращения действия силы. Это явление служит основой передачи взаимодействий деталей, происходящих внутри механизма, к установленному снаружи датчику. Если бы детали не соударялись, а медленно действовали одна на другую, то результат такого взаимодействия нельзя было бы обнаружить приборами, находящимися вне механизма. Действие одной детали уничтожалось бы равным противодействием со стороны другой. Только благодаря ударам в материал механизма поступает энергия, которая циркулирует по всему механизму, и ее можно измерить приборами.

После удара в упругом теле возникает волновой процесс. Он состоит в том, что появившаяся в некоторой области пространства местная деформация и вызванное ею напряжение материала передаются другим частям тела.

Распространение волн связано с двумя видами движений. Во-первых, каждая точка среды, через которую

проходит волна, совершает колебания относительно положения равновесия. Так движется поплавок рыбака при появлении волн. Во-вторых, волны перемещаются в пространстве. При этом частицы среды не покидают своих положений, а передаются только их колебания. Камень, брошенный в озеро, сначала приведет в движение малую область воды вокруг точки падения, но постепенно волнение будет расходиться, охватывая все большую и большую зону. В связи с этим волновой процесс характеризуется двумя скоростями: колебательной скоростью частиц  $v$  и скоростью распространения волны  $c$ . Колебательная скорость частиц обычно невелика. Так, скорость колебания частиц воздуха при грохоте реактивного самолета составляет всего 0,1 м/с. Скорость распространения звука в воздухе значительно больше — 340 м/с.

Граница между зоной возмущения и зоной покоя, куда волна еще не пришла, называется волновым фронтом. В газах и жидкостях частицы движутся перпендикулярно волновому фронту. Такие волны называются продольными, так как направление движения частиц совпадает с направлением распространения волны. В твердых телах, кроме продольных волн, возможны поперечные, в которых частицы среды движутся вдоль волнового фронта.

В неограниченной однородной среде фронт волны, возбужденной точечным источником, имеет сферическую форму.

Если среда ограничена, то на ее границах происходят сложные процессы преобразования волн: частично они отражаются от границы и начинают распространяться в обратном направлении, частично проходят через границу. После встречи с границей тип волны может измениться — продольная волна может превратиться в поперечную и наоборот. Волны, отраженные от границы, складываются с волнами, распространяющимися в прямом направлении, и картина волнового поля значительно усложняется. Если в некоторую точку одновременно придут гребень одной волны и впадина другой, то эта точка останется в покое.

Если в точке совпадут гребни двух волн (или их впадины), то колебания точки увеличатся. Сложение двух или большего числа волн одинаковой частоты называется интерференцией.

Особенно сложную картину интерференции волн представляют колебания механизма, возникшие в результате соударения деталей. В механизме много границ, от которых отражаются волны, — это границы между его многочисленными деталями. Поэтому теоретически рассчитать и проанализировать волновой процесс в механизме невозможно. Нужно искать обходные пути, облегчающие решение задачи. Одним из таких путей является представление механизма в виде набора гармонических осцилляторов, настроенных на разные частоты (резонансы механизма). Исследование движения осцилляторов — более простая задача, чем исследование волн. Этим представлением мы уже воспользовались при обсуждении вопросов, связанных с модуляцией акустического сигнала.

Второй путь упрощения задачи связан с использованием идей и понятий теории информации. Здесь вместо исследования сложного процесса распространения в механизме упругих волн рассматривается процесс передачи сигнала от кинематической пары к датчику. Физическая проблема при этом отходит на второй план, а ее заменяет чисто формальный вопрос о преобразовании сигнала при следовании по каналу. При этом удастся сравнительно просто объяснить свойства спектра акустического сигнала.

### **Акустический сигнал**

Задача науки — получение новых знаний. Но наука — это не просто знания каких-то фактов, а прежде всего система знаний, которая оформляется в виде теорий. В теории находят отражение количественные соотношения между различными факторами, характеризующими рассматриваемое явление. Но теория — не зеркальное отражение

действительности. Она освещает только те ее стороны, которые с точки зрения решаемой задачи считаются существенными. Упрощая ситуацию, теория позволяет обнажить основные рычаги, движущие развитием событий, сделать прозрачной структуру явления.

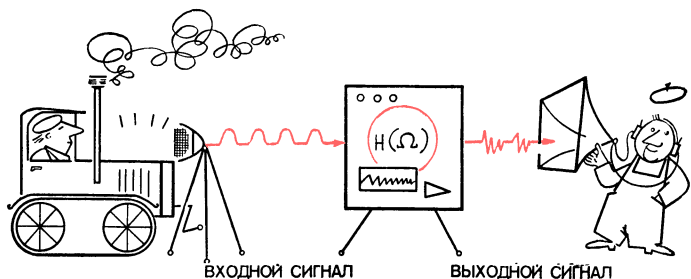
Любая теория строится из трех конструктивных элементов: системы понятий, исходных утверждений и следствий.

Система понятий — это язык, на котором теория описывает явление. В отличие от обыденных слов, значения которых часто многозначны, научным понятиям придается точный смысл.

Наша задача — дать теорию спектра акустического сигнала механизма. Основным понятием будет понятие об акустическом канале механизма. О канале связи как о системе, по которой передаются сигналы, мы уже говорили, поэтому ограничимся только уточнением этого понятия применительно к рассматриваемому кругу вопросов.

Акустическим каналом в механизме будем называть систему, состоящую из кинематической пары, датчика колебаний, установленного на корпусе механизма, и среды, по которой сигнал от кинематической пары передается к датчику. Сигнал, вырабатываемый кинематической парой и представляющий собой последовательность соударений деталей, будем называть входным сигналом, а сигнал, регистрируемый датчиком, — выходным. Наша задача состоит в том, чтобы объяснить форму спектра выходного сигнала. Очевидно, что в механизме насчитывается столько акустических каналов, сколько в нем кинематических пар. Это и позволяет нам считать механизм многоканальной системой связи.

Второй элемент, без которого не обходится ни одна теория, — это исходные утверждения. Они бывают двух видов: допущения и утверждения других теорий. Допущения являются своеобразным и необходимым элементом любой теории. Их своеобразие состоит в том, что они всег-



*Рис. 28. Акустический канал. На вход поступает последовательность импульсов соударения деталей. На выходе датчик регистрирует колебания, возбуждаемые этими импульсами*

да противоречат действительности, но оспаривать их правомочность не имеет смысла до тех пор, пока не будут проверены результаты самой теории, основу которой они составляют. «Будем считать солнце и планеты точками, не имеющими размеров», — говорит астроном, и, пользуясь этим допущением, предсказывает положение планет и солнечные затмения на много лет вперед с точностью до малых долей секунды. «Полезная ложь лучше бесполезной правды» — утверждает народная мудрость, и само существование науки подтверждает это, потому что наука и шага не может ступить, не пользуясь допущениями. Конечно, мы знаем, что и солнце и планеты — не точки, а огромные тела, но если бы мы стали догматически держаться за эту «правду», то никогда не узнали бы законов движения небесных светил.

Основным допущением в теории спектров акустических сигналов служит утверждение о линейности акустического канала. Другими словами, предполагается, что при распространении в механизме упругих волн, возбужденных соударением деталей, материал механизма подчиняется закону Гука: его напряжения пропорциональны возникающим деформациям.



Линейный канал обладает многими замечательными свойствами: сигналы, посылаемые различными парами механизма, проходят по нему независимо один от другого; при прохождении сигнала по каналу в нем никогда не появляются новые частотные составляющие, которых не было у отправленного сигнала; линейный канал не изменяет формы синусоидального сигнала, возможно только увеличение или уменьшение его амплитуды и сдвиг начальной фазы.

Воспользуемся последним свойством линейного канала для вывода основной формулы, которой устанавливается зависимость спектра сигнала, регистрируемого датчиком, от спектра импульса соударения деталей в кинематической паре.

