

## ОСНОВЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОПРИВОДА

### Контролируемые параметры при диагностике гидроприводов

Контроль технического состояния гидропривода машин при эксплуатации, по результатам которого принимается решение о вероятности безотказной работы в заданных условиях с установленными параметрами, является важной составной частью системы обеспечения надежности машины. Для различного класса машин (строительно-дорожных машин, сельскохозяйственных машин, воздушных и морских судов и т.д.) требования к надежности и долговечности определяются с учетом условий их работы при эксплуатации

Контроль технического состояния осуществляется измерением некоторых параметров, выбранных в качестве диагностических признаков. В зависимости от способа диагностики (гидросилового, виброакустического и др.) набор диагностических признаков может быть различным.

В табл.5.1 приведен перечень основных контролируемых параметров "При гидросиловой диагностике гидросистем [16].

Помимо измерения значений контролируемых параметров в процессе испытаний гидравлического оборудования необходимо производить контроль температуры рабочей жидкости и следить за ее параметрами (вязкостью, чистотой, наличием воздуха и т.п.).

Насосы и гидромоторы перед началом испытаний рекомендуется обкатать в течение 20...30 мин с последовательным увеличением нагрузки 4...6 шагами до номинальной. Реверсивные насосы обкатываются на обеих Полостях.

Все гидравлическое оборудование необходимо проверить на герметичность при номинальном давлении, увеличенном на 25%. В процессе испытаний рекомендуется производить настройку на рабочие параметры распределительной и регулирующей аппаратуры и регуляторов насосов и моторов.

### Средства контроля технического состояния гидравлических систем и агрегатов

Любая система диагностирования представляет собой совокупность средств технической диагностики машин, объекта диагностирования и исполнителей. Средства технической диагностики являются основой для получения информации об объекте диагностирования, при этом обязательно предполагаются операции измерения различных параметров, совокупность которых служит основой для процесса диагностирования.

Принцип работы системы диагностирования заключается в следующем (рис.5.1). Сигналы от объекта диагностирования 1 и диагностических датчиков 2 через преобразователи 3 и усилители (формирователи) 4 поступают в регистратор (сигнализатор) 5.



Рис.5.1. Схема диагностирования

В автоматических системах диагностирования возможно наличие анализатора, который формирует диагностическое заключение и выдает его в виде документа. Информация передается на микропроцессоры или ЭВМ для ее обработки, выдачи рекомендаций и хранения.

Учитывая сложность конструкций современных машин и многообразие физических процессов, сопровождающих работу, средства диагностирования должны базироваться на сочетании различных методов. При этом решающее значение имеет рациональный подбор методов диагностирования и измерений, обработки и представления диагностической информации для достижения технически и экономически целесообразных характеристик средств диагностирования.

Таблица 5.1

Контролируемые параметры при определении технического состояния гидропривода

Гидрооборудование	Контролируемый параметр
1	2
Насосы регулируемые различных типов	Номинальное давление Подача Приводная мощность Объемный КПД Работа механизма управления (для регулируемых насосов)
Гидромоторы нерегулируемые различных типов	Номинальное давление Номинальная частота вращения Минимальная частота вращения Номинальный расход Номинальный крутящий момент Объемный КПД
Гидроцилиндры	Номинальное давление Внутренние утечки Наибольшее давление страгивания Наибольшее давление холостого хода <sup>1</sup>
Гидроклапаны предохранительные, гидроклапаны последовательности (напорные золотники), гидроклапаны последовательности (напорные золотники) с обратным клапаном	Номинальное давление Минимальное давление Перепад давлений при изменении расхода от номинального до минимального Номинальный расход Перепад давления от полного открытия слива до перекрытия, при котором утечки не должны превышать установленной величины Величина утечки Перепад давлений на обратном клапане
Распределители с ручным, электрическим, гидравлическим и электрогидравлическим управлением	Соответствие циклу работы согласно установленной для распределителя схеме Суммарная утечка по зазорам распределителя Минимальное давление управления <sup>2</sup> Возможность регулирования времени срабатывания <sup>2</sup>



Продолжение табл.5.1

1	2
Дроссели, дроссели с регулятором, дроссели с регулятором и предохранительным клапаном, дроссели с регулятором и обратным клапаном	Минимальное давление Отклонение расхода рабочей жидкости при изменении давления (только для дросселей с регулятором) Утечка масла через закрытый дроссель и из дренажного отверстия при номинальном давлении Наименьшая разница между давлением на выходе и давлением настройки (только для дросселей с регулятором и предохранительным клапаном)
Реле давления	Нечувствительность на всем диапазоне регулируемого давления Утечки через дренажное отверстие
Редукционный клапан	Пределы регулирования редуцированного давления, плавность и четкость настройки Стабильность редуцированного давления при изменении расхода от наибольшего до нулевого Стабильность редуцированного давления при изменении подводимого давления Стабильность редуцированного давления при неизменном режиме и расходе через клапан настройки
Клапаны обратные, гидрозамки, клапаны поддерживающие	Четкость срабатывания и соответствие установленному циклу работы Величина утечки Открытие клапана при номинальном рабочем давлении в надклапанной полости (только для обратных управляемых клапанов) Плавность регулирования величины подпора (только для поддерживающих клапанов)
Делитель потока	Погрешность деления потока

Примечания:

Проверка производится только в случае, когда это оговорено технической документацией.

Только у распределителей с гидравлическим и электрогидравлическим управлением.

Средства диагностирования разделяют на стационарные, переносные и встроенные. Стационарные средства устанавливают на пунктах технического обслуживания и диагностики. При этом объект диагностирования доставляется к средствам, подключается к ним, и только после этого производится контроль необходимых параметров. Переносные средства диагностирования, объединенные, как правило, в единые блоки, доставляются к объекту диагностирования по месту его эксплуатации и подключаются только для проведения диагностирования. Встроенные средства, составляющие с объектом диагностирования одно целое, дают возможность получать информацию о состоянии объекта постоянно или при контрольных проверках.

Стационарные средства диагностирования, ил и стенды, могут применяться для проверки технического состояния гидросистемы машины и отдельных ее агрегатов, устанавливаемых на стенд. В этом случае достигается большая глубина диагностирования, так как можно применить средства информации с минимальными погрешностями. Кроме того, в процессе проверки (диагностирования) отсутствует взаимное влияние агрегатов гидросистемы, что также увеличивает точность диагностирования. Стационарные средства измерения позволяют применить датчики к средствам регистрации, выдающие диагностическую информацию непрерывно (в виде кривых или осциллограмм).

Недостатками стационарных средств диагностирования являются высокая стоимость, большие размеры и масса, значительные затраты времени на подключение гидросистем и гидроагрегатов к стендам, потери рабочей жидкости, а также возможность внесения загрязнений в гидросистему.

Переносные средства диагностирования позволяют проводить проверку технического состояния объектов диагностирования на пунктах обслуживания и в полевых условиях. Блоки датчиков имеют небольшие размеры и массу, могут работать от бортовой сети мобильных машин, воздушных судов и других объектов. Время на подсоединение блока датчиков сокращается с применением специальных присоединительных устройств. Целесообразно применение бесконтактных и кратковременных контактных датчиков.

Переносные средства измерения имеют, как правило, большую погрешность при измерении параметров диагностирования. Глубина поиска дефекта при этом небольшая, поэтому не всегда имеется возможность определить конкретную причину неисправности гидроагрегата.

Встроенные средства диагностирования, устанавливаемые в системах и агрегатах машины, в значительной степени ускоряют процесс диагностирования и являются основой для создания автоматизированных систем, имеющих бортовые ЭВМ для обработки, анализа информации и выдачи заключения о техническом состоянии объекта.

К недостаткам встроенных средств можно отнести необходимость установки большого числа датчиков в гидросистеме машины и повышенные требования к стабильности характеристик датчиков на случай замены.

По отношению к объектам диагностирования средства могут быть специализированными или универсальными. Специализированные средства измерения обычно проще по конструктивному исполнению и имеют меньшую стоимость, чем универсальные. Универсальные средства отличаются сложностью конструкции и большой стоимостью, однако их легко можно унифицировать, и они могут быть пригодны для различных объектов Диагностирования.

Стационарные стенды и установки в основном оснащены универсальными средствами измерения, выпускающимися серийно. Переносные и встроенные средства, как правило, являются специализированными и труднее поддаются унификации вследствие большого конструктивного разнообразия агрегатов гидросистем.

Достоверность диагностирования в значительной степени зависит от точности измерений. Поэтому в технической документации обязательной является рекомендация по точности используемых средств измерения.

Если в технической документации класс точности измерительного прибора на диагностируемое изделие не указан, то можно пользоваться данными табл.5.2. При отсутствии специальных указаний измерения проводят на участках шкалы в пределах от 30 до 95%. Шкалы жидкостных приборов используют полностью.

Таблица 5.2

Требуемый класс точности контрольно-измерительных приборов

Контролируемый параметр	Класс точности приборов		
	насосы, гидромоторы	гидроцилиндры	гидроаппаратура
Давление	$\pm 1,6$	1,6	1,6...2,5
Подача (расход)	$\pm 1,6$	-	1,6...2,5
Частота вращения	$\pm 0,6$	-	-
Мощность, крутящий момент	$\pm 1,6$	-	-
Температура	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$



Параметры следует измерять при установившемся тепловом режиме. Выдержка перед началом измерений должна быть не менее 2 мин. За результат измерения принимают среднее арифметическое не менее трех измерений. Разность между наибольшим и наименьшим измерениям л одного и того же параметра не должна превышать значений, указанных в табл.5.3.

Таблица 5.3

Допустимая разность между наибольшей и наименьшей величинами измерений

Контролируемый параметр	Допустимая разность, % при числе замеров			
	3	5	7	9
Давление	0,7	1,5	2,0	2,5
Подача (расход)	0,7	1,5	2,0	2,5
Частота вращения	0,25	0,5	0,7	0,9
Мощность, крутящий момент	0,7	1,5	2,0	2,5

Применяющиеся в процессе диагностирования средства измерения в соответствии с ГОСТ 16263-70 классифицируются на следующие виды меры, измерительные преобразователи (датчики), измерительные приборы, измерительные установки и системы.

*Мера* - средство измерения, предназначенное для непосредственного воспроизведения физической величины известного размера. Мерами могут быть: [при, магазины резисторов и т.п. Различают однозначные меры, многозначные меры и наборы мер. Примером многозначной меры является линейка, а набора мер - магазин концевых мер длины. При измерениях с использованием меры сравнивают значения измеряемых параметров с определенными величинами, воспроизводимыми мерами.

*Измерительный прибор* - средство измерения, вырабатывающее сигнал измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия исследователем. Общим для всех приборов является наличие отсчетных устройств. Чаще всего последние выполняются в виде шкалы и указательной стрелки.

Измерительные приборы подразделяются на аналоговые и дискретные. Если показания прибора являются непрерывной функцией измеряемой величины, то такие приборы называются аналоговыми. Приборы, показания которых сохраняются в некотором интервале изменения измеряемой величины, называются дискретными. Такие приборы снабжаются устройствами, представляющими значение измеряемой величины в цифровой форме и отображающими эти значения на индикаторах. Показания дискретных приборов легче фиксировать, они удобны для ввода в ЭВМ для их дальнейшей обработки. Эти приборы имеют существенно большую точность, так как у них отсутствует погрешность считывания показаний, но они сложнее аналоговых, менее надежны и дороже. Кроме того, по их показаниям трудно судить о тенденциях изменения измеряемой величины. В последнее время наблюдается интерес к широкому применению электрических и электронных средств измерения параметров и их обработки.

Техническое состояние гидропривода любой машины характеризуется различными диагностическими признаками. В большинстве случаев диагностическими признаками являются неэлектрические величины: давление, температура, расход рабочей жидкости, частота вращения, угловые скорости и ускорения, линейные и угловые перемещения, виброускорения, а также параметры, характеризующие состояние рабочей жидкости гидропривода. Для удобства последующих операций измерения, обработки и индикации диагностические параметры необходимо преобразовывать в унифицированные электрические сигналы. Эту функцию выполняют *измерительные преобразователи* (датчики).

Измерительные преобразователи вырабатывают сигналы измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не подлежащей непосредственному восприятию наблюдателем.

Датчики размещаются непосредственно у объекта измерения и преобразуют измеряемые параметры в величины, удобные для передачи по линиям связи, усиления, измерения или регистрации

электрическими средствами. Датчик входит в измерительную систему, состоящую из усилителя, измерительного прибора, источника питания.

При выборе или разработке средств диагностирования желательно иметь минимальное число измерительных каналов. При этом увеличивается надежность диагностических устройств, повышается достоверность результатов диагностирования. Датчики, используемые в устройствах, должны выдавать минимальное число видов электрических сигналов. Особенно это важно для переносных и встроенных средств диагностирования. Благодаря минимальному числу видов сигналов появляется возможность использовать измерительные или регистрирующие приборы одного типа.

К датчикам средств диагностирования гидроприводов машин, используемых в тяжелых условиях, предъявляют следующие требования:

отсутствие вредных воздействий со стороны датчика на организм человека;

необходимая чувствительность и точность;

высокая перегрузочная способность;

устойчивость к механическим, техническим и температурным воздействиям измеряемой и окружающей сред;

малая чувствительность к неизмеряемым параметрам и компонентам колеб (электрических, магнитных, гравитационных, радиационных и др.);

унификация и взаимозаменяемость;

удобство встраивания в диагностируемый объект и обслуживания; малая масса и размеры; экономичность и технологичность.

Комплексный учет вышеизложенных требований, предъявляемых к диагностическим датчикам, позволяет для конкретных объектов диагностирования выбрать экономически целесообразный комплект датчиков и регистрирующей аппаратуры.

*Измерительная установка* - совокупность функционально и конструктивно объединенных средств измерения и вспомогательных устройств, предназначенная для рациональной организации измерения. Измерительная установка предусматривает определенный метод измерения, в нее входят различные устройства, обеспечивающие необходимое измерение объекта диагностирования (нагрузочные и тормозные стенды, дросселирующие устройства и т.н.).

*Измерительная система* - совокупность функционально объединенных средств измерения и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для преобразования сигналов измерительной информации в форму, удобную для автоматической обработки, передачи, использования в автоматических системах контроля и управления и доступную для непосредственного восприятия.

Все перечисленные средства измерений находят применение в практике диагностирования гидроприводов мобильных машин.

### **Измерительные преобразователи (датчики)**

Преобразователи (датчики) классифицируют по следующим основным признакам: принципу действия, назначению, характеру применения, параметрам измерения.

По принципу действия датчики, применяемые в средствах диагностирования, разделяют на электроконтактные, потенциометрические, тензорезисторные (тензометрические), электромагнитные преобразователи, пьезоэлектрические [18].

В *электроконтактных* датчиках измеряемое механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью. Естественной входной величиной контактных датчиков является пространственное перемещение.

Минимальная погрешность срабатывания контактных датчиков находится в пределах 1...2 мкм. Попытки создать датчики с погрешностью срабатывания менее 1 мкм не имели успеха. Во избежание образования дуги или искры мощность в цепи, разрываемой контактами, не должна превосходить 50...100 МВт. Поэтому при применении в качестве сигнального, измерительного элементов, потребляющих мощность меньше 50... 100 мВт, их можно включать непосредственно в цепь контактов датчика. Если же эти элементы потребляют большую мощность, то их включают через усилители.

Электроконтактные датчики используются для измерения временных интервалов при измерении расхода и скоростей перемещения штоков и др.

*Потенциометрическим* датчиком называют реостат, движок которого перемещается в соответствии со значением измеряемой неэлектрической величины. Таким образом, естественной входной величиной потенциометрических датчиков является перемещение движка, которое может быть либо угловым, либо линейным, а выходной величиной — активное сопротивление, распределенное линейно или по некоторому закону по пути движка.

Провод реостата изготавливается из манганина, константана или фехраля. В очень ответственных случаях, когда требования к износостойкости контактной поверхности особенно высоки или контактные давления очень малы, применяют провод из сплава платины с иридием ( $Pt+10\%Ir$ ). Добавка иридия к платине увеличивает твердость и прочность последней, повышает кислотоупорность, антикоррозийность и износостойкость. Удельное сопротивление этого сплава равно  $\rho=0,23 \text{ мкОм/мм}$ . Платиноиридиевый провод выпускается весьма малых диаметров (до 0,03 мм), что позволяет выполнять высокоомные (до нескольких кОм) датчики массой всего  $10^{-12}$  г и габаритами порядка 1х2 см. Хорошими параметрами обладают также датчики из проводов, изготовленных из <sup>сг</sup>лавов платины с палладием, рублием, рутением, осмием.

Ограничение быстродействия вызвано наличием механических связей, значительных присоединительных масс в кинематических цепях и необходимостью обеспечения устойчивого контакта между движком и обмоткой потенциометра. Потенциометрические датчики применяют в основном для измерения статического или медленно изменяющегося сигнала.

Потенциометрические датчики аналогично контактными являются ступенчатыми (дискретными), поскольку непрерывному изменению измеряемой неэлектрической величины соответствует ступенчатое изменение сопротивления. Это обстоятельство вызывает погрешность квантования, уменьшающуюся с увеличением числа витков ш датчика.

Для датчиков с равномерной намоткой погрешность квантования  $\gamma=100/(2N)\%$ , 1%. Число витков датчика, определяющее его разрешающую способность, обычно выбирают не меньше 100–200. В ряде случаев применяются потенциометрические датчики с нелинейным распределением сопротивления вдоль траектории движка, что дает возможность получить нелинейную функцию преобразования.

К преимуществам потенциометрических датчиков можно отнести возможность получения достаточно мощного выходного сигнала, что позволяет проводить его дальнейшую обработку и регистрацию без применения дополнительных усилительных устройств.

Потенциометрические датчики используют для измерения абсолютного и избыточного давления рабочих жидкостей, перепадов давления, координат, относительных перемещений, линейных ускорений, угловых скоростей и др.

В основе работы *тензорезисторное* лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации.

Характеристикой тензоэффекта материала является коэффициент относительной тензочувствительности  $k$ , определяемый как отношение изменения сопротивления к изменению длины проводника:  $k=E_k/\epsilon$ , где  $\epsilon$  – относительное изменение сопротивления проводника,  $E_k=AR/R$ ;  $E_l$  – относительное изменение длины проводника,  $E_l=\Delta l/l$ ,

Значение коэффициента относительной тензочувствительности  $k$  для некоторых материалов приведено в табл. 5.4.

На практике используются тензодатчики двух типов. В первом случае используется тензоэффект проводника, находящегося в состоянии объемного сжатия, когда естественной входной величиной датчика является давление окружающего его газа или жидкости. На этом принципе строятся манометры для измерения высоких и сверхвысоких давлений, датчики которых представляют собой катушку провода (обычно манганинового) или полупроводниковый элемент (чаще всего германиевый или кремниевый), помещенные в область измеряемого давления (жидкости или газа). Выходной величиной датчика является изменение его активного сопротивления.

Во втором случае используется тензоэффект растягиваемого или сжимаемого тензочувствительного материала. При этом тензорезисторы применяются в виде «свободных» и наклеиваемых

датчиков.

«Свободные» тензо датчики выполняются в виде одной или ряда проволок, закрепленных по концам между подвижной и неподвижной деталями и, как правило, выполняющих одновременно роль упругого элемента. Естественной входной величиной таких датчиков является весьма малое перемещение подвижной детали.

Таблица 5.4

**Характеристики используемых для тензорезисторов материалов**

Материал	k	Модуль упругости E, ГПа
Манганин	0.47...0.50	150
Константан	1.9...2.1	150
Нихром	2.1...2.3	180
Никель	-12	-
Висмут	22	-
p-германий	55	155
p-кремний	-100	187
n-германий	-100	155
	(<-150)	155
p-кремний	110	187
	(<170)	187
Платиносеребряный сплав	0.8...1.4	-
Платиновольфрамовый сплав ЛС-22	2.7...3.3	-
Стеклоуглерод	60...150	-

Устройство наиболее распространенного типа наклеиваемого проволочного тензорези стара изображено на рис.5.2.



Рис. 5.2. Конструкция наклеиваемых проволочных датчиков

На полоску тонкой бумаги или лаковую пленку 2 наклеивается так называемая решетка из зигзаге о боазно уложенной тонкой проволоки 3 диаметром 0,02... 0,05 мм. К концам проволоки присоединяются (пайкой или сваркой) выводные медные проводники 4. Сверху датчик покрывается слоем лака 1. Такой датчик, приклеенный к испытуемой детали, воспринимает деформацию ее поверхностного слоя. Таким образом, естественной входной величиной наклеиваемого тензодатчика является деформация поверхностного слоя детали, на которую он наклеен, а выходной - изменение сопротивления датчика, пропорциональное этой деформации.

Измерительной базой датчика служит длина детали, занимаемая проволокой. Наиболее часто



используются датчики с базами 5...20 мм, обладающие сопротивлением 30...500 Ом.

Фольговые преобразователи представляют собой весьма тонкую ленту из фольги толщиной 4...12 мкм, на которой часть металла выбрана травлением таким образом, что оставшаяся его часть образует показанную на рис. 5.3 решетку с выводами.



В последние годы появился еще один способ массового изготовления тензорезисторов, заключающийся в вакуумной озонке тензочувствительного материала и последующей конденсации его на подложку. Такие тензорезисторы получили название плёночных. Для изготовления плёночных тензорезисторов, помимо металлических материалов (например, титаноалюминиевый сплав 48Т-2, обеспечивающий измерение деформаций до 12% при коэффициенте тензочувствительности  $k=0,2$ ), используется также целый ряд полупроводниковых материалов, например германий, кремний ( $k=100+120$ ) и др.

При изготовлении фольговых и плёночных датчиков можно предусмотреть любой рисунок решетки, что является существенным их преимуществом. На рис. 5.3,а показан внешний вид датчика для измерения линейных напряжений, на рис. 5.3,б - датчик, напыленный на мембрану, а на рис. 5.3,в - датчик, наклеиваемый на вал для измерения крутящих моментов.

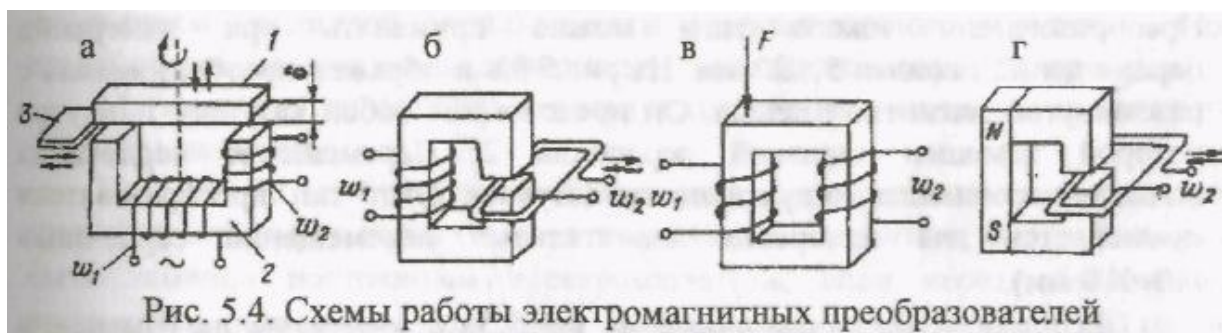
Погрешности приборов с проволочными, фольговыми и плёночными тензорезисторами тесно связаны с градуировкой этих приборов. Если нет возможности градуировать непосредственно рабочий датчик, то погрешность, обусловленная неидентичностью и качеством приклейки рабочих и градуируемых тензорезисторов, может быть 1...5% даже при весьма тщательной приклейке, а общая погрешность прибора (включая погрешность усилителя, указателя и др.) может достигать 10...15%. При градуировке непосредственно рабочего датчика, а также при возможности контроля чувствительности усилителя и установки нуля перед каждым измерением погрешность прибора может быть снижена до 0,2...0,5% при статических и до 1...1,5% при динамических измерениях.

Тензометрические датчики используются для измерения давления, расходов, усилий, моментов, относительных перемещений, линейных ускорений и др.

Применение тензорезисторов в качестве преобразователей деформации чувствительных элементов в датчиках давления в электрический сигнал открывает широкие возможности миниатюризации датчиков, повышения быстродействия и виброустойчивости, работы при изменяющихся температурах.

В датчиках давления используется тензоэффект растягиваемого или сжимаемого тензочувствительного материала или тензоэффект проводника, находящегося в состоянии объемного сжатия, когда входной величиной датчика является давление окружающей среды.

*Электромагнитные преобразователи* (датчики) преобразуют значение неэлектрического параметра в электрический сигнал за счет использования взаимодействия магнитного поля и электрического тока (рис. 5.4).



На рис. 5.4,а изображена магнитная цепь электромагнитного преобразователя с двумя обмотками 1 и 2. Если в обмотке 1 возникает электрический ток, то в сердечнике 2 наводится магнитный поток, величина которого зависит от структуры и материала сердечника и параметров тока в обмотке. Индуктивность  $L$  обмотки 1 будет определяться параметрами обмотки и магнитной цепи, а взаимная индуктивность  $M$  между обмотками 1 и 2 - параметрами этих обмоток и магнитной цепи. Электрический ток в обмотке 2 может быть постоянным или переменным.

Если изменять параметры магнитной цепи, например, приближая подвижный сердечник 1 к неподвижному 2 (уменьшение  $\delta$ ), или поворачивать сердечник относительно неподвижной части магнитной цепи, то при этом будет изменяться значение индуктивности  $L$  и взаимной индуктивности  $M$ .

Значения  $L$  и  $M$  можно изменять и при неподвижных сердечниках 1 и 2 путем введения в воздушный зазор пластины 3 из ферромагнитного материала (уменьшение  $\delta$ ) или пластины из электропроводного неферромагнитного материала. В последнем случае изменение  $L$  и  $M$  обусловлено размагничивающим действием токов, индуктированных в пластине основным магнитным потоком, проходящим по магнитной цепи.