Пусть к детали рассматриваемой кинематической пары приложена переменная сила  $q(t)$ , меняющаяся по закону синусоиды:

$$q(t) = Q \sin \omega t.$$

Мы знаем, что взаимодействие деталей в кинематических парах носит импульсный характер, но любой импульс может быть разложен на гармонические составляющие, образующие его спектр, поэтому рассматриваем сейчас одну гармоническую составляющую спектра импульса.

Датчик, находящийся на корпусе механизма, воспринимает синусоидальный сигнал, поскольку в линейном канале синусоида не меняет формы:

$$\tilde{s}(t) = S \sin(\omega t - \varphi).$$

Отношение амплитуды принятого сигнала к амплитуде отправленного

$$H = \frac{S}{Q}$$

называют коэффициентом усиления канала, так как оно показывает, во сколько раз увеличивается (уменьшается) амплитуда сигнала при передаче его по каналу. Параметр

$\varphi$  характеризует задержку сигнала, т. е. изменение его начальной фазы.

Величины  $H$  и  $\varphi$  зависят в общем случае от частоты  $\omega$  передаваемого сигнала. Синусоиды разной частоты могут усиливаться (ослабляться) в канале по-разному. Функция частоты  $H(\omega)$  называется амплитудной частотной характеристикой канала, а функция  $\varphi(\omega)$  — его фазовой характеристикой. Эти характеристики полностью определяют свойства линейного канала. В дальнейшем фазовая характеристика канала нам не потребуется, поэтому мы будем называть частотной характеристикой канала функцию  $H(\omega)$ , опуская слово амплитудная.

Амплитуда сигнала  $S$ , регистрируемого датчиком, равна произведению амплитуды сигнала, отправляемого

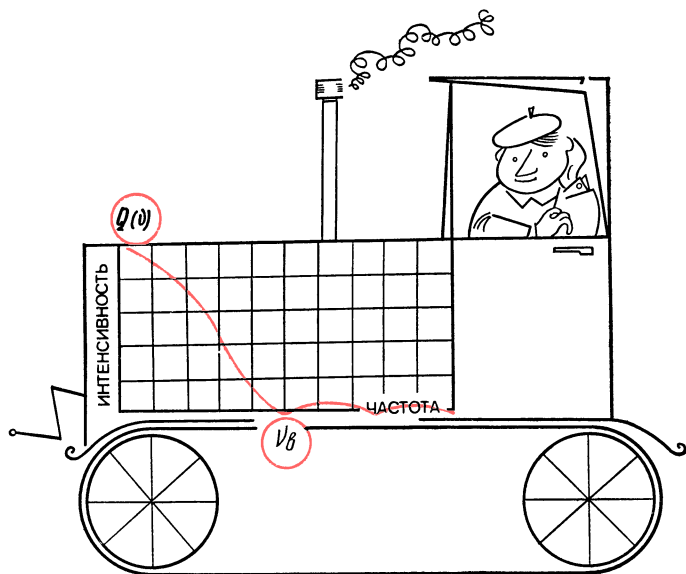


Рис. 29. Спектр импульса соударения деталей.

кинематической парой  $Q$ , на коэффициент усиления канала  $H$ :

$$S = HQ.$$

Спектр импульса соударения деталей  $Q(\omega)$  — это функция, определяющая величину амплитуды составляющей в зависимости от ее частоты. Он показывает, как меняется амплитуда синусоид, входящих в состав импульса, в зависимости от их частоты. На рисунке мы видим, что амплитуды синусоид уменьшаются с ростом частоты и после значения частоты  $\nu_b$  их интенсивность очень мала. Эту частоту можно принять за верхнюю границу спектра импульса, так как импульс не может возбудить существенные колебания в механизме с частотой выше  $\nu_b$ . То же самое можно сказать и о спектре сигнала  $S(\omega)$ , регистрируемого датчиком, — это функция амплитуд составляющих выходного сигнала в зависимости от их частоты. Поэтому приведенную выше формулу можно записать так:

$$S(\omega) = H(\omega) \cdot Q(\omega).$$

Это замечательный результат, позволяющий определить спектр акустического сигнала, если известны спектр соударения деталей и частотная характеристика канала.

Любое явление природы имеет многочисленные связи с другими явлениями, поэтому в его теории всегда используются результаты других теорий. Фундамент теории спектров акустических сигналов составляют теория Герца о соударении упругих тел и теория излучения точечного источника. О теории Герца мы уже упоминали. Она позволяет определить форму и длительность импульса соударения деталей. Согласно этой теории, импульс имеет форму полуволны косинусоиды:

$$q(t) = \frac{3,35mv_0}{\tau} \cos \frac{\pi}{\tau} t.$$

Пользуясь формулами преобразования Фурье, можно найти спектр такого импульса:

$$Q(\omega) = \frac{6,7m\nu_0}{\pi} \times \frac{\cos \frac{\omega\tau}{2}}{\left(1 - \frac{2}{\pi} \frac{\omega\tau}{2}\right)^2}.$$

Теорию излучения точечного источника мы здесь изложить не сможем, поскольку понадобилось бы использовать математический аппарат, знакомство с которым не предполагается у читателя данной книги. Но основной вывод приведем и постараемся пояснить его.

В разделе, посвященном рассмотрению колебаний гармонического осциллятора, было показано, что его амплитуда пропорциональна возмущающему импульсу  $m\nu_0$  и обратно пропорциональна частоте  $\omega$ . Акустический канал мы будем представлять как набор осцилляторов с всевозможными частотами. Поэтому, если на вход канала подать сигнал, амплитуда составляющих которого одинакова, то амплитуда колебаний осцилляторов будет обратно пропорциональна их собственной частоте.

В акустической диагностике используются датчики, которые регистрируют не смещение массы осцилляторов, а их ускорение. Амплитуда смещения массы осциллятора  $S$  и ее ускорение связаны соотношением:

$$j = \omega^2 S.$$

Поэтому если амплитуда смещения массы осцилляторов уменьшается обратно пропорционально их частоте, то ускорение, наоборот, увеличивается пропорционально частоте. Эти рассуждения позволяют нам определить форму частотной характеристики канала, которая показывает, что по мере возрастания частоты составляющих входного сигнала их амплитуда на выходе канала линейно возрастает.

Частотная характеристика акустического канала имеет гребенчатый вид, причем ее зубья (спектральные выбросы) возрастают по мере увеличения частоты. Частотную характеристику реального механизма можно опре-

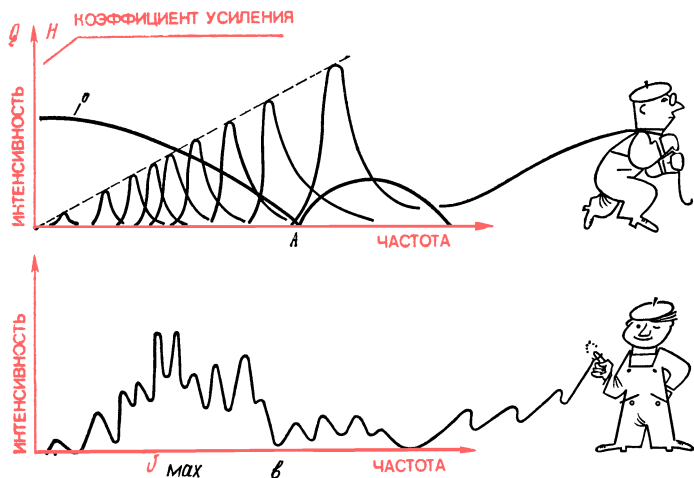


Рис. 30. Перемножение спектра входного сигнала  $Q(\omega)$  на частотную характеристику канала  $H(\omega)$

делить, если по одной из деталей кинематической пары нанести очень короткий удар (дельта — импульс) и снять спектр возбужденных при этом колебаний. Этот спектр и будет частотной характеристикой канала.

Зная спектр входного сигнала  $Q(\omega)$  и частотную характеристику канала  $H(\omega)$  и перемножив их, легко найти спектр сигнала  $S(\omega)$ , регистрируемого датчиком. Знание спектра нам понадобилось для решения двух практических вопросов: для определения верхней границы спектра  $\nu_b$  и для определения частоты  $\nu_{\max}$ , на которую приходится составляющая с максимальной интенсивностью. Зная верхнюю границу спектров акустических сигналов, мы можем более правильно подойти к выбору рабочего частотного диапазона диагностической аппаратуры. Знание частоты, на которую приходится максимальная интенсивность сигнала, генерируемого данной кинематиче-

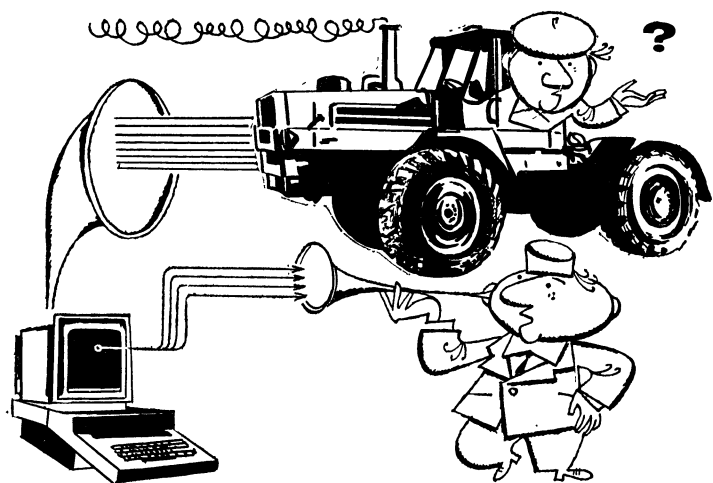
ской парой, позволяет использовать частотную фильтрацию для выделения ее сигнала. Перемножение  $Q(\omega)$  и  $H(\omega)$  дает следующие формулы для  $\nu_B$  и  $\nu_{\max}$ :

$$\nu_B = \frac{1,5}{\tau} \text{ и}$$

$$\nu_{\max} = \frac{0,7}{\tau}.$$

Таким образом, оба параметра спектра зависят от длительности соударения деталей. А поскольку длительность для различных кинематических пар неодинакова, то будут различными и указанные параметры спектров сигналов, генерируемых различными кинематическими парами.

Чтобы закончить рассказ о спектрах, остается указать на одну неточность, которую мы допустили при рассмотрении частотной характеристики механизмов. В упругом теле неограниченных размеров могут возникать колебания любой частоты. Это мы и предполагали, представив акустический канал как набор осцилляторов всевозможных частот. В действительности механизм — упругое тело ограниченных размеров. В таких телах, согласно теории колебаний, могут возбуждаться волны только вполне определенных частот. Поэтому частотные характеристики акустических каналов имеют форму не наклонной прямой линии, а волнообразной кривой, высота гребней которой возрастает с частотой. Ее гребни называют спектральными выбросами или резонансами. Такой вид реальных частотных характеристик несколько усложняет форму спектров сигналов, но не изменяет полученный вывод о зависимости их основных параметров  $\nu_B$  и  $\nu_{\max}$  от длительности удара деталей в кинематической паре.



## Структура системы

Мы установили, что в акустическом сигнале механизма есть признаки, позволяющие разложить его на составляющие, каждая из которых посылается только одной кинематической парой.

Это, во-первых, период следования ударов в различных кинематических парах. Во-вторых, сигналы кинематических пар отличаются временем возникновения ударного импульса — кинематические пары передают свои сигналы по очереди. И, наконец, удары деталей в различных кинематических парах отличаются друг от друга длительностью. Кроме того, составляющие сигнала содержат параметры,

значения которых однозначно связаны с состоянием отправившей их пары. В зависимости от состояния кинематических пар (величина зазоров и погрешностей зацепления) меняется сила соударения деталей, а значит, и интенсивность колебаний, возбужденных ударами. Кроме того, изменение состояния некоторых кинематических пар приводит к изменению времени удара — соударения деталей начинают происходить раньше или позже положенного момента. Это позволяет, измерив параметры сигнала, оценить состояние кинематической пары. Теперь остается только реализовать имеющиеся возможности в конкретной аппаратуре. С точки зрения диагностики механизмы подразделяют на синхронизованные и несинхронизованные. К первому типу относятся двигатели внутреннего сгорания, поршневые компрессоры, плунжерные насосы и другие механизмы, в которых детали работают в строгой последовательности, синхронно.

Так, опускание всасывающего клапана в двигателе предшествует впрыску топлива в цилиндр, а подъем выпускного клапана начинается после впрыска.

Представителями второго вида механизмов являются трансмиссии. В этих механизмах работа одних деталей, а значит, и удары в кинематических парах не имеют четкой взаимной связи между собой по времени. Так, удары в подшипнике качения могут и предшествовать соударениям зубьев в шестеренчатой паре, а могут и запаздывать — никакой зависимости между очередностью ударов в различных кинематических парах здесь нет.

Методы диагностики и аппаратура для этих двух типов механизмов несколько отличаются друг от друга, хотя, конечно, между ними есть много общего.

При диагностике синхронизированных механизмов в качестве основного признака, позволяющего отличать сигналы одних кинематических пар от других, выступает время появления сигнала. Порядок следования импуль-



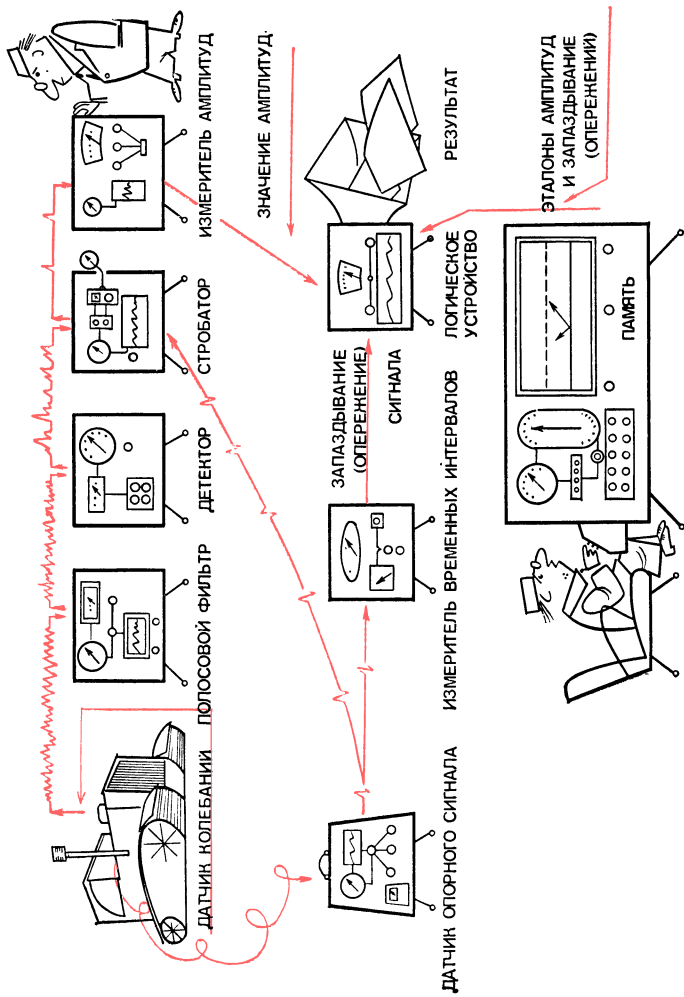


Рис. 31. Блок-схема акустической диагностики.

сов определяется заранее при разработке методов диагностики на основании анализа кинематической схемы механизма.