Преобразователи, преобразующие естественную входную величину в виде перемещения в изменение индуктивности, называют *индуктивными*



На рис. 5.5 показаны типы индуктивных преобразователей. На рис. 5.5,а изображен наиболее распространенный преобразователь с малым воздушным зазором  $\delta$ , длина которого изменяется под действием измеряемой величины  $P$ . Рабочее перемещение в преобразователях с переменным зазором составляет 0,01... 10 мм.

Преобразователь с изменяющейся в соответствии со значением измеряемой величины площадью воздушного зазора приведен на рис. 5.5,б. Преобразователи такого типа можно применять при измерении перемещений порядка 5...20 мм. На рис. 5.5,в изображен преобразователь с разомкнутой магнитной цепью. Он представляет собой катушку 1, внутри которой помещен стальной сердечник 2. Перемещение сердечника вызывает изменение индуктивности катушки. Этот тип преобразователя применяется для измерения значительных перемещений сердечника (до 100 мм).

Преобразователи, показанные на рис. 5.5,г,д, основаны на изменении магнитного сопротивления вследствие размагничивающего действия вторичных токов. В преобразователе (рис. 5.5,г) в воздушный зазор вводится короткозамкнутый виток 1. В преобразователе (рис. 5.5,д) аналогичное экранирующее действие обусловлено вторичными токами в профилированном электропроводном диске 1 из меди или алюминия. Изменяя профиль диска, можно получить любой вид зависимости индуктивности от угла поворота диска. Преобразователи этого типа используются для измерения угловых перемещений до 180... 360°.

Одним из основных преимуществ индуктивных преобразователей является возможность получения большой мощности преобразователя (до 1...5 ВА), что позволяет пользоваться сравнительно

малогабаритным указателем на выходе измерительной цепи и регистрировать измеряемую переменную величину без предварительного усиления. Лишь при малогабаритных преобразователях приходится прибегать к включению<sup>1</sup> усилителя между измерительной цепью и указателем или регистратором.

Преобразователи, преобразующие перемещение в изменение взаимной индуктивности, принято называть *трансформаторными*, хотя более строгое название для этой группы преобразователей — *взамоиндуктивные*.

В трансформаторных преобразователях изменение взаимной индуктивности  $M$  можно получить не только при изменении магнитного сопротивления, но и при перемещении одной из обмоток, как это показано на рис. 5.4,6.

Взамоиндуктивные преобразователи используются, как и индуктивные, для измерения линейных перемещений, давления, расходов и др.

Если к магнитной цепи преобразователя (рис. 5.4,в) приложить сжимающие, растягивающие или скручивающие усилия, то вследствие их воздействия произойдет изменение магнитной проницаемости сердечника. Последнее вызовет изменение магнитного сопротивления сердечника и приведет к изменению индуктивности обмотки, помещенной на сердечнике, или взаимной индуктивности между обмотками III и ш;-

Подобные преобразователи в качестве естественной входной величины имеют упругую деформацию сердечника и могут быть использованы для измерения сил, давлений, моментов и т. д. Эти преобразователи, основанные на изменении магнитного сопротивления, обусловленном изменением магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника под воздействием механической деформации, называются *магнитоупругими*.

Магнитоупругие датчики используются для измерения очень больших усилий и давлений.

На рис. 5.4,г изображен преобразователь, конструктивно аналогичный трансформаторному датчику, но с постоянным магнитом, который может быть заменен постоянным электромагнитом, если через обмотку  $e_{ii}$  пропустить постоянный ток. При неподвижной обмотке  $y_{ii}$  ЭДС на ее зажимах равна нулю. Но при движении обмотки «; магнитный поток в сердечнике будет изменяться, в обмотке появится ЭДС, отличная от нуля.

Поскольку скорость изменения магнитного потока определяется скоростью перемещения обмотки в воздушном зазоре, то такой преобразователь имеет естественную входную величину в виде скорости линейных или угловых перемещений, а выходную - в виде индуцированной ЭДС. Такие преобразователи называются *индукционными*.

Индукционные датчики подразделяются на две группы. В преобразователях первой группы магнитное сопротивление на пути постоянного магнитного потока остается неизменным, а ЭДС наводится в катушке благодаря линейным или угловым колебаниям в зазоре магнита. В преобразователях второй группы постоянный магнит и катушка неподвижны, а индуцированная ЭДС наводится путем изменения магнитного потока вследствие колебаний полного магнитного сопротивления магнитной цепи, создаваемых чаще всего изменением зазора<sup>в</sup> этой цепи.

Индукционные преобразователи в целях диагностики гидропривода используются для измерения частоты вращения, расхода и др.

*Пьезоэлектрические* датчики строятся на основе кристаллов и текстур, электризующихся под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) и деформирующихся в электрическом поле (обратный пьезоэффект). Особенностью пьезоэффекта является знакочувствительность, т. е. изменение знака заряда при замене сжатия растяжением и изменение знака деформации при изменении направления поля. Наиболее известный пьезоэлектрический кристалл кварц. Если к кристаллу кварца вдоль так называемой электрической оси  $X$  приложена сила  $F_x$ , равномерно распределенная по грани, перпендикулярной оси  $A''$ , то в результате деформации элементарной ячейки кристалла ее электрическая нейтральность нарушается. На гранях, перпендикулярных оси  $X$ , возникает электрический заряд.

При равномерном нагружении со всех сторон (например, гидростатическое сжатие или тепловые напряжения и деформации) кристалл кварца остается электрически нейтральным так же, как и при нагружении по осям, перпендикулярным оси  $X$ .



Пироэлектрики представляют собой особую разновидность пьезоэлектрических кристаллов и отличаются от собственно пьезоэлектриков тем, что их ячейка имеет одно или несколько взаимно неуравновешенных полярных направлений. Благодаря этому указанная группа кристаллов поляризуется при всестороннем гидростатическом давлении и тепловом расширении, откуда и происходит название «пироэлектрики». Типичным представителем пироэлектриков является турмалин.

Сегнетоэлектрики входят в группу пироэлектрических кристаллов. Характерным отличием сегнетоэлектриков является то, что их кристалл разбит на домены, в пределах которых существует упорядоченная структура и свое полярное направление. Однако полярные направления доменов ориентированы по-разному. С сегнетоэлектриками присуща нелинейная зависимость плотности поляризованных зарядов от внешних воздействий (механические напряжения, температура и т. д.) и гистерезис.

Типичными представителями сегнетоэлектриков являются сегнетова соль и монокристаллический титанат бария. Сегнетоэлектрические монокристаллы сравнительно мало используются в измерительной технике из-за относительно низкой стабильности свойств и трудности получения бездефектных монокристаллов.

Сегнетоэлектрические пьезокерамики представляют собой продукт отжига спрессованной смеси, состоящей из мелкоизмельченного сегнетоэлектрического кристалла с присадками. Пьезоэлектрические свойства они приобретают после поляризации в сильном электрическом поле, направление которого и определяет полярный вектор пьезокерамики.

В настоящее время сырьем для производства пьезокерамики наряду с титанатом бария  $\text{BaTiO}_3$  служат титанат свинца  $\text{PbTiO}_3$  и ириконат свинца  $\text{PbZrO}_3$ . Наилучшие результаты получаются при использовании смесей этих материалов — так называемых цирконато-титанатов свинца (керамики типа ЦТС), которые получили сейчас самое широкое распространение, так как, обладая такой же чувствительностью, как и  $\text{BaTiO}_3$ , они обеспечивают работу датчика в температурном диапазоне до  $200\ldots 250^\circ \text{C}$ .

Выходная мощность пьезоэлектрических датчиков очень мала, поэтому на выходе датчика должен быть включен усилитель с возможно большим входным сопротивлением.

Погрешности пьезоэлектрических датчиков складываются прежде всего из погрешности от измерения параметров измерительной цепи, температурной погрешности, вызываемой изменением пьезоэлектрической постоянной, погрешности вследствие неправильной установки пластин, погрешности из-за чувствительности к силам, действующим перпендикулярно измерительной оси датчика, и частотной погрешности.

Пьезоэлектрические датчики могут быть выполнены с частотой собственных колебаний  $f_{\text{соб}} 100 \text{ кГц}$ , что позволяет измерять механические величины, изменяющиеся с частотой до  $1\ldots 10 \text{ кГц}$ .

Недостатком пьезоэлектрических датчиков является ограниченная возможность измерения статических параметров.

Пьезоэлектрические датчики используются для измерения давления, пульсации давления, вибрации, колебаний уровней и др.

*Термоэлектрические датчики* (термопары) представляют собой цепь из двух проводников (или полупроводников), выполненных из различных материалов и соединенных своими концами. Если температура одного места соединения отличается от температуры другого места, то в цепи появится ЭДС, называемая термоэлектродвижущей силой (термо-ЭДС). Проводники, составляющие термоэлектрический преобразователь, называют термоэлектродами, а места их соединений — спаями.

При небольшом перепаде температур между спаями термо-ЭДС практически линейно зависит от разности температур.

Материал термоэлектродов выбирается в зависимости от чувствительности спая к изменению температуры, т. е. от приращения величины термо-ЭДС при фиксированном перепаде температур, а также с учетом химической инертности термоэлектродов во внешней среде.

На чувствительность термопары значительное влияние оказывает химическая чистота материала, а также способы механической и термической обработки при изготовлении. Поэтому все образцы изготовленных датчиков подвергаются тарировке.

Измерение температуры производится следующим образом. Один из спаев (рабочий) помещается в измеряемую среду, а другой размыкается и подключается к электрическому прибору с высоким входным сопротивлением (мили и вольтметру). При этом места подключения (свободные концы термопары) должны находиться в среде с известной температурой. Наиболее точные результаты получаются, если эти места находятся в сосудах с тающим льдом ( $0^{\circ}\text{C}$ ).

Однако не всегда возможно сделать термоэлектроды необходимой длины, чтобы свободные концы можно было бы разместить на достаточном удалении от рабочего спаю. Кроме того, при использовании благородных металлов делать длинные термоэлектроды экономически невыгодно. Поэтому измерительный прибор приходится подключать к свободным концам термопары с помощью проводов из других относительно дешевых материалов. Чтобы сохранить точность и чувствительность термопары материал удлинительных проводов выбирают таким образом, чтобы спай и с термоэлектродом был по термо-ЭДС идентичен рабочему спаю, а места подключения их к термоэлектродом имели одинаковую температуру. Для термопары платино-паладиновой ( $90\%\text{Pt} + 10\%\text{Pd}$ ) в диапазоне от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $150^{\circ}\text{C}$  и для термопары вольфрам-молибден применяются удлинительные электроды из меди и сплава ТП. Для термопары хромель-алюмель удлинительные термоэлектроды изготавливаются из меди и Константина, а для пары хромель-копель удлинительными являются основные термоэлектроды, но выполненные в виде гибких проводов.

На точность измерения температуры прежде всего влияют точность и стабильность температуры свободных концов термопары. При отклонении температуры от той, при которой проводилась тарировка, в полученные результаты должны вноситься поправки, величина которых изменяется в зависимости от диапазона как измеряемой температуры, так и температуры свободных концов.

Вторым фактором, влияющим на точность измерений, является возможное изменение сопротивления соединительных проводов.

Термопары используются для измерения температуры и перепада температур рабочей жидкости, корпусов гидромашин и т.п.

*Термосопротивления* (термометры сопротивления, терморезисторы) используют явление изменения электрического сопротивления в зависимости от температуры. Термосопротивления бывают металлические и полупроводниковые.

Металлические термосопротивления изготавливаются из материалов, обладающих высокостабильным температурным коэффициентом сопротивления, линейной зависимостью сопротивления от температуры, хорошей воспроизводимостью свойств и инертностью к воздействию окружающей среды. К таким материалам в первую очередь относится платина. Благодаря своей дешевизне широко распространены медные терморезисторы, применяются также вольфрамовые и никелевые.

Диапазон температур, при котором может применяться терморезистор, определяется в основном инертностью его материала.

Медные терморезисторы используются в диапазоне от  $-50$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ , платиновые - от  $-200$  до  $+650^{\circ}\text{C}$ , никелевые - до  $+250...300^{\circ}\text{C}$ , вольфрамовые - до  $400^{\circ}\text{C}$ . Верхние границы диапазонов могут быть повышены при наличии хорошей изоляции материала терморезистора от окружающей среды.

Полупроводниковые терморезисторы на основе индия, германия и кремния отличаются от металлических значительно меньшими габаритами и большей чувствительностью.

Недостатками полупроводниковых терморезисторов являются ограниченный диапазон измеряемых температур (от  $-60$  до  $+100...125^{\circ}\text{C}$ ) и нелинейность зависимости между температурой и сопротивлением, что вызывает необходимость применения специальных корректирующих элементов.

Погрешности, возникающие при измерении температуры термометрами сопротивления, вызваны нестабильностью во времени начального сопротивления и температурного коэффициента сопротивления, изменением сопротивления линии, соединяющей термометр с измерительным прибором, перегревом термометра измерительным током.

Тем не менее термометры сопротивления относятся к одним из наиболее точных преобразователей температуры. На основе платины и полупроводников могут быть получены терморезисторы с погрешностью порядка  $0,001^{\circ}\text{C}$ .

В практике технических измерений используются и другие типы датчиков, однако их применение ограничено чаще всего специфическими задачами.

Некоторые из них, которые могут использоваться для решения отдельных задач диагностики гидроприводов, описаны ниже.

### Средства измерения давления

Измерение давления при диагностировании гидроприводов машин производится в различных точках линий низкого и высокого давления: в баке гидросистемы, на входе и выходе насоса, на входе и выходе диагностируемого гидроагрегата, в сливных и дренажных магистралях.

Динамические процессы, происходящие в гидросистемах машин, требуют измерения быстро изменяющегося и пульсирующего давления. Диапазон измеряемого низкого давления в линиях всасывания составляет от давления вакуума до 0,3 МПа, в линиях слива и дренажа - от 0,1 до 1,0 МПа, в линиях нагнетания - от 5 до 40 МПа. Диапазон частоты измеряемого давления может колебаться от 0,1 до 5... 10 кГц.

Наиболее простыми и надежными приборами для измерения избыточного давления являются пружинные манометры, а для измерения разрежения - вакуумметры. Параметры и размер; манометров регламентирует ГОСТ 8625-77 Е.

Манометры предназначены для измерения постоянного или плавно изменяющегося давления при отсутствии вибрации (за исключением особых случаев). Поэтому их целесообразно применять в диагностических стационарных и передвижных стендах, а также в установках для тарирования датчиков давления другого типа. При применении манометров для измерения пульсирующего давления их следует оснащать демпферами.

Кроме манометров, в диагностических устройствах и стендах используют датчики, преобразующие деформацию измерительного чувствительного элемента (мембраны, сильфона, балки, пружины, струны) в электрический сигнал.

Для преобразования давления в электрический сигнал используют описанные выше типы датчиков: *потенциометрический, тензо-метрический, электромагнитный, емкостный, пьезоэлектрический и вибрационно-частотный*

В электромагнитном датчике прогиб мембраны или деформация сильфона под действием давления приводит к изменению характеристик магнитной цепи первичного датчика. Чувствительный элемент емкостного прибора изменяет емкость в цепи датчика. Выходным сигналом пьезоэлектрического датчика является разность потенциалов, возникающая на кристалле при воздействии на него давления рабочей среды. В вибрационно-частотном приборе деформация чувствительного элемента - мембраны - вызывает изменение напряжений растяжения на ней, собственная частота которой зависит от этих напряжений и является информативным параметром выходного электрического сигнала.

В большинстве датчиков давления для преобразования давления в перемещение используются упругие элементы в виде плоских и гофрированных круглых мембран с отношением толщины к диаметру в пределах от 0,1 до 0,02.

При измерении давления жидкости возникает специфическая задача неискаженной передачи этого параметра на вход датчика давления без нарушения условия функционирования контролируемого объекта. Соответственно к присоединительным элементам датчика давления предъявляются, с одной стороны, требования точности преобразования, а с другой - требования герметичности и механической прочности.

Очень часто датчики давления присоединяют к контролируемым объектам с помощью трубопроводов. При статическом давлении коэффициент преобразования трубопровода постоянен и равен единице. При быстро изменяющемся давлении требуется определение динамических характеристик присоединительных трубопроводов, характеризуемых собственной частотой колебаний среды в них. В настоящее время созданы полупроводниковые миниатюрные датчики давления с возможностью их встраивания непосредственно в гидроагрегаты.

Для удобства и быстроты монтажа датчиков в гидравлическую систему необходимо предусмотреть в конструкции гидравлической системы элементы сопряжения. Это совокупность узлов, позволяющая при эксплуатации, ремонте, техническом обслуживании и наладке гидравлических



систем быстро подсоединить к гидроприводу датчик давления для измерения избыточного давления или вакуума без остановки и разгерметизации гидропривода, выпускать воздух из гидравлических систем и гидроприводов, отбирать пробы масла для анализа, легко измерить давление в труднодоступных местах гидропривода.

### **Средства измерения пульсации давления**

Неравномерность подачи насосов определяется особенностями кинематики, а также несовершенством процесса распределения рабочей жидкости. Кинематическая неравномерность подачи оказывает незначительное влияние на амплитуду пульсации давления. Основной причиной повышенной пульсации давления в напорных магистралях насосов и гидромоторов являются перепады давления в рабочих камерах, наблюдаемые в момент перехода замкнутого надпоршневого объема жидкости через перемычку плоского распределителя, разделяющую окна всасывания и нагнетания. При этом механизм возникновения пульсации давления объясняется следующим. Когда цилиндр с рабочей жидкостью при давлении магистрали всасывания пройдет через перемычку и соединится с окном нагнетания и давлением магистрали нагнетания, которое на несколько порядков выше давления всасывания, произойдет мгновенное выравнивание давления под действием обратного потока жидкости из нагнетательного окна в цилиндр. Обратный поток жидкости вызывается сжатием заключенной в цилиндре жидкости с давлением всасывания (включая сжатие возможного нерастворенного воздуха) до давления нагнетания. Обратный поток определяется перепадом давления, упругостью рабочей жидкости, объемом надпоршневого пространства в цилиндре, деформацией цилиндра при возрастании в нем давления.

При длительной работе поршневых насосов и гидромоторов в результате изнашивания возникают осевые люфты, радиальные зазоры между поршнями и отверстиями в блоке цилиндров, износ распределителя, щечек кардана и другие неисправности. Это нарушает работу насоса и способствует увеличению амплитуды пульсации давления.

Параметры пульсации давления, связанные с кинематической структурой насосов и гидромоторов, могут быть использованы для определения технического состояния отдельных кинематических пар этих механизмов. Переходные процессы, вызывающие колебания давления (волновые процессы) в системах гидравлического привода, могут быть также вызваны изменением нагрузки на исполнительном органе, внезапными остановками движущихся частей гидропривода, срабатыванием гидроаппаратуры управления или регулирования и другими причинами.

Для измерения пульсации давления применяют тензорезисторные, индуктивные, емкостные, магнитные, пьезоэлектрические и другие преобразователи. Основные требования к преобразователям измерения пульсации давления следующие: высокая чувствительность и возможность ее регулирования, универсальность, широкий диапазон рабочих частот, возможность работы в условиях повышенной вибрации, малые размеры, надежность и долго вечность, широкий диапазон рабочих температур (от  $-40$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ ).

Основными параметрами преобразователей, которые можно использовать для измерения пульсации давления, являются чувствительность (В/МПа) и частотный диапазон (Гц). Эти два параметра зачастую взаимосвязаны, поэтому при выборе типа преобразователя иногда приходится ограничиваться одним параметром. Обычно частотный диапазон для измерения пульсации давления рассматривают для всего измерительного канала, который включает в себя первичный преобразователь, согласующую аппаратуру, усилитель сигнала и регистрирующую аппаратуру.

Выбор необходимого преобразователя измерения пульсации давления определяется потребностью проводимого эксперимента. Для измерения пульсации давления могут использоваться многие типы преобразователей для измерения давления. Главное условие их применения — это приемлемая чувствительность и рабочий диапазон частот.

Длительность импульсов от отдельных поршневых пар определяется скоростью выравнивания давления между цилиндром и линией нагнетания (скоростью распространения колебаний в жидкости), а также временем выбирания осевого люфта. Как показывают исследования, длительность импульсов от отдельных поршневых пар составляет  $0,008 \dots 0,0001 \text{ с}$ , следовательно, верхняя частота преобразователя (канала) измерения пульсации давления должна быть не менее  $f_s = 1/\Delta t = 10 \text{ кГц}$ .

При решении вопросов диагностирования гидравлических машин большое значение имеет

правильный выбор параметров пульсации давления в напорной линии гидропривода, по которым возможна объективная оценка технического состояния гидромашин. Как отмечалось, параметры пульсации давления в нагнетающей линии характеризуют техническое состояние деталей качающего узла поршневых насосов и гидромоторов.

Как показывают исследования, на амплитуду пульсации давления (ее абсолютное значение) оказывают значительное влияние такие факторы, как изменение температуры и давления рабочей жидкости, частота вращения вала насоса, конструктивные особенности напорной линии, наличие нерастворенного воздуха в жидкости и др.

Соблюдение постоянства этих факторов при проведении технического диагностирования непосредственно на реальном объекте очень сложно.

Относительные параметры пульсации давления менее чувствительны к изменению температуры, давления жидкости, частоты вращения вала насоса и конструктивным особенностям системы гидропривода.

В связи с этим при диагностировании аксиально-поршневых насосов используются следующие относительные параметры пульсации давления:

$$\eta_1 = \frac{\Delta p_{\max}}{\Delta p_{\text{ср}}}; \quad \Delta p_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta p_i; \quad \eta_2 = \frac{\Delta p_{\max}}{p_{\text{ср}}}; \quad \eta_3 = \frac{\Delta p_{\max} - \Delta p_{\min}}{\Delta p_{\max}}, \quad (5.1)$$

где  $\Delta p_{\max}$  и  $\Delta p_{\text{ср}}$  - математические ожидания максимального и среднего прямолинейного значения амплитуд пульсации давления;  $\Delta p_i$  - текущая амплитуда пульсации давления;  $p_{\text{ср}}$  - давление рабочей жидкости в линии, где установлен преобразователь;  $\Delta p_{\min}$  - математическое ожидание минимальной амплитуды пульсации в реализации процесса функционирования насоса

Относительный параметр пульсации  $\eta_1$  давления малочувствителен к изменению температуры и давления рабочей жидкости в системе гидропривода, но имеет ограниченное использование, так как при увеличении числа неисправных поршневых пар значение  $\Delta p_{\text{ср}}$  приближается к значению  $\Delta p_{\min}$ . Он может быть использован, если число неисправных поршневых пар не превышает 2...3.

На относительный параметр пульсации давления  $\eta_2$ , как показывают результаты исследований, влияет изменение давления и температуры рабочей жидкости, поэтому использование его в качестве критерия диагностирования технического состояния насосов возможно только при условии стабильного режима работы системы.

На относительный параметр  $\eta_3$  слабо влияет изменение температуры и давления в системе гидропривода, хотя его диагностическая ценность теряется, если в насосе будут неисправны все поршневые пары. Анализ материалов дефектации насосов, поступивших в ремонт, показал, что исследуемые насосы (32 шт.) после отработки межремонтного ресурса имеют минимум две поршневые пары с осевыми люфтами, не вышедшими за пределы допуска (0,06 мм).

Экспериментально установлено, что такие суммарные осевые люфты не вызывают увеличения амплитуд пульсации давления, поэтому в пульсационном спектре, отражающем процесс функционирования насоса, всегда присутствует величина  $\Delta p_{\text{ср}}$ , соответствующая исправной поршневой паре. Другие неисправности деталей качающего узла (радиальные зазоры в поршневой паре, изношенные распределительный золотник и щеки карданного вала) также приводят к возрастанию амплитуд пульсации давления. В связи с этим целесообразно использовать обобщенный параметр (суммарный осевой люфт) технического состояния качающего узла насоса. Он устанавливается из следующих соображений. Каждый насос в соответствии с нормативной технической документацией имеет ограничения амплитуды пульсации давления. Например, для аксиально-поршневых насосов постоянной подачи максимальная амплитуда пульсации ограничивается 10...20 % номинального давления в системе гидропривода. Предельное значение амплитуды пульсации давления вызывается работой насосов с суммарными осевыми люфтами,  $s=0,32$  мм. Тогда в качестве обобщенного параметра технического состояния насоса принимается такой параметр общего технического состояния деталей качающего узла, при котором изменение параметра  $\eta_3$  будет аналогично его изменению, как и при суммарном осевом люфте, равном 0,32 мм.

Установлено, что ухудшение технического состояния отдельных деталей качающего узла насоса приводит к увеличению диагностического параметра  $\eta_3$ . Использование  $\eta_3$  в качестве

обобщенного диагностического параметра значительно упрощает средства диагностирования. Однако конкретно трудно установить, какая кинематическая пара качающего узла неисправна, если не использовать дополнительную информацию о техническом состоянии насоса и других его параметрах.

### Средства измерения расхода жидкости

Одним из основных параметров для диагностирования агрегатов систем гидравлического привода является расход рабочей жидкости. Диапазоны его изменения находятся в пределах от 0,1 до 10 см<sup>3</sup>/мин при диагностировании распределительных и регулирующих устройств и до 10<sup>6</sup> см<sup>3</sup>/мин при диагностировании гидромашин. Это требует выбора или разработки средств диагностирования, позволяющих производить измерение расходов в широком диапазоне и с высокой точностью.

Измерение расхода рабочей жидкости производится *прямым, объемным, массовым* методами и *посредством гидромотора* в качестве расходомера.

Прямой метод состоит в непосредственном измерении приборами, указанными в табл. 5.5 и 5.6.