Важнейшими показателями состояния кинематических пар синхронизованного механизма является величина запаздывания или опережения удара относительно заданного момента, т. е. нарушение синхронности в работе.

Важнейшим признаком для выделения сигналов кинематических пар несинхронизованного механизма служит период следования ударов, а изменение состояния проявляет себя изменением силы удара, а значит, и интенсивности колебаний.

Принципы диагностики мы покажем на примере системы акустической диагностики (САД), разработанной сотрудниками СибИМЭ. Это устройство универсально в том смысле, что с его помощью можно ставить диагноз широкому классу машин. Расскажем, как работают элементы устройства, но прежде дадим общее представление о его структуре.

Любая система акустической диагностики состоит из пяти основных элементов: а) двух датчиков (датчик колебаний и датчик опорного сигнала); б) блока разделения сигнала на составляющие; в) блока измерения параметров сигнала; г) блока управления; д) блока индикации, который позволяет считывать результат диагноза со светового табло или получить его напечатанным на специальном бланке. Наиболее сложным устройством системы диагностики является блок разделения сигнала, в котором сигнал, принятый датчиком от механизма, подвергается многократной фильтрации для очищения от искажающих его помех. Но прежде чем рассказать о его работе, видимо, следует пояснить конечную цель многочисленных манипуляций с акустическим сигналом до разделения его на компоненты, принадлежащие различным кинематическим парам механизма.

Для этого мы в двух словах подведем итоги тому, что

сообщалось в предыдущей главе о рождении акустического сигнала.

Исходным сигналом о состоянии кинематических пар механизма служит последовательность очень коротких импульсов — соударения деталей в кинематических парах механизма. В синхронизированных механизмах импульсы одних пар отличаются от импульсов других пар порядком следования и положением на оси времени. Состояние пар характеризуется амплитудой импульсов и их смещением от запроектированного положения. В несинхронизированных механизмах сигналы различных пар отличаются периодом следования, а сведения о состоянии деталей они несут в амплитуде.

Таким образом, структура исходного сигнала очень проста. Если бы мы могли иметь дело непосредственно с соударениями деталей, то ставить диагноз механизму было бы очень легко, и здесь почти не было бы никаких проблем. Дело усложняется тем, что сами удары деталей, происходящие внутри механизма, нам недоступны. Мы можем с помощью датчиков воспринимать только колебания механизма, возбужденные этими ударами. Эти колебания страшно запутывают картину событий, происходящих в механизме во время его работы. Датчик, установленный на механизме, воспринимает сигнал очень сложной формы, расшифровка которого связана с большими трудностями.

Примерно 50% элементов диагностической аппаратуры занято только тем, чтобы освободить сигнал от высокочастотных колебаний и вернуть ему форму, по возможности близкую исходному сигналу — последовательности простых коротких импульсов. Из этих соображений выбирается датчик для регистрации колебаний; этой цели служит фильтр, который убирает из сигнала низкочастотные колебания, имеющие малую модуляцию; для придания акустическому сигналу формы импульсов он пропускается через детектор.

Существенный элемент диагностической системы — датчик колебаний. От его выбора зависит точность и надежность диагноза. При распространении по механизму упругой волны в каждой его точке происходят изменения состояния материала. Во-первых, частицы механизма смещаются на определенную величину из положения равновесия, во-вторых, они приобретают определенную скорость движения и, в-третьих, перемещаются с определенным ускорением. Существуют датчики, которые способны регистрировать каждый из трех указанных параметров колебательного движения. Их называют датчиком перемещения, датчиком скорости и датчиком ускорения.

Выбор типа датчика для регистрации акустического сигнала — первое мероприятие по очищению сигнала от помех. Дело в том, что колебания механизма во время его работы вызываются многими причинами. Мы сосредоточили внимание на колебаниях, возбуждаемых соударением деталей. Это связано со спецификой задачи диагностики. Но, кроме ударов, механизм заставляют колебаться и другие причины, например неуравновешенность деталей. Если на одном из валов механизма имеется несбалансированная масса, то силы инерции раскачивают механизм как единое целое в такт с движением неуравновешенной массы. Датчик, установленный на корпусе механизма, будет одновременно воспринимать и колебания, возбуждаемые ударами деталей, и его колебания из-за неуравновешенности движущихся масс. Последний вид колебаний следует считать помехой\*, поскольку в

---

\* Понятия «полезный сигнал» и «помеха» относительны. Большая неуравновешенность деталей часто сама является существенным дефектом, и поэтому ее определение может служить целью диагностики. Неуравновешенность механизма оценивают с помощью специальных приборов — виброметров, для которых помехой служат колебания, возбужденные в механизме соударением деталей. Для этого случая остается справедливым все сказанное в данном параграфе.

них не содержится информация о состоянии кинематических пар. Но как очистить полезный сигнал от этой помехи?

Следуя общему правилу, прежде всего выясним, чем различаются оба вида колебаний. Начнем с рассмотрения их частоты. Выше было показано, что частота, на которую приходится максимальная интенсивность колебаний, вызванных соударением деталей, определяется формулой:

$$\nu_{\max} = \frac{0,7}{\tau}.$$

Длительность соударения деталей  $\tau$  имеет порядок 50—200 миллионных долей секунды. Приняв последнее значение длительности удара, найдем, что  $\nu_{\max}$  имеет порядок 3500 герц. А теперь определим, чему равна частота колебаний механизма из-за его неуравновешенности. Пусть вал с несбалансированной массой вращается со скоростью 1500 оборотов в минуту, или 25 оборотов в секунду. Такая скорость, например, у коленчатого вала трактора «Беларусь». Частота колебаний механизма будет равна 25 герцам.

При дисбалансе у некоторых механизмов, например у двигателей, кроме основной частоты, наблюдается также ее вторая гармоника. Частота гармоники для нашего случая равна  $2 \cdot 25 = 50$  герц. Мы видим, что порядок частот у обоих видов колебаний разный.

А теперь вспомним формулу, устанавливающую связь между амплитудами смещения  $S$  и ускорения  $j$ :

$$j = \omega^2 S.$$

Обозначим амплитуды смещения и ускорения, а также частоту колебаний из-за неуравновешенности  $S_1$ ,  $j_1$ ,  $\omega_1$ . Соответствующие величины для колебаний, вызываемых ударами деталей, пусть будут  $S_2$ ,  $j_2$ ,  $\omega_2$ . Если принять, что амплитуды смещения обоих видов колебаний равны ( $S_1 = S_2$ ), то можно определить, во сколько раз колеба-

тельное ускорение, вызываемое соударением деталей, больше ускорения из-за неуравновешенности:

$$\frac{j_2}{j_1} = \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} = \frac{3500^2}{50^2} = 4900 \text{ раз.}$$

Прodelав эти вычисления, видим, как можно воспринимать колебания механизма, возбуждаемые ударами деталей, и практически не воспринимать при этом движение механизма из-за неуравновешенности его частей. Для этого нужно регистрировать колебания механизма датчиком ускорений. И, наоборот, при регистрации колебаний датчиком смещений мы не будем воспринимать результат соударения деталей, а только неуравновешенность механизма.

Сказанное вполне объясняет, почему в акустической диагностике сигнал с механизма всегда снимается датчиком ускорений. Особенно удобны датчики, построенные на использовании пьезоэффекта. Ряд кристаллов (кварц, турмалин, сегнетовая соль) обладает тем свойством, что если вырезанную из них пластинку сжать или, наоборот, растянуть, то на ее поверхности появляется электрический заряд: на одной стороне положительный, на другой — отрицательный. Это явление называют пьезоэффектом («пьезо» по-гречески означает давление). Разность потенциалов, возникшую между сторонами пьезопластины, можно усилить до нужной величины и использовать в качестве акустического сигнала.