Таблица 5.5

Основные технические характеристики различных типов расходомеров

Тип расходомера	$\varepsilon$ , %	T, с	ЧП	S, %	РП
Переменного $\Delta p$	1...3	$10^{-1}$ ...1	+	100	-
Постоянного $\Delta p$	0,5...3	1...3	+	50	-
Объемные	0,1...0,5	$10^{-1}$ ...1	+	150	-
Турбинные	0,5...2	$10^{-3}$ ... $10^{-1}$	+	200	-
Гироскопические	2...5	$10^{-3}$ ... $10^{-1}$	+	200	+
Электромагнитные	1...3	$10^{-3}$ ... $10^{-1}$	-	200	+
Ультразвуковые	1...1,5	$10^{-6}$ ... $10^{-3}$	-	400	+
Неконтактные тепловые	0,5...3	1...180	-	150	+
Контактные тепловые	0,5...3	$10^{-3}$ ... $10^{-1}$	+	200	+
Вихревые	0,5...2	$10^{-3}$ ...1	-	500	-
Лазерные	0,1...0,5	$10^{-7}$ ... $10^{-4}$	-	1000	+
Меточные	1...3	$10^{-3}$ ... $10^{-1}$	-	200	+
Гидроэлектрические	0,5...3	$10^{-3}$ ... $10^{-2}$	+	300	-
Термоанемометрические	0,5...2	$10^{-4}$ ... $10^{-2}$	+	200	+

Примечания:  $\varepsilon$  - погрешность измерения, T — постоянная времени, ЧП - установка чувствительного элемента в поток, S - сложность устройства, РП - измерение реверсивных потоков.

Наибольшую точность  $\pm(0,1...0,5)\%$  измерения расходов удалось получить при применении расходомеров, осуществляющих объемные методы измерения. В этом случае измеряемые объемы жидкости отсекаются подвижными измерительными элементами (камерными счетчиками). Однако такие расходомеры малонадежны и имеют большое гидравлическое сопротивление и массу.

*Расходомеры переменного и постоянного перепада давления P* основаны на принципе зависимости расхода жидкости через местное сопротивление от перепада давления на нем. Ввиду низкой точности, неустойчивости к вибрации, большого гидравлического сопротивления и других недостатков эти расходомеры являются неприемлемыми при диагностировании.

Надежность и простота расходомера в большой степени определяются отсутствием подвижных измерительных элементов и трущихся опор. Например, *турбинные и гироскопические расходомеры* имеют по сравнению с камерными меньшие размеры и массу, но погрешность у них значительно снижает их надежность и срок службы.

*Электромагнитные расходомеры* применяются лишь для измерения электропроводных жидкостей. Чистые гидравлические масла, применяемые в системах гидропривода, не электропроводны, поэтому такой расходомер принципиально неприменим для этих систем.

*Ультразвуковые* методы измерения расхода основаны на явлении смещения акустических колебаний движущейся средой.



Таблица 5.6

Приборы для измерения расхода рабочей жидкости прямым методом				
Тип расходомера	Класс точности	Диапазон измерения, м <sup>3</sup> /с	P <sub>max</sub> , МПа	Примечание
Тахометрические крыльчатые	0,2...1	0,07...0,7	20	
	0,5...1	15...25·10 <sup>3</sup>		
Тахометрические шариковые	1,0; 1,6; 2,5	10 <sup>-4</sup> ...0,5	16	Применяют при $\mu < 12 \text{ мм}^2/\text{с}$
Расходомеры переменного перепада давления	1,0; 1,5	1...5	100	Применяют при $D_v \geq 50 \text{ мм}$ и $u < 5 \text{ м/с}$
Ультразвуковые	1...2	3·10 <sup>-3</sup> ... 5·10 <sup>-6</sup>	1	
Расходомерный комплекс "НОРД"	0,5; 1; 2,5	0,1...2,5	25; 64; 160	Автоматическое измерение и регистрация расхода жидкости
Тахометрические комплексы с датчиками ТДР, преобразователями ПЧ и индикаторами ЦУР	0,5; 1,0; 2,5; 5,0	3·10 <sup>-5</sup>	2,5; 20; 40	

Актуальной задачей является создание малых по габаритам и массе, а также достаточно простых и надежных в эксплуатации встроенных ультразвуковых преобразователей для измерения малых расходов жидкости в гидросистемах с высокой точностью.

В *контактных и неконтактных тепловых расходомерах* выходной сигнал, по которому судят о расходе, зависит от разности температур в сечениях потока, расположенных до и после нагревателя. Основным недостатком таких расходомеров является нагрев всего или части измеряемого потока, а, следовательно, и большая инерционность.

Большая погрешность измерения и значительные габариты и масса не позволяют применить их для диагностирования гидросистем.

Новые типы расходомеров - *лазерные и вихревые* - относятся к расходомерам повышенной точности, но ввиду больших габаритов и массы, а также большой сложности и стоимости применение их в гидросистемах затруднено.

*Меточные расходомеры* основаны на контроле движения меток. Приборы имеют устройство, периодически создающее ту или иную метку в потоке и осуществляющее контроль за ее перемещением на определенном участке пути в потоке, и измеритель скорости потока как функции, связанной с каким-либо параметром (временем, сдвигом фазы, частотой повторения меток и т. д.), характеризующим движение метки на данном участке пути. Создание измерительных меток может быть осуществлено различными способами тепловым, оптическим, химическим, ионизационным, ядерно-магнитным, вихревым и др. Хотя ресурс и надежность меточных расходомеров высокие, формирование устойчивой во времени метки без внесения инородных тел в измеряемую жидкость представляется довольно трудным. Однако при условии решения этой задачи такой метод в будущем может занять одно из ведущих мест в измерении малых расходов при диагностировании агрегатов гидравлического привода.

*Электрогидродинамические преобразователи* с аналоговым электрическим сигналом основаны на использовании зависимости плотности электрического тока в предварительно заряженном потоке диэлектрической жидкости от расхода. Недостатками этих преобразователей являются: необходимость стабилизированного источника высокого напряжения для питания и большое гид-

равлическое сопротивление поток) жидкости.

Электрокинетические первичные преобразователи расхода жидкости в электрический сигнал не предусматривают наличия в своей структуре дополнительных источников высокого напряжения, что значительно упрощает их конструкцию. Принцип действия этих преобразователей основан на использовании электрических явлений, возникающих при протекании жидкости через малые отверстия (капилляры), выполненные, как правило, из диэлектрического материала. При этом сила генерируемого тока линейно зависит от средней скорости потока рабочей жидкости. Ввиду большого гидравлического сопротивления, зависимости выходного сигнала от температуры рабочей жидкости и малой помехозащищенности применение таких преобразователей для диагностирования гидросистем ограничено.

*Термоанемометры* давно используются для измерения расходов воздуха. Чувствительным элементом термоанемометра является очень тонкая короткая металлическая нить, которая нагревается электрическим током. Нить охлаждается протекающим воздухом (жидкостью), что вызывает уменьшение температуры и, следовательно, снижение ее электрического сопротивления. В качестве измеряемой величины, по которой определяют расход, служит температура преобразователя при постоянной мощности нагрева, мощность, сила тока или напряжение при условии поддержания постоянной температуры преобразователя. Применение металлической нити в качестве чувствительного элемента расходомера для гидросистем исключается ввиду низкой механической прочности нити и трудности ее электрической изоляции от потока измеряемой жидкости.

Более приемлемыми являются *полупроводниковые микротермо-сопротивления (термисторы)*. Эти датчики обладают хорошими прочностными свойствами, электроизолированы от потока, имеют малые габариты и массу, а также обладают на порядок большей чувствительностью, чем термоанемометры с металлическими нитями. Термоанемометрический способ измерения расхода жидкости является приемлемым для диагностирования систем гидравлического привода.

*Объемный метод* состоит в измерении объема рабочей жидкости при одновременном определении времени заполнения мерного сосуда или протекания жидкости через счетчик. Расход жидкости подсчитывается по формуле

$$Q = V/t,$$

где  $V$  - измеряемый объем,  $t$  — время заполнения сосуда или протекания через счетчик.

Этот метод позволяет проводить измерения с точностью, недоступной для других методов измерения расхода. Однако вследствие громоздкости и больших затрат времени для проведения измерений он используется в основном для тарировки других средств измерения расхода.

Приборы для измерения объема рабочей жидкости указаны в табл.5.7.

Весовой метод состоит в измерении массы  $m$  жидкости взвешиванием на весах с одновременным замером времени  $t$  заполнения емкости и плотности  $\rho$  этой массы. Плотность замеряется денсиметрами или пикнометрами.

Расход  $Q$  жидкости определяется по формуле

$$Q = \frac{m}{t \cdot \rho}.$$

При измерении расхода посредством гидрометра параметр движения жидкости рассчитывается по формуле

$$Q = q \cdot \omega,$$

где  $q$  - рабочий объем гидрометра,  $\omega$  - частота вращения его вала.

Таблица 5.7

Приборы для измерения объема рабочей жидкости

Измерительный прибор	Относительная погрешность, %	Диапазон измерения, м <sup>3</sup> /с	$p_{\max}$ , МПа
Мерные емкости, стеклянные <sup>1</sup>	-	-	0
Металлические мерники <sup>2</sup>	$\pm (0,2 \dots 0,5)$	-	0
Стационарные мерные баки	$\pm (0,5 \dots 1)$	-	0
Счетчики с овальными шестернями	$\pm 0,5$	$3 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-2}$	40
Счетчики жидкости кольцевые	$\pm (0,2 \dots 0,5)$	$3 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3}$	40

Примечания: <sup>1</sup> - вместимость 5...10 л; <sup>2</sup> - вместимость 0,5...50 л.

### Средства измерения температуры

Выбор метода измерения температуры при диагностировании гидроприводов определяется следующими основными факторами: областью измеряемых температур, чувствительностью и точностью термопреобразователя, инерционностью датчика, внешними условиями проведения измерений, доступностью средств измерения.

Наибольшее распространение получили следующие типы термопреобразователей: термопреобразователи, основанные на тепловом расширении жидкостей, газов и твердых тел; термоэлектрические термопреобразователи (термопары); металлические термопреобразователи сопротивления; полупроводниковые термопреобразователи сопротивления (термисторы); термочувствительные кварцевые резонаторы; бесконтактные датчики измерения температуры; термоиндикаторы.

*Жидкостно-стеклянные преобразователи температуры (термометры)* используют для измерения температур от  $-50$  до  $+(500...700)^{\circ}\text{C}$ . Точность измерения составляет  $0,1...1^{\circ}\text{C}$  у технических термометров и  $0,01...0,05^{\circ}\text{C}$  у лабораторных.

Преимущества жидкостных термометров — простота конструкции, высокая стабильность, невысокая стоимость изготовления. Термометры могут применяться для измерения температуры рабочей жидкости в гидробаках диагностируемых гидросистем, в лабораторных устройствах для измерения вязкости и плотности, в гидробаках испытательных стендов. Широко используются жидкостные термометры при тарировке других типов термопреобразователей.

*Манометрические преобразователи температуры* предназначены для измерения температуры от  $-100$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ . Принцип действия их основан на использовании зависимости между температурой и давлением рабочего тела, заключенного в герметически замкнутый объем. По конструктивному исполнению они могут быть показывающие, самопишущие и комбинированные. Точность измерения  $1...2\%$ .

Преимущества таких преобразователей — простота конструкции, виброустойчивость, возможность дистанционного измерения температуры. Недостаток — значительные габариты, низкая точность измерения. Такие преобразователи целесообразно применять для измерения температуры жидкости в гидросистемах машин и стендов.

*Биметаллические преобразователи* применяют в широком диапазоне температур. Принцип действия основан на тепловом расширении твердых тел, состоящих из сваренных пластин с разными коэффициентами расширения. При нагревании биметаллических элементов происходит их деформация, которая приводит в действие указательную систему.

Преимущества — простота конструкции, надежность в работе. Биметаллические преобразователи применяют в качестве элементов компенсации температурных погрешностей приборов и для измерения температуры жидкости и окружающей среды.

Принцип действия *термоэлектрических преобразователей* основан на создании в них термоэлектродвижущей силы при разности температур в местах соединения двух разнородных проводников. Особенностью измерения температуры посредством термопреобразователей является необходимость стабилизации температуры свободных концов либо компенсация влияния изменения этой температуры.

Термоэлектрическими преобразователями можно измерять температуру от  $-200$  до  $+1000^{\circ}\text{C}$  с высокой точностью. При температуре от  $0$  до  $100^{\circ}\text{C}$  можно определять разность температур с точностью до  $0,01^{\circ}\text{C}$ . Материалы для термопары подбирают так, чтобы в одном электроде возникала положительная термоэлектродвижущая, а в другом — отрицательная термоэлектродвижущая сила. Термопары изготавливают из благородных и неблагородных металлов. Термопары из благородных металлов применяют для измерения высоких температур и при точных измерениях. Для измерения температуры при диагностировании гидроприводов допускается использовать термопары из неблагородных металлов и сплавов. Существуют следующие виды термоэлектрических преобразователей: хромель-копелевые (ХК) — положительный электрод хромелевый, отрицательный — из сплава копель; хромель-алюмелевые (ХА) — положительный электрод из хромеля, отрицательный — из сплава алюмель.

Находят применение также медь-константановые, имеющие высокую стабильность и воспро-



изводимость во времени, а также железо-копелевые и медь-копелевые термоэлектрические преобразователи.

В тех случаях, когда измерение температуры рабочей жидкости и температуры поверхности гидроагрегатов стандартными термоэлектрическими преобразователями затруднено, применяют термопреобразователи специальные. Уменьшение диаметра термоэлектродов (0,1 ... 0,2 мм) значительно понижает инерционность термоэлектрических преобразователей. Для увеличения чувствительности используют несколько термоэлектрических преобразователей, образующих термобатарею.

Принцип действия металлических термопреобразователей сопротивления основан на свойстве металлов изменять сопротивление при изменении температуры.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает стандартные и нестандартные термометры сопротивления с применением платиновой (ТСП) или мелной (ТСМ) проволоки. С помощью термометров сопротивления с платиновой проволокой можно измерять температуру от -260 до +1100°С, а с помощью термометров сопротивления с медной проволокой от -50 до +180°С. Свойства большинства видов термопреобразователей сопротивления регламентирует ГОСТ 6651 - 84.

*Полупроводниковые терморезисторы* по сравнению с металлическими термопреобразователями имеют больший температурный коэффициент сопротивления. Это позволяет изготавливать полупроводниковые терморезисторы малых размеров с высоким быстродействием. С помощью этих терморезисторов можно измерить температуру от -200 до +1000°С. В основном полупроводниковые терморезисторы применяют для измерения температур от -60 до +125°С.

К недостаткам полупроводниковых терморезисторов можно отнести нелинейный характер зависимости электрического сопротивления от температуры, разброс сопротивления (до 20%) даже для одного типа полупроводникового терморезистора, малую допустимую мощность рассеивания. Поэтому трудно обеспечить взаимозаменяемость полупроводниковых терморезисторов, в результате чего погрешность измерения температуры при их замене может составлять 1-2% и более. При индивидуальной тарировке погрешность не превышает 0,01-0,1 %.

Для измерения температуры рабочих жидкостей при избыточном давлении полупроводниковые терморезисторы помещают в защитные кожухи, имеющие высокую теплопроводность, а для уменьшения их инерционности свободную полость заполняют теплопроводной пастой.

Вес большее распространение в качестве термопреобразователей получают полупроводниковые элементы с р-п-переходами. Из них следует выделить диоды, транзисторы, стабилитроны. Преимуществами данных термопреобразователей являются хорошая линейность в диапазоне температур -20...+100°С, приближающаяся к линейности металлических термопреобразователей с платиновой проволокой, высокая температурная чувствительность, малые габариты, небольшая тепловая постоянная времени.

Изменение температуры полупроводникового слоя вызывает линейное изменение контактной разности потенциалов коллекторного перехода р-п с постоянным температурным коэффициентом, равным для кремния 2мВ/°С. Применение соответствующих цифровых вольтметров позволяет проводить измерение температуры с погрешностью не более  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Чувствительность термопреобразователя, выполненного на основе транзисторов, превосходит чувствительность диодных термопреобразователей.

Получение возможности изменять выходные электрические параметры транзисторов с помощью управляющего входа позволяет создавать на их основе широкопредельные термочувствительные элементы. Практически любой кремниевый транзистор может быть использован как линейный термопреобразователь в диапазоне температур -50...+125°С, однако предпочтение следует отдавать транзисторам в металlostеклянных корпусах. Эти транзисторы обеспечивают лучшую теплопередачу, чем пластмассовые и стеклянные.

Термопреобразователи в виде термочувствительных кварцевых резонаторов представляют перспективную основу для развития термодинамического метода диагностирования гидроагрегатов машин. Пьезоэлектрический резонатор представляет собой акустически изолированный эле-

мент, выполненный из монокристаллического или поликристаллического пьезо материала с нанесенными на его поверхности или расположенными в непосредственной близости от него токопроводящими электродами. Для возбуждения колебаний к электродам резонатора подводится переменное напряжение.

Термочувствительные кварцевые резонаторы, выполненные на основе пьезорезонаторов с линейной температурно-частотной характеристикой, имеют достаточно высокий коэффициент термочувствительности (20... 1000 Гц/°С), высокую температурную стабильность, выделяют небольшую мощность в исследуемую среду. Эти резонаторы целесообразно применять при измерении температуры от -60 до +120°С с разрешающей способностью от 0,01 до 0,001 °С.

По быстродействию термочувствительные кварцевые резонаторы уступают терморезисторам и термоэлектрическим преобразователям, но по чувствительности, линейности, стабильности характеристик они значительно превосходят остальные типы термопреобразователей.

В качестве бесконтактных датчиков температуры применяют различные устройства, работающие с использованием бесконтактных методов измерения температуры (оптических, ультразвуковых, радиометрических). В настоящее время наибольшее распространение получили оптические методы. Оптико-электронные устройства бесконтактного измерения температур называют пирометрами. Устройства, предназначенные для создания видимых изображений объектов благодаря различным излучательным свойствам отдельных участков этих объектов и окружающего фона, называют тепловизорами. К преимуществам оптических методов измерения температуры можно отнести возможность измерения на расстоянии, высокое быстродействие, отсутствие влияния измерительного прибора на измеряемый объект.

*Термоиндикаторы* бывают в основном двух типов, индикаторы плавления, которые при достижении определенной температуры переходят из твердого состояния в жидкое, и термокраски, изменяющие свой цвет при нагреве до критических температур. Основным недостатком термокрасок является их плохая адгезия с исследуемой нагреваемой поверхностью.

Термоиндикаторы наносятся на объект в виде полосок шириной 7...10 мм в порядке увеличения критической температуры изменения цвета (плавления). С помощью термоиндикаторов получены хорошие результаты измерения температуры поверхностей корпусов насосов, гидромоторов и дроссельных элементов.

### **Средства измерения крутящего момента**

Приборы для измерения крутящего момента приведены в табл.5.8. Номинальная мощность балансирующих динамометров не должна превышать номинальной мощности испытуемого устройства более чем в 2 раза. Погрешность силоизмерителей должна быть не более  $\pm 0,1\%$  максимального значения шкалы.

### **Методы и средства диагностики по КПД**

Назначением гидропривода в любой машине является преобразование механической энергии приводного двигателя в энергию потока жидкости и далее в механическую энергию исполнительных органов.

Изменение технического состояния того или иного гидроагрегата поразному сказывается на снижении производительности машины. Больше всего уменьшается производительность машины при снижении эффективности работы насоса. Время работы отдельных исполнительных гидродвигателей (гидромоторов и гидроцилиндров) составляет от 5 до 25 % времени работы насоса, а отдельных распределительных устройств 15...30%,

Для определения технического состояния элементов гидроприводов при эксплуатации необходимо выбрать способ контроля, который обеспечивал бы эффективную оценку при наименьших затратах и позволил бы определять те параметры, изменение которых при эксплуатации приводит к максимальным потерям. Кроме того, выбранные параметры должны позволять осуществлять контроль технического состояния элементов гидропривода без снятия их с машины и без разборки. Этим требованиям прежде всего отвечает контроль технического состояния гидропривода по коэффициенту полезного действия.

Таблица 5.8

Приборы для измерения крутящего момента			
Измерительный прибор	Относительная погрешность, %	Диапазон измерения, Н·м	Частота вращения, с <sup>-1</sup>
<b>Торсионметры</b>			
Крутильные стробоскопические	±1	До 5	До 12000
Крутильные электрические с временным измерением	± (0,5...2)	1...3000	60...600
Крутильные электрические с фазовым измерением	± (0,5...1)	5...400	3000...36000
Крутильные индуктивные	± (1...2)	До 8000	До 60000
Тензометрические с магнитоупругим преобразователем	± 1,5	250...7500	До 300
тензометрические омические	± 1,5	100...200	До 3000
<b>Балансирные динамометры</b>			
Электрические постоянного тока	± (0,1...0,2)	До 5000	60...3600
Электрические переменного тока	± (0,2...0,5)	До 100	До 6000
Гидравлические тормозные	От ± 0,1	До 10000	180...60000
Механические тормозные	± (1...5)	До 2000	До 1800
Электромагнитные тормозные	± (0,5...2)	До 2000	До 1800

При эксплуатации вследствие изнашивания элементов происходит увеличение внутренних утечек в гидромашине, что приводит к снижению ее объемного  $\eta_{об}$  и полного  $\eta$  КПД, которые связаны известным соотношением:

$$\eta = \eta_{об} \cdot \eta_{мех}, \quad (5.2)$$

где  $\eta_{мех}$  - механический КПД, учитывающий потери мощности гидромашин на преодоление сил трения в ее подвижных элементах.

Контроль объемного КПД гидромашин при эксплуатации позволяет оценить внутренние утечки и, таким образом, дать определенную интегральную оценку ее технического состояния без демонтажа и разборки.

Объемный КПД насоса

$$\eta_{об} = Q_{ф} / Q_{т}, \quad (5.3)$$

где  $Q_{ф}$  и  $Q_{т}$  - фактическая и теоретическая подача насоса.

Согласно требованиям ГОСТ 14658-86 при приемосдаточных испытаниях насосов следует определять коэффициент подачи  $K_Q$  — параметр, соответствующий объемному КПД:

$$K_Q = Q^* / Q_{но}, \quad (5.4)$$

где  $Q^*$  - подача насоса при номинальном давлении  $p_n$ ,  $Q_{но}$  - подача насоса при минимально возможном давлении  $p_0$ .

Минимально возможное давление в ряде гидроприводов может составлять 3...15 % номинального давления. Погрешность, возникающая при определении  $K_Q$ , может быть устранена, если коэффициент подачи

$$K_Q = \frac{Q^* \cdot (p_n - p_0)}{Q_{но} \cdot p_n - Q^* \cdot p_0}. \quad (5.5)$$

Измерение  $Q$  и  $Q_{но}$  следует производить при постоянной частоте вращения вала насоса, но так как при диагностировании мобильных машин поддерживать постоянную частоту вращения практически невозможно, то необходимо привести подачу к номинальной частоте вращения:

$$Q_{н.пр} = Q_{н.изм} \cdot n_{ном} / n_{исп} \quad (5.6)$$

где  $Q_{н.гр}$ ,  $Q_{н.изм}$  - приведенная и измеренная подача насоса;  $n_{н.н}$ ,  $n_{н.изм}$  - номинальная и полученная при испытаниях частота вращения.

При диагностировании двохенных насосов с регулятором мощности параметры технического состояния определяют отдельно для каждого качающего узла. Если регулятор мощности срабатывает при давлении ниже номинального, что легко установить по значительному уменьшению подачи при повышении перепада давления, то коэффициент подачи определяют при давлении на 0,5...0,7 МПа меньшем давления, соответствующего началу регулирования.

Характеристику регулятора определяют, нагружая обе секции одновременно и обеспечивая работу сумматора регулятора мощности во всем диапазоне регулирования. Полученные результаты сопоставляют с диаграммой мощности для данного типа насоса, приведенной в паспорте.

При диагностировании следует поддерживать постоянную температуру рабочей жидкости, близкую к номинальной для данного типа гидропривода, так как она оказывает значительное влияние на вязкость жидкости. Наименьшее изменение вязкости для большинства жидкостей происходит в зоне температур около 50°C, поэтому при диагностировании температура должна быть 50 ± 5°C.

Диагностирование гидромоторов по объемному КПД также производят при оптимальной температуре рабочей жидкости и постоянном направлении вращения вала. Объемный КПД гидромоторов

$$\eta_{об.м} = q_m \cdot n_m / (Q_{м.ф} + Q_{м.ут}), \quad (5.7)$$

где  $q_m$  - рабочий объем гидромотора;  $n_m$  - частота вращения вала гидромотора;  $Q_{м.ф}$  - фактический расход на выходе из гидромотора;  $Q_{м.ут}$  - расход утечек жидкости.

Расход утечек рабочей жидкости в дренажной гидролинии и потребляемый гидромотором расход измеряют при одинаковых параметрах

Параметром, определяющим эффективность преобразования механической энергии в энергию потока жидкости в гидромашине, является полный КПД:

$$\eta = N_{вых} / N_{пр}, \quad (5.8)$$

где  $N_{вых}$  и  $N_{пр}$  - соответственно выходная и приводная мощность гидромашин.

Полный КПД гидромашин является комплексным параметром, поскольку он характеризует объемные и механические потери. Следовательно, полный КПД гидромашин может служить диагностическим параметром, определяющим эффективность ее работы и несущим информацию о техническом состоянии.

Измерение полного КПД при диагностировании гидроприводов в эксплуатационных условиях затруднено, что объясняется значительной сложностью измерения крутящего момента на валу гидромашин. В связи с этим при диагностировании элементов гидропривода в условиях эксплуатации определения полного КПД целесообразно проводить термодинамическим методом, позволяющим определить техническое состояние гидромашин различных типов единым комплектом диагностической аппаратуры. Наиболее распространенным диагностическим параметром гидропривода является объемный КПД, характеризующий внутреннюю не герметичность гидромашин. Комплексное измерение полного и объемного КПД позволяет дать общую оценку технического состояния гидроагрегатов и гидропривода в целом.

#### 5.10. Средства диагностирования гидравлических агрегатов по параметрам вибрации

Измерение вибрации производится с помощью вибропреобразователей (ВП). Они предназначены для преобразования параметров механических колебаний корпуса механизма в характеристики электрического сигнала. В отечественной практике применяют в основном индукционные и пьезоэлектрические ВП. Другие ВП, например резисторные, емкостные и др., применяют редко.