В заключение следует сказать несколько слов о монтаже датчика на механизм. Металлические тела—хорошие проводники звука, поэтому удары деталей можно воспринимать в любой точке механизма. Выбор места съема сигнала обычно обуславливается его доступностью, удобством монтажа датчика. Но когда место съема сигнала на механизме выбрано, датчик следует устанавливать с большой точностью. Ошибка в монтаже датчика приводит к ошибке в диагнозе.

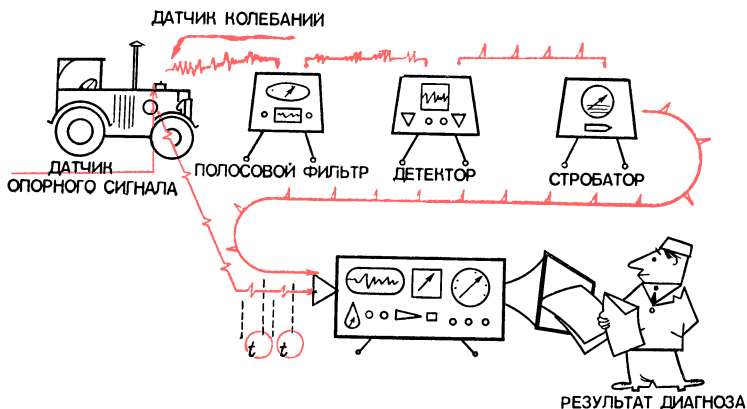
К ошибкам ведет и отклонение оси датчика от принятого направления. Дело в том, что упругие волны в твердых телах обладают определенной поляризацией, т. е. их частицы колеблются в одних направлениях сильнее, чем в других. При монтаже датчика следует также выдерживать определенное усилие его затяжки, потому что оно влияет на акустический сигнал.

## **Полосовой фильтр**

Электрический сигнал на выходе датчика имеет малую величину, и прежде чем подать его в анализирующее устройство, сигнал усиливают. Пьезодатчик требует использования двух усилителей: предусилителя и основного усилителя. Предусилитель устанавливают непосредственно вблизи датчика так, чтобы соединяющий их кабель имел как можно меньшую длину. Это связано с тем, что пьезодатчик работает в электрической схеме как конденсатор. Поэтому для расширения частотного диапазона необходимо, чтобы входное сопротивление усилителя имело как можно большую величину. Оно обычно измеряется миллионами ом. Если пьезодатчик будет соединен с усилителем длинным кабелем, то при большом входном сопротивлении усилителя кабель начнет шунтовать его вход для высокочастотных составляющих сигнала. Длинный кабель обладает большой емкостью и как всякий конденсатор является хорошим проводником для высокочастотных колебаний.

После прохождения предусилителя сигнал может передаваться на большие расстояния, поэтому диагностическую аппаратуру не обязательно располагать вблизи обследуемого механизма.

Чтобы усилить сигнал и в то же время не исказить его форму, усилитель должен обладать равномерной частотной характеристикой, т. е. он должен усиливать все частотные составляющие сигнала в одинаковое число раз. Этому требованию, например, должен удовлетворять пред-



*Рис. 32. Блок-схема прибора для измерения угла опережения впрыска топлива форсункой.*

усилитель. Акустические сигналы механизмов занимают довольно широкий диапазон частот, примерно от 1 тысячи герц до 10—15 тысяч герц. В такой полосе должна быть равномерной частотная характеристика предусилителя.

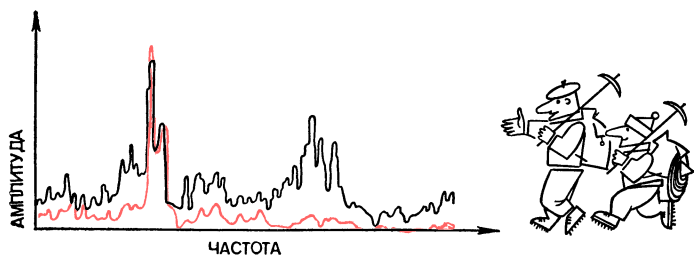
Требования к основному усилителю несколько иные. Мы знаем, что сигнал, генерируемый каждой кинематической парой, имеет свой спектр. Наибольшая интенсивность колебаний, возбуждаемых разными кинематическими парами, приходится на различные частоты. Поэтому, чтобы увеличить сигнал интересующей кинематической пары и в то же время ослабить сигналы от других пар, усилитель должен иметь большой коэффициент усиления для тех частот, которые соответствуют максимуму спектра полезного сигнала, а все остальные колебания ему пропускать не следует. Усилитель должен выполнять роль полосового фильтра. Чтобы более наглядно показать роль частотной фильтрации в акустической диагностике, расскажем о работе прибора, предназначенного для измерения угла опережения впрыска топлива форсункой



дизеля. Несвоевременный впрыск топлива в цилиндр служит частой причиной плохой работы двигателя. В СибИМЭ создан прибор, который позволит измерять опережение (запаздывание) впрыска. Основным элементом прибора служит полосовой фильтр.

Прибор имеет два датчика. Один из них устанавливают на колпачке форсунки. Он должен улавливать удары иглы форсунки при ее подъеме в момент впрыска топлива. Второй датчик устанавливают на картер маховика и в момент прохождения мимо него отверстия, которое высверлено в маховике, датчик выдает импульс. Момент времени появления этого импульса соответствует прохождению поршнем первого цилиндра верхней мертвой точки (в.м.т.). Интервал времени между импульсами, вырабатываемыми обоими датчиками, соответствует величине опережения (запаздывания) впрыска топлива форсункой. Прибор его должен измерить. Но дело усложняется тем, что датчик, установленный на колпачке форсунки, улавливает не только удары иглы, но и удары в других кинематических парах двигателя (перекладку поршней, удары в подшипниках и т. д.). Как сделать так, чтобы датчик принимал только удары иглы форсунки и «не слышал» остальных стуков? Эту задачу полностью решает полосовой фильтр.

На рисунке изображены два спектра колебаний двигателя. Один из них (красная линия) соответствует сигналу, посылаемому всеми кинематическими парами дизеля, за исключением форсунки. Другой спектр (черная линия) принадлежит сигналу, генерируемому ударами всех деталей двигателя, в том числе и иглой форсунки. Спектры занимают неодинаковый диапазон частот. Первый спектр простирается только до частоты 7 тысяч герц. Кинематические пары двигателя не возбуждают колебаний выше этой частоты. Спектр сигнала форсунки лежит в интервале от 0 до 16 тысяч герц. Таким образом, между 7 и 16 тысячами герц колебания вызываются только ударами иглы форсунки. Если после датчика сигнал пропус-



*Рис. 33. Два спектра колебаний двигателя.*

тить через фильтр, который задержит все колебания, лежащие вне полосы от 7 до 16 тысяч герц, то на выходе фильтра останутся только импульсы ударов иглы. Изменение их положения теперь не вызывает затруднений

## Стробатор

После частотной фильтрации сигнал подвергается стробированию. Стробатор можно считать временным фильтром. Он пропускает на выход те части сигнала, которые приходятся на выбранные отрезки времени, соответствующие моментам ударов в обследуемой кинематической паре.