Принцип действия индукционных ВП основан на использовании эффекта электромагнитной индукции. При пересечении полем постоянного магнита витков катушки в ней индуцируется электродвижущая сила, которая пропорциональна относительной скорости движения магнита и ка-



тушки.

Напряжение на выходе индукционного ВП пропорционально виброскорости:

$$v = k \cdot U_{\text{пик}}, \quad (5.9)$$

где  $U_{\text{пик}}$  - пиковое напряжение на выходе ВП;  $k$  - чувствительность ВП.

Технические данные индукционных ВП приведены в табл. 5.9 [11].

Индукционные ВП имеют высокую чувствительность, и их применяют для измерения вибрации насосов и гидромоторов, имеющих большие габариты и массу. К особенностям индукционных ВП относятся ограничительный частотный диапазон, большие размеры и масса. Эти приборы в основном применяют для контроля роторной механической вибрации с частотой до 500 Гц.

Наибольшее распространение для технического диагностирования агрегатов гидропривода получили пьезоэлектрические ВП (акселерометры) построенные на основе пьезоэффекта.

Таблица 5.9

Основные параметры индукционных ВП		
Параметр	МВ-26В*	МВ-28**
Диапазон контролируемых частот, Гц	40...600	45...1500
Диапазон контролируемых амплитуд виброскорости, мм/с	0.5...100	0.1...20
Неравномерность частотной характеристики, %	±10	±6
Нелинейность амплитудной характеристики, %	±5	±1
Чувствительность, мВ·с/мм	10	4
Температурный диапазон, °С	-60...+250	-55...+370
* - с сейсмической массой в подшипниках качения, ** - с сейсмической массой на подшипниках скольжения)		

Чувствительность акселерометра выражается отношением вырабатываемого им электрического сигнала к воспринимаемому ускорению. Выходным сигналом преобразователя может быть электрический заряд или напряжение с соответствующими единицами измерения пКл·с/м или мВ·с/м. Так как пьезоэффект пропорционален значению инерционных сил, создаваемых сейсмической массой, то чувствительность акселерометра зависит от массы и составляет от 2 до  $10^3$  мВ·с/м.

С помощью ВП измеряют вибрацию в направлении одной какой-то оси  $x$ ,  $y$  или  $z$  в зависимости от того, как они закреплены на объекте диагностирования. Существуют вибропреобразователи, с помощью которых измеряют вибрации по трем осям, например датчик типа 4320 датской фирмы «Бргоэль и Кьер» или вибропреобразователь, измеряющий модуль вектора вибрации.

Частотный диапазон акселерометров определен его собственной частотой колебаний и условиями крепления к объекту. Малая жесткость крепления приводит к уменьшению резонансной частоты. Верхняя рабочая частота  $f_v$  может достигать 80 кГц и обычно не превышает 40% резонансной частоты.

Минимальная рабочая частота  $f_n$  зависит от типа предусилителя. Если в качестве предусилителя применен усилитель заряда, то  $f_n$  определена лишь частотными характеристиками предусилителя. При использовании предусилителя напряжения низшая рабочая частота зависит не только от параметров предусилителя, но и от емкостей кабеля и вибропреобразователя. В этом случае

$$f_n = 1/(2 \cdot \pi \cdot R \cdot C), \quad (5.10)$$

где  $R$  - входное сопротивление предусилителя,  $C$  - эффективная емкость цепи.

Эффективная емкость цепи равна

$$C = \frac{(C_{вп} + C_k) \cdot C_y}{C_{вп} + C_k + C_y}, \quad (5.11)$$

где  $C_{вп}$  и  $C_k$  - емкости соответственно вибропреобразователя и кабеля;  $C_y$  - входная емкость предусилителя.

Предусилители используют в качестве согласующего устройства высокоомного выхода вибропреобразователя с низкоомным входом усилительно-преобразующей и контрольно-измерительной аппаратуры, а также для измерения мощности полезного сигнала.

Преобразующие устройства обеспечивают предварительную обработку вибросигнала. В качестве контрольного параметра могут быть использованы амплитудные значения вибросмещения, виброскорости или виброускорения. Фильтрующие устройства выполняют в виде фильтров низких частот и полосовых фильтров. Их основное назначение - увеличение отношения полезный сигнал — уровень шума в результате устранения составляющих спектра, не несущих информации о состоянии контролируемого узла.

Измерение общего уровня вибрации в широком диапазоне частот в основном недостаточно для своевременного обнаружения неисправности и диагностирования технического состояния агрегатов гидропривода. Это объясняется тем, что многие неисправности, возникающие при эксплуатации гидропривода, приводят к незначительному изменению мощности, виброакустического сигнала в определенном интервале частот спектра. Большинство неисправностей проявляется на определенных дискретных составляющих спектра, энергетические характеристики которых могут быть существенно ниже мощностных характеристик вибрации, создаваемой находящейся в исправном состоянии кинематической парой гидропривода. Например, для гидронасоса такой дискретной составляющей является гармоническая составляющая поршневых пар.

Учитывая случайный характер вибрационных процессов, происходящих в агрегатах гидропривода, такие неисправности трудно зарегистрировать, особенно на начальном этапе их развития. Ряд неисправностей вызывает лишь кратковременные искажения характера вибросигнала с незначительным отклонением его мощности от номинальной. Одинаковые изменения энергетических характеристик спектра в широком диапазоне могут быть вызваны неисправностями различных узлов насоса или гидромотора. Поэтому, зарегистрировав появление неисправности по общему уровню вибрации, зачастую не удастся определить местоположение дефекта. Кроме того, существует возможность искажения вибросигналов при их прохождении по виброакустическому каналу от места возникновения до ВП. Эффективность диагностирования может быть повышена анализом структуры виброэнграмм. Такая методика применяется при наземном техническом обслуживании авиационной техники, при обслуживании наземной техники на станциях технического обслуживания и ремонта.

Исследование структуры реальных виброакустических сигналов в частотной области носит название частотного спектрального анализа и осуществляется анализаторами спектра. Существуют два основных типа анализаторов спектра: последовательного анализа, представляющие собой приборы с единственной, как правило, узкополосной избирательной системой, и работающие в реальном масштабе времени. В зависимости от ширины полосы пропускания их разделяют на октавные, третьоктавные и узкополосные.

Характеристики рассмотренной системы измерения и обработки сигнала вибропреобразователя определяются прежде всего полосой пропускания фильтра анализаторов спектра и временем усреднения. При использовании анализаторов спектра с постоянной полосой частоты пропускания  $\Delta f$  получаемые характеристики спектра пропорциональны функции средней квадратичной спектральной плотности;

$$G(x) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T \cdot \Delta f} \cdot \int_0^T x^2(t) \cdot dt \right], \quad (5.12)$$

где  $x(t)$  - рассматриваемая реализация процесса.

На практике при анализе вибрации  $\Delta f$  и  $T$  являются конечными, и выбор их значения опреде-

ляет достоверность и качество получаемых виброграмм. Так как вибрация представляет собой комбинацию случайных и периодических сигналов, при анализе случайных составляющих спектра уменьшение времени приводит к увеличению среднего квадратичного значения измеряемого параметра; в то же время для периодической вибрации среднее квадратичное значение параметра мало зависит от  $T$ . Поэтому при анализе периодических сигналов выбирается  $T < 1/Af$ ; если преобладает случайная вибрация, то  $T < 2,5/M$ .

В последнее время наибольшее распространение получили анализаторы реального времени анализа, позволяющие оперативно определить спектр вибрации в интересующем диапазоне частот. Серийно выпускаемое оборудование для измерения и обработки вибрации и используемое при проведении экспериментальных исследований имеет, как правило, ограниченный динамический диапазон.

Расшифровка и анализ спектров вибрации корпусов насосов и гидромоторов показали, что подавляющая доля энергии спектра вибросигнала, идущего от вибро преобразователя, приходится на гармонические составляющие основной и кратных ей гармоник, принадлежащих поршневой паре, т.е.  $so-z$  (здесь  $so$  - частота вращения вала насоса;  $z$  - число поршневых пар в гидромашине). Составляющие спектра, принадлежащие другим кинематическим парам (подшипникам, карданном валу), имеют на порядок меньшее значение, и выделить их, особенно у исправных агрегатов или у агрегатов с ранней стадией развития дефектов на фоне поршневых гармоник, аппаратурой с постоянным динамическим диапазоном очень сложно. В связи с этим при проведении экспериментальных исследований иногда необходимо иметь устройство, которое бы в узкой полосе частот подавило мощные составляющие спектра и тем самым позволило при неизменном динамическом диапазоне анализатора усилить и выделить маломощные компоненты спектра.

Виброакустические средства диагностирования гидравлических агрегатов. Диагностирование состояния машин и оценки степени опасности повреждения на основе данных контроля вибрации - один из наиболее действенных видов неразрушающего контроля.

Средства диагностирования гидравлических агрегатов можно разделить на три группы: контрольно-сигнальную аппаратуру, переносные приборы для периодического контроля агрегатов гидравлического привода и стационарную аппаратуру.

Контрольно-сигнальная измерительная аппаратура предназначена для эксплуатационного контроля технического состояния оборудования с целью обнаружения дефектов на ранних стадиях их возникновения.

Непрерывное или периодическое наблюдение за изменением различных параметров вибрации в характерных для данного типа оборудования точках может быть основой для определения вида и местоположения дефекта, оценки степени его опасности и необходимости остановки оборудования для предупреждения аварии и выполнения объема ремонтных работ.

Контрольно-сигнальную аппаратуру используют в настоящее время на роторных машинах всех типов (авиационных двигателях, турбинах, насосах, гидромоторах, компрессорах}. По виду использования ее можно разделить на переносную и стационарную аппаратуру периодического или непрерывного эксплуатационного контроля технического состояния машин. Переносная аппаратура служит для периодического контроля и анализа вибрации машин с целью оценки их технического состояния. Стационарная аппаратура входит в комплект контролируемого объекта для непрерывного контроля вибрации во время пуска и эксплуатации машины.

По степени функциональной и конструктивной сложности переносную и стационарную аппаратуру контроля вибрации оборудования подразделяют на:

ручные вибрографы рычажного типа с записью на восковой бумаге ко (про лиру ем ой вибрации);

портативные виброметры (вибротесгеры) с выносным виброизмерительным преобразователем в виде виброщупа и измерительным усилителем со встроенным стрелочным или цифровым указателем,

стационарные одно каналные приборы, содержащие виброизмерительный преобразователь предельного типа и контактную систему, заключенные в одном корпусе, жестко закрепляемом на объекте контроля (предельный акселерометр), и выдающие сигнал о превышении допустимого

уровня вибрации;

стационарные одно канальные приборы, состоящие из выносного вибропреобразователя, установленного на объекте, и измерительного усилителя, имеющего стрелочный указатель и контактное устройство для подключения звуковой или световой сигнализации;

одноточечную аппаратуру с анализатором спектра и стрелочным (или цифровым) указателем амплитуд гармоник на выходе;

стационарную многоточечную аппаратуру, состоящую из выносных вибропреобразователей, устанавливаемых на контролируемом объекте, и измерительного усилителя с встроенным стрелочным или цифровым указателем и ручным переключателем, коммутирующим вибропреобразователь на входе измерительного усилителя;

стационарную многоточечную аппаратуру с выборочным контролем по стрелочному указателю и автоматической регистрацией самописцем параметров вибрации, состоящую из выносных вибропреобразователей и двухканального измерительного усилителя, на входе одного из каналов которого вибропреобразователи коммутируются оператором с помощью ручного переключателя для измерения указанных параметров *вибрации* стрелочным или цифровым индикатором, а на входе другого канала вибропреобразователи коммутируются автоматически переключателем многоточечного регистрирующего прибора, обеспечивающего выдачу предупредительного и аварийного сигналов о повышении допустимого уровня вибрации в любой из контролируемых точек;

многоканальные системы контроля с выдачей предупредительного и аварийного сигналов и подключением к каналу, на входе которого сигнал достиг предельно допустимого значения шлейфового осциллографа или магнитофона и анализатора; последний позволяет определить спектральный состав вибрации, на основании анализа которого можно установить причину неисправности контролируемого объекта, одно- и многоканальные системы, осуществляющие спектральный анализ по всем каналам измерения и сигнализирующие о превышении значения амплитуды гармонических составляющих спектра;

многоканальные системы, имеющие унифицированный выход для ввода информации о вибрации защищаемого оборудования в электронную управляющую машину.

Выбор типа контрольно-сигнальной виброизмерительной аппаратуры определяется задачами контроля, а также степенью влияния отказов на безопасность использования оборудования по назначению, ответственности и стоимости контролируемых машин.

Переносная аппаратура для периодического контроля агрегатов гидравлических приводов. Эта аппаратура для периодического контроля агрегатов систем гидравлического привода получила широкое распространение.

Техническому диагностированию с помощью переносной аппаратуры виброконтроля подвергаются такие агрегаты, как насосы и гидромоторы. Аппаратура с использованием вибросигналов ультразвукового диапазона применяется для контроля герметичности распределительной и регулирующей аппаратуры, а сигналов акустической эмиссии — для диагностирования сосудов давления (трубопроводов, гидравлических агрегатов).