Стробатор имеет два входа. На один подается сигнал, полученный от механизма, а на второй — вспомогательная периодическая последовательность прямоугольных импульсов. Эти импульсы называются стробирующими или просто стробами. В стробаторе сигнал механизма умножается на стробирующие импульсы. В результате участки сигнала, которые совпадут со стробами, пройдут без искажений на выход. Та же часть сигнала, которая совпадет с паузой между стробами, при умножении (на ноль) исчезнет. Работа стробатора синхронизируется опорным сигналом. При переходе от диагностирования одной кинематической пары к другой положение стробирующих импульсов меняется. При стробировании сигнала

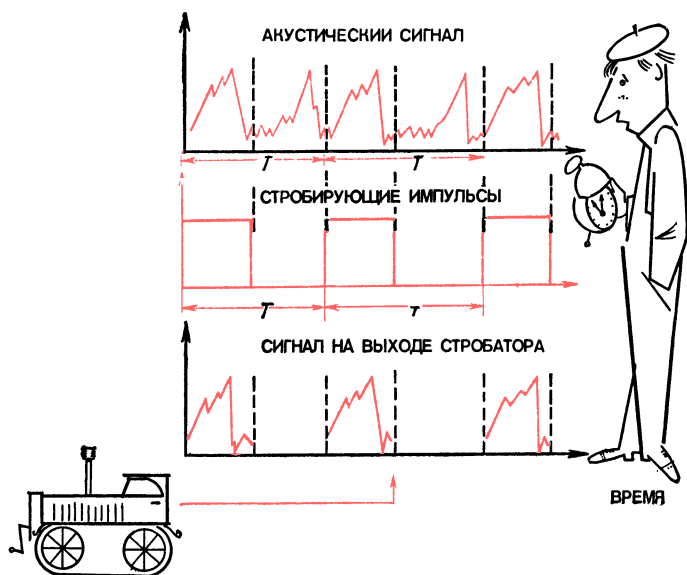


Рис. 34. Стробирование.

возникает проблема выбора ширины строба. Если строб будет очень узким, то из-за флуктуации сигнала возникает опасность, что сигнал и строб не совпадут по времени и стробатор задержит импульс, несущий информацию об исследуемой кинематической паре. Если строб будет слишком широким, то стробатор начнет пропускать на выход посторонние импульсы.

Для повышения точности стробирования используют два приема. Во-первых, стробатор синхронизируют не каким-нибудь посторонним отметчиком времени, а самим механизмом. Поэтому опорный сигнал синхронизации следует за колебаниями скоростного режима механизма, и эти колебания не сказываются на точности стробирования.

Во-вторых, стробы могут и не быть слишком узкими, если мы будем точно знать, от каких кинематических пар и в каком порядке проходят импульсы через стробатор. В САД имеется специальное устройство, которое подсчитывает импульсы, прошедшие через стробатор, и предъявляет для анализа только те, которые отправила диагностируемая кинематическая пара. Это устройство, кроме того, контролирует сигнал, пропущенный сквозь стробатор. Если в пачке окажется больше или меньше импульсов, чем положено, то устройство эту пачку импульсов забракует.

Для несинхронизированных механизмов стробатор служит тем устройством, которое полностью решает задачу разделения сигналов, идущих от различных кинематических пар. Мы уже говорили, что у этих механизмов главным отличительным признаком сигналов, посылаемых кинематическими парами, служит период следования ударов.

Настраивая период стробирования на сигнал обследуемой кинематической пары и плавно меняя начальную фазу стробов, мы имеем возможность поймать нужный сигнал и, измерив его интенсивность, оценить состояние пары. Этот прием называется синхронным накоплением.

## **Детектор**

Акустический сигнал содержит высокочастотное заполнение, в котором нет информации о соударении деталей, но которое значительно усложняет форму сигнала, следовательно, от него надо избавиться. Для этого служит детектор — выпрямитель, который превращает переменный ток в постоянный. Сигнал на выходе детектора повторяет форму огибающей высокочастотных колебаний. Акустический сигнал после детектора представляет собой последовательность импульсов довольно простой формы. Их амплитуда характеризует интенсивность соударения

деталей в интересующей кинематической паре, а их положение на оси времени — момент времени, в который произошел удар. Детектор можно устанавливать как до, так и после стробатора.

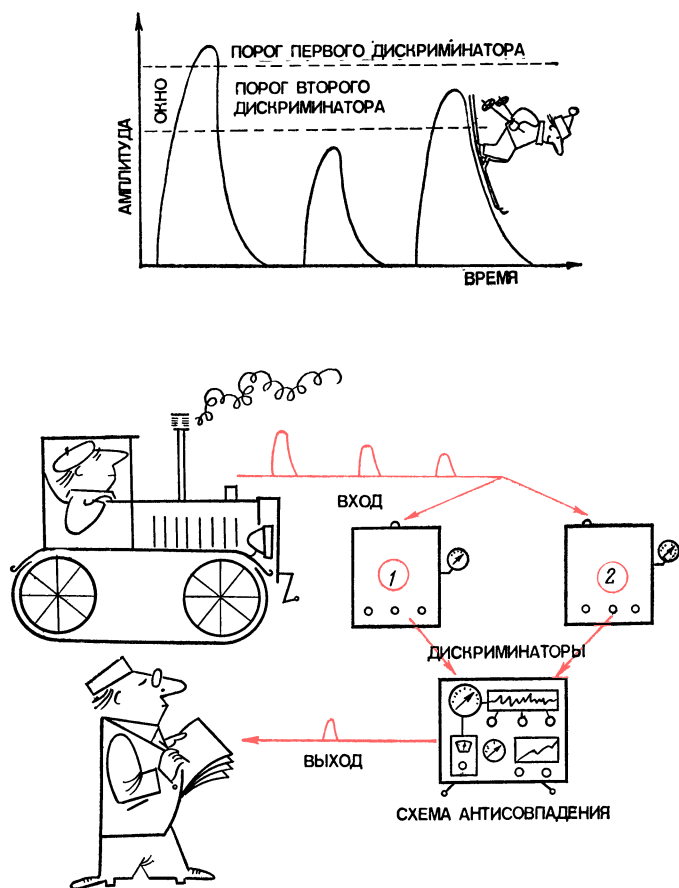
### **Пороговое устройство**

Обычно не удастся добиться идеальной работы электронных устройств, и они всегда вносят некоторые искажения в обрабатываемый сигнал. Часто их погрешности проявляются в том, что к полезным импульсам примешиваются «паразитные» импульсы, обычно незначительной величины. Электроники называют их «дрызгами». Чтобы очистить сигнал от «дрызг», его пропускают через пороговое устройство. Оно задерживает импульсы, амплитуды которых меньше определенной величины. Поскольку «дрызги» меньше полезных импульсов, то они подавляются в пороговом устройстве.

### **Измерение амплитуды импульсов**

Все описанные выше устройства являются фильтрами, использующими различие в свойствах сигнала и помехи. Пропустив через них сигнал, мы очищаем его от помех. Теперь задача состоит в измерении параметров сигнала, которые содержат информацию о состоянии пославшей его кинематической пары.

Сведения о состоянии кинематической пары механизма заключены в амплитуде акустического импульса и в его положении на оси времени относительно опорного сигнала. Хотя измерение этих параметров импульса представляет несравненно более простую задачу, чем его выделение из серии импульсов, посылаемых всеми кинематическими парами механизма, но и о ней следует сказать несколько слов. Специфика измерений амплитуды импульсов и временных интервалов в системе акустической диагностики связана с малой длительностью как импуль-



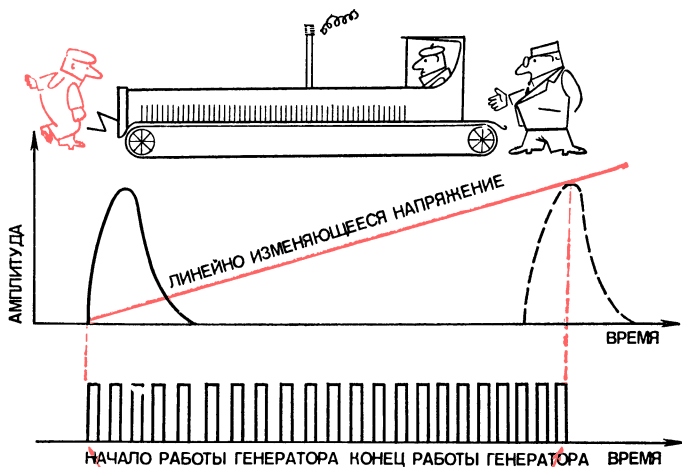
*Рис. 35. С помощью двух дискриминаторов и схемы антисовпадения можно определить, между какими значениями лежит амплитуда импульса.*

сов, так и интервалов времени между ними, если к этим величинам подходить с обычным масштабом.

Простейшей задачей оценки амплитуды импульса, посылаемого кинематической парой, будет определение: больше она или меньше некоторой заданной величины. Эта задача может быть решена с помощью амплитудного дискриминатора. Импульс проходит на выход дискриминатора лишь тогда, когда его амплитуда превышает некоторый установленный порог. Этот порог можно регулировать и для каждой кинематической пары найти свое значение.

Когда диагностическая задача формулируется таким образом, что требуется определить, исправны ли кинематические пары механизма, то ее можно решить, используя амплитудный дискриминатор. Порог дискриминатора устанавливается на величину амплитуды импульса, который соответствует переходу кинематической пары из класса исправных в неисправные. Если после этого импульс проходит на выход дискриминатора, значит, кинематическая пара исправна. Импульс, прошедший дискриминатор, может включить индикаторную лампочку или другой сигнал. Отсутствие импульса на выходе дискриминатора указывает на то, что кинематическая пара исправна. Таким образом, дискриминатор выполняет в системе диагностики простейшие логические функции.

Дискриминатор может быть использован и для измерения амплитуды импульсов. Изменяя величину порога, можно зарегистрировать то его значение, при котором входные импульсы начинают проходить на выход дискриминатора. Это пороговое значение и можно принять за величину амплитуды акустического импульса. Амплитуду импульсов удобно измерять с помощью двух дискриминаторов, имеющих разные пороги  $S$  и  $S + \Delta S$ . Импульсы с этих дискриминаторов подаются на схему анти-совпадений. Чтобы схема выдала сигнал, необходимо, чтобы амплитуда поступившего импульса превосходила порог первого дискриминатора, но была меньше порога



*Рис. 36. Наиболее точные измерения амплитуд основаны на преобразовании их со временной интервал.*

второго дискриминатора. Об этой логической операции мы уже рассказывали. Устройство срабатывает только в том случае, если на выходе одного дискриминатора импульс есть, а на выходе другого — нет.

Появление сигнала на выходе схемы антисовпадений свидетельствует о том, что измеряемая амплитуда импульса лежит между значениями  $S$  и  $S + \Delta S$ . Разность пороговых значений  $\Delta S$  называют «окном» амплитудного анализатора. Его ширина определяет максимальную погрешность измерения амплитуды. Очевидно, что пороги дискриминаторов  $S$  и  $S + \Delta S$  во время измерения амплитуды импульсов автоматически или вручную изменяются до тех пор, пока на выходе анализатора не появится сигнал. Значения порогов при этом и укажут величину амплитуды импульса с погрешностью  $\Delta S$ .

Часто амплитуду импульсов измеряют предварительно, преобразовав ее в интервал времени, поскольку его



можно измерить проще и точнее. С помощью электронной схемы импульс «кладется на бок», и в зависимости от величины амплитуды он занимает больший или меньший интервал на оси времени. Получается новый импульс, длительность которого равна амплитуде импульса, поступившего на вход анализатора. Передним фронтом нового импульса запускается генератор периодических колебаний, а задним фронтом генератор останавливается. Подсчитав число колебаний генератора и зная их период, легко определить длительность импульса, а она, в свою очередь, соответствует амплитуде импульса, поступившего на вход анализатора.

Помимо индикаторных лампочек и других устройств, предназначенных для визуального считывания результатов измерения, к выходу анализатора амплитуды импульсов с помощью специальной электронной схемы может быть подключено цифропечатающее устройство, которое выдает результат диагноза в виде таблицы.

### **Измерение интервалов времени**

Другим параметром акустического импульса является величина его смещения на оси времени относительно опорной точки, т. е. величина опережения или запаздывания. Значение этого параметра равно интервалу времени между опорным сигналом и акустическим импульсом.

Основным устройством для измерения интервалов времени служит генератор тактовых импульсов. Он как бы наносит калибровочные метки на ось времени. Работа генератора начинается с появления стартового сигнала, который вырабатывается датчиком опорного сигнала, например датчиком, регистрирующим прохождение поршнем двигателя верхней мертвой точки. Генератор тактовых импульсов выдает их сериями. Каждая серия состоит из одинакового числа импульсов, следующих через равные интервалы. Благодаря тому, что генератор управля-

ется стартовыми импульсами, которые жестко связаны с фазами движения механизма, вся последовательность тактовых импульсов связывается с движением механизма, т. е. работа механизма и диагностического устройства синхронизируется. В результате измерение временных соотношений в акустическом сигнале ведется не в масштабе физического времени, а в единицах угла поворота одного из вѐлов механизма, например коленчатого вала двигателя. Этим достигается снижение погрешности, связанной с флуктуациями скоростного режима механизма.

### Усреднение

Любое измерение содержит погрешность. Для повышения точности измерения повторяют несколько раз и результат усредняют. Если одиночное измерение содержит погрешность  $\Delta x$ , то погрешность результата, полученного после  $n$  измерений, уменьшается в  $\sqrt{n}$  раз. Так утверждает теория измерений.

Все сказанное целиком относится к диагностике. Здесь также не ограничиваются одиночным измерением амплитуды и положения импульса, отправленного кинематической парой. Поскольку кинематическая пара вырабатывает импульсы периодически, то измерительное устройство определяет параметры у серии импульсов и результат усредняет.

Для повышения точности следует увеличивать продолжительность диагноза и, наоборот, если необходимо сократить его время, то придется удовлетвориться меньшей точностью. Здесь существует такая простая зависимость. Обозначим  $\Delta x$  — погрешность измерения амплитуды (или фазы) одиночного импульса, а  $\varepsilon$  — допустимую погрешность диагноза. Поскольку обе погрешности связаны зависимостью

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\sqrt{n}},$$

где  $n$  — число измерений сигнала, обеспечивающее заданную точность  $\varepsilon$ , то для получения заданной точности нужно измерить амплитуду (фазу) у  $n$  импульсов, где

$$n = \left( \frac{\Delta x}{\varepsilon} \right)^2.$$

Импульсы вырабатываются кинематической парой с периодом  $T$ . Отсюда длительность диагноза следующим образом связана с его точностью:

$$\theta = nT = T \left( \frac{\Delta x}{\varepsilon} \right)^2.$$

Для повышения точности и особенно надежности диагноза прибегают и к другому способу усреднения. Диагноз механизму ставят на разных скоростях и нагрузочных режимах, а затем результаты согласуют между собой.

### **Выбор режима работы механизма при диагностировании**

Этот вопрос мы рассмотрим на примере диагностики трансмиссии. Основными кинематическими парами трансмиссии являются шестерни и подшипники. Анализ показывает, что величина сигнала, вырабатываемого подшипником, мало зависит от скорости вращения вала, но существенно меняется в зависимости от нагрузки. До определенного предела чем больше нагрузка на вал, тем сильнее удары в его подшипниках. Но затем интенсивность ударов с увеличением нагрузки уменьшается. Это связано с тем, что под действием силы шарики подшипника деформируются и происходит кажущееся уменьшение его радиального зазора. Всегда желательно получать сигнал максимальной величины, чтобы он значительно превосходил по уровню помеху. Тогда помеха в меньшей степени сможет его исказить. Поэтому при обследовании подшипников механизму следует задавать такую нагруз-

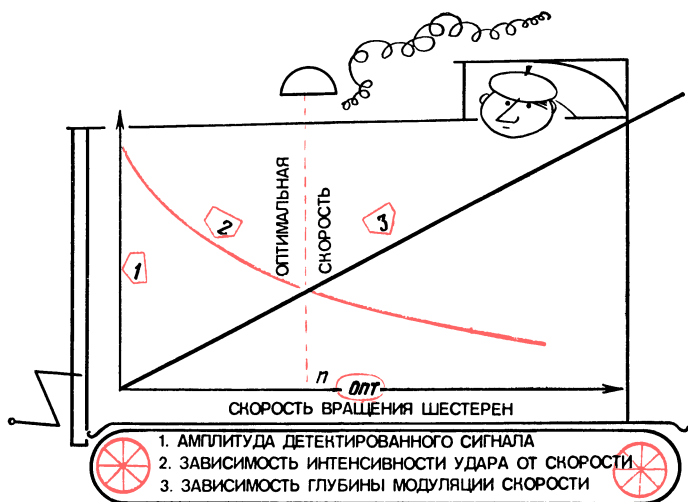


Рис. 37. Наибольшую амплитуду детектированный сигнал имеет при оптимальной скорости вращения шестерен.

ку, при которой сигнал подшипников имеет максимальную величину. Скоростной режим механизма при диагностировании подшипников не имеет существенного значения. Его следует выбирать таким, чтобы уровень сигнала от шестерен был минимальным.

Исследования показывают, что интенсивность ударов зубьев шестерен не зависит от нагрузки (в широком диапазоне ее изменения), но она пропорциональна скорости вращения шестерен. Чем быстрее они вращаются, тем сильнее удары зубьев, а значит, тем больше амплитуда сигнала. Но, с другой стороны, чем чаще происходят удары, тем меньше глубина модуляции, а значит, и амплитуда детектированного сигнала. Т. о. и для шестерен существует оптимальный скоростной режим, при котором амплитуда их сигнала имеет максимальное значение.



## Заключение

Рассказ о технической диагностике подходит к концу. Чтобы познакомить читателя с тем, как решается эта проблема, нам пришлось затронуть обширный круг вопросов, относящихся к различным научным отраслям. И вместе с

тем мы, конечно, не исчерпали предмет, даже если иметь в виду популяризаторскую цель книги.

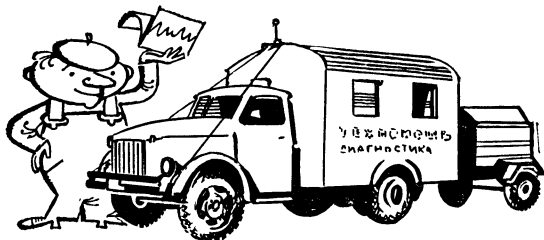
Нужно учитывать молодость технической диагностики как науки — ей около 15 лет. Поэтому на многие вопросы, которые могли возникнуть у читателя, ответов пока нет — их предстоит найти в результате напряженных исследований. «Верьте тем, кто ищет правду, и сомневайтесь в тех, кто ее нашел», — эти слова французского мыслителя Ж. Руссо можно отнести к любой развивающейся науке, в которой всегда больше вопросов, чем ответов.

Мы закончим эту книгу обращением к тем читателям, которым изложенные методы диагностики показались слишком мудреными и сложными, которым больше по душе компрессиметры, максиметры и подобные им приспособления. Причем мы не будем повторять того, что говорили раньше, что десятки подобных приборов, много лет поставляемые совхозам и колхозам, не могут решить проблему диагностики. Мы также не будем разяснять разницу между сложностью понимания, как устроен тот

или иной прибор, машина, и сложностью их использования. Не очень многие знают во всех подробностях, как устроен телевизор или холодильник и какое назначение той или иной их части, а пользуются ими все. Причем часто наблюдается такая зависимость: чем хитрее принцип, заложенный в устройство, тем проще с ним работать. Примером может служить сравнение тормозного стенда с электронным прибором для измерения мощности двигателей, который мы описали в данной книге.

Мы хотим указать на социологический аспект рассмотренной нами проблемы. В последнее время социологи много сделали, чтобы осветить различные стороны нашей жизни. В частности, они изучили вопрос о привлекательности различных профессий, особенно для молодежи. Наиболее привлекательными профессиями оказались те, что идут в ногу с веком, те, в которых приходится иметь дело с электроникой, с вычислительными машинами, с достижениями атомной физики, квантовыми генераторами и т. д. Сельские профессии по привлекательности стоят на одном из последних мест, и важнейшей причиной этого является отставание сельского хозяйства в использовании новейших достижений науки и техники. Тракторы, комбайны — это, конечно, совершенные машины, но на службу сельскому хозяйству все более смело идет та техника, которая характеризует современность, прежде всего вычислительные машины и другое электронное оборудование. Техническая диагностика, нам представляется, могла бы стать удобным объектом для начала очередного перевооружения сельского хозяйства. И с ее помощью может быть заложен фундамент для социологических преобразований на селе. Престиж сельских профессий значительно повысится, и они станут такими же «модными», как космонавтика, авиация, работа в научных учреждениях.





## Содержание

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА . . . . .	5
ВМЕСТО ПРЕДИСЛОВИЯ . . . . .	7
ОТ СТИХИИ АВАРИЙ К ИХ ПРОГНОЗУ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ . . . . .	12
НАДЕЖНОСТЬ МАШИНЫ . . . . .	12
МОЖНО ЛИ ПРЕДСКАЗАТЬ АВАРИЮ? . . . . .	22
«ИДЕАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ», СОСТОЯНИЕ МЕХАНИЗМА . . . . .	24
ФУНКЦИИ СОСТОЯНИЯ . . . . .	28
ДИАГНОСТИКА . . . . .	34
ДИАГНОСТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА . . . . .	35
ИНФОРМАЦИЯ, ЛОГИКА, ДИАГНОЗ . . . . .	43
ЭЛЕМЕНТЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА . . . . .	43
ИНФОРМАЦИЯ . . . . .	47
СИГНАЛ . . . . .	53
СИГНАЛ — ПОМЕХА . . . . .	64
КАНАЛ СВЯЗИ . . . . .	66
МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ . . . . .	72
ЛОГИКА . . . . .	76
ОСНОВНОЙ ЗАКОН ДИАГНОСТИКИ . . . . .	85
РОЖДЕНИЕ СИГНАЛА . . . . .	89
ОБ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДАХ ДИАГНОСТИКИ . . . . .	89
«ПАРАЗИТНЫЕ» СТЕПЕНИ СВОБОДЫ МЕХАНИЗМА . . . . .	93
СОУДАРЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ . . . . .	100
МОДУЛЯЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА . . . . .	101

ВОЛНЫ . . . . .	106
АКУСТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ . . . . .	109
СИСТЕМА АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ . . . . .	118
СТРУКТУРА СИСТЕМЫ . . . . .	118
РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛА . . . . .	123
ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР . . . . .	126
СТРОБАТОР . . . . .	129
ДЕТЕКТОР . . . . .	131
Пороговое устройство . . . . .	132
ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСОВ . . . . .	132
ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ . . . . .	136
УСРЕДНЕНИЕ . . . . .	137
ВЫБОР РЕЖИМА РАБОТЫ МЕХАНИЗМА ПРИ ДИАГНОСТИ- РОВАНИИ . . . . .	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	140





*Борис Васильевич Павлов*

**ДИАГНОСТИКА „БОЛЕЗНЕЙ“ МАШИН**

(как инженеры овладевают языком машин).  
2-е издание

Редактор **Е. Б. Рузина**

Художник **И. М. Оффенгенден**

Художественный редактор **Н. М. Коровина**

Технический редактор **Н. В. Суржева**

Корректор **А. И. Кудрявцева**

**ИБ № 1580**

Сдано в набор 27.09.77. Подписано к печати 06.01.78. Формат  $70 \times 100^{1/32}$ . Бумага тип № 1. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 5,85. Уч.-изд. л. 6,37. Изд. № 74. Тираж 80 000 экз. Заказ № 739. Цена 20 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Колос» 103716, ГСП, Москва, К-31, ул. Дзержинского, д. 1/19.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.

150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

20 коп.