Ручные вибрографы, имеющие низкую точность измерения и относящиеся к приборам индикаторного типа, в настоящее время почти не применяются.

Для контроля насосов и гидромоторов авиационных гидравлических систем создана серия переносных приборов, позволяющих оперативно распознавать неисправности основных узлов этих агрегатов. Прибор контроля насосов позволяет контролировать техническое состояние деталей качающего узла и подшипников. В качестве диагностических параметров, определяющих техническое состояние деталей качающего узла, используется относительный параметр пульсаций давления, для диагностирования подшипников — пиковое значение виброускорения на характерных частотах.

Вибрация и пульсация давления насосов, насосных станций и гидромоторов измеряются пьезоэлектрическим преобразователем, сигнал с которых, пройдя через повторитель (предварительный усилитель), поступает на основной измерительный преобразовательный блок.

Информацию о техническом состоянии насосов, гидромоторов, насосных станций можно получить, используя только один преобразователь вибрации.



Анализ отказов и неисправностей агрегатов систем гидравлического привода показывает, что около 15 % общего числа отказов приходится на усталостные разрушения элементов гидроагрегатов, находящихся при эксплуатации под воздействием циклического нагружения внутренним давлением. Наиболее часто разрушаются корпуса фильтров, гидроаккумуляторы, трубопроводы и рукава высокого давления. Разрушение корпуса агрегата является отказом, который приводит к потере работоспособности всей системы гидравлического привода вследствие вытекания рабочей жидкости. Известные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, токовихревой) имеют ограниченные возможности в определении ранней стадии зарождения и развития трещин, так как они регистрируют не развитие дефекта, а его наличие. Этому недостатка лишены методы, основанные на регистрации процессов, сопровождающихся переносом энергии, выделяющейся при разрушении.

Среди этих методов особое место занимает метод диагностирования усталостных трещин по параметрам акустической эмиссии. Проведенные исследования показали, что использование энергии акустической эмиссии дает хорошие результаты при обнаружении усталостных трещин в корпусах фильтров и аккумуляторов. В процессе диагностирования корпус агрегата нафужается знакопеременной циклической нагрузкой с частотой 1 Гц.

Стационарная аппаратура для контроля технического состояния агрегатов систем гидропривода. К стационарным приборам относят как простейшие предельные акселерометры, так и сложные многоканальные системы, являющиеся принадлежностью контролируемого объекта и измеряющие параметры вибрации, характеризующие его техническое состояние. Наряду с дальнейшим совершенствованием простейших одноточечных приборов для контроля вибрации сравнительно простых механизмов и машин создаются измерительные системы с использованием блочного принципа построения, который обеспечивает создание на базе унифицированных блоков измерительных систем с различными функциями и любым числом каналов и точек измерения.

Наиболее распространенными системами, предназначенными для защиты несложных роторных машин (вентиляторов, насосов, гидромоторов), являются одно- или двухканальные приборы с выносным виброизмерительным преобразователем. Они позволяют контролировать выбранные параметры вибрации и при превышении допустимого уровня выдавать предупредительный и аварийный сигналы.

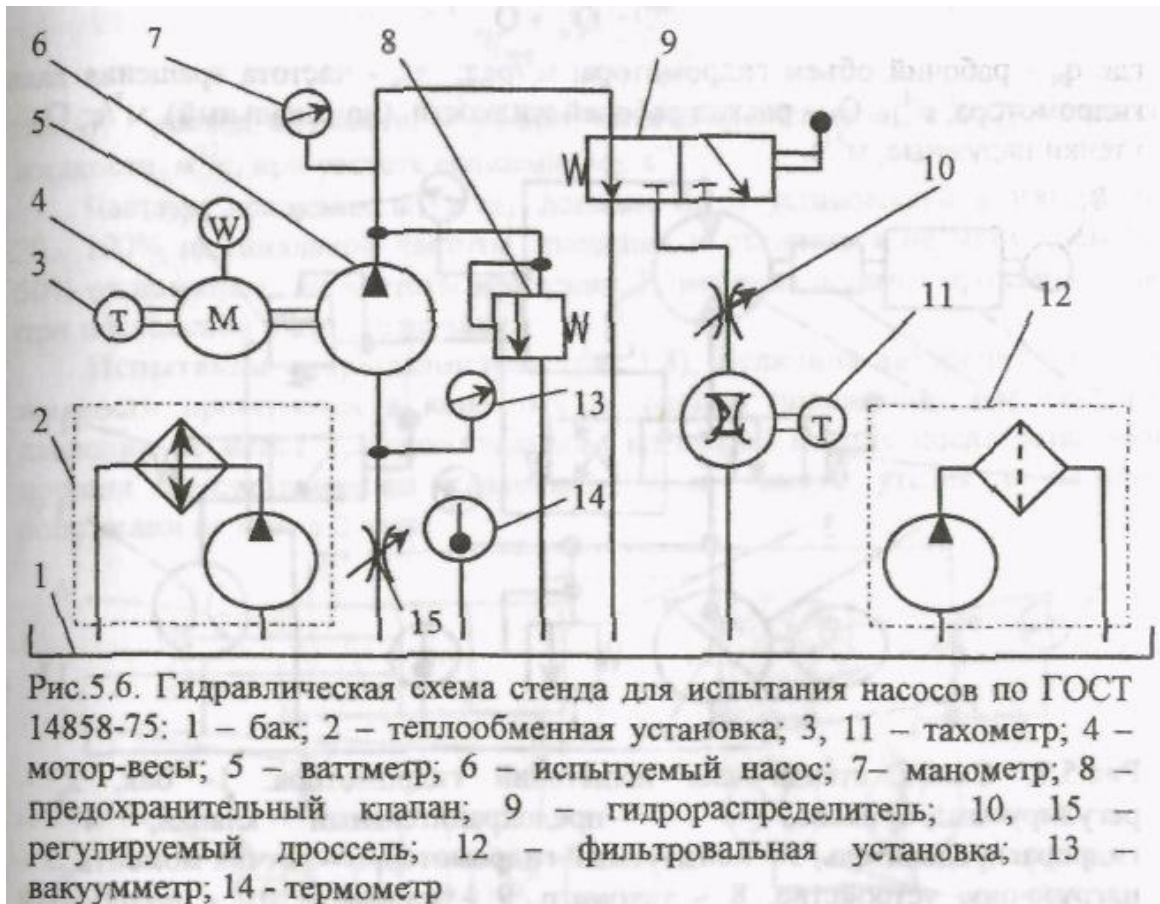
#### 5.11. Типовые стенды для испытания гидрооборудования

Проверка гидравлического оборудования на герметичность должна производиться наружным осмотром. Рабочая жидкость подводится в подводящий канал; отводящие каналы должны быть заглушены. Время проверки 0,5...1 мин. При испытаниях гидроцилиндров наружную герметичность проверяют дополнительно при давлении холостого хода после не менее чем пятидесяти полных двойных ходов. При этом допускается образование масляной пленки на поверхности штока без каплеобразования. Появление рабочей жидкости в неподвижных соединениях не допускается [16].

Утечки следует определять при наибольшей допустимой температуре рабочей жидкости.

Испытательные стенды должны быть оснащены установками для фильтрации и охлаждения рабочей жидкости. Тонкость фильтрации должна соответствовать требованиям технической документации на испытуемое изделие. На стендах целесообразно устанавливать постоянно включенные манометры 4-го класса для непрерывного контроля давления в системе. Для снятия характеристик используют манометры более высокого класса точности, подключаемые только на время замера.

Испытания нерегулируемых и регулируемых насосов. Схема испытания нерегулируемого насоса приведена на рис.5.6. При испытаниях регулируемого насоса необходимы дополнительные устройства, определяемые схемой и конструкцией узлов его управления.



Подачу, приводную мощность и объемный КПД насоса определяют при номинальном давлении и номинальной частоте вращения (отклонение действительной частоты вращения не более  $\pm 5\%$  номинального).

Объемный КПД насоса определяют по формуле

$$\eta_{OH} = Q_H / Q_T,$$

где  $Q_H$  - подача насоса при номинальном давлении;  $Q_T$  - подача насоса при минимально возможном давлении в напорной магистрали. Здесь подачи насоса  $Q_H$  и  $Q_T$  должны быть приведены к одинаковой частоте вращения.

При проведении испытаний давление со стороны всасывания должно обеспечивать работу насоса на всех режимах без кавитации. Предохранительный клапан 8 должен быть настроен на давление, допускаемое при кратковременной перегрузке насоса. Если это давление не установлено, то предохранительный клапан настраивается на давление, равное 1,25 номинального давления.

Испытания гидромоторов (рис.5.7). Расход рабочей жидкости, крутящий момент и объемный КПД определяют при номинальном давлении и номинальной частоте вращения.

Объемный КПД гидромотора определяют по формуле

$$\eta_{OM} = \frac{q_m \cdot \omega_m}{Q_m + Q_{ут}},$$

где  $q_m$  - рабочий объем гидромотора,  $м^3/рад$ ;  $\omega_m$  - частота вращения вала гидромотора,  $с^{-1}$ ;  $Q_m$  - расход рабочей жидкости (номинальный),  $м^3/с$ ;  $Q_{ут}$  - утечки наружные,  $м^3/с$ .

Рабочий объем гидромотора измеряют методом мерной емкости или методом «двух частот вращений».

Метод мерной емкости состоит в перекачивании рабочей жидкости в мерную емкость при вращении вала с частотой от  $1/6$  до  $1/3 с^{-1}$  и давлением, создаваемом жидкостью, находящейся в баке системы подпитки на 500... 800мм выше уровня входного патрубка мотора. Рабочий объем  $q_{s1}$  рассчитывают по формуле

$$q_m = V/\varphi,$$

где  $V$  — объем перекачиваемой жидкости,  $\text{м}^3$ ; ( $\varphi$  - угол поворота вала, рад, за который был перекачан объем жидкости  $V$ ).

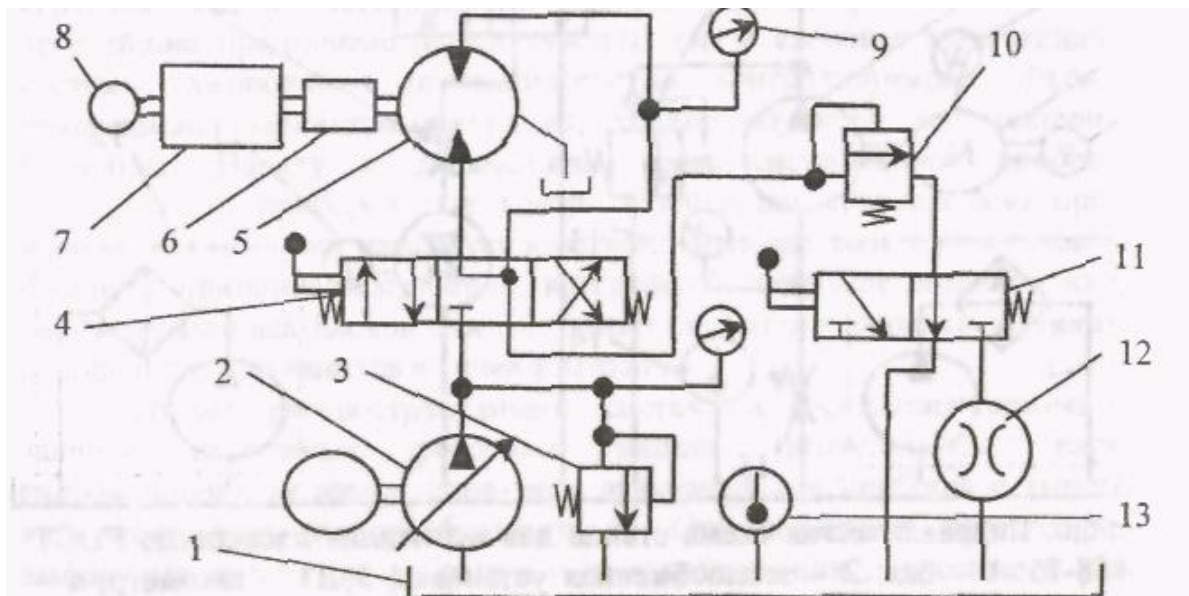


Рис.5.7. Схема стенда для испытаний гидромотора: 1- бак, 2 - регулируемый насос, 3 - предохранительный клапан, 4 - гидрораспределитель, 5 - испытуемый гидромотор, 6 - датчик момента, 7 - нагрузочное устройство, 8 - тахометр, 9 - манометр, 10 - подпорный клапан, 11 - гидрораспределитель, 12 - расходомер, 13 - термометр.

Размеры бака должны быть достаточными для того, чтобы понижение уровня жидкости в баке при измерении рабочего объема не превышало 150 мм. Открытый конец сливной трубы должен находиться на одной высоте со средним уровнем рабочей жидкости в баке (отклонение по высоте ±50 мм). Присутствие воздуха в измеряемом объеме не допускается.

Метод «двух частот вращений» состоит в измерении потока жидкости при двух значениях частоты вращения с последующим вычислением рабочего объема  $q_{om}$ ,  $\text{м}^3/\text{рад}$ , по формуле

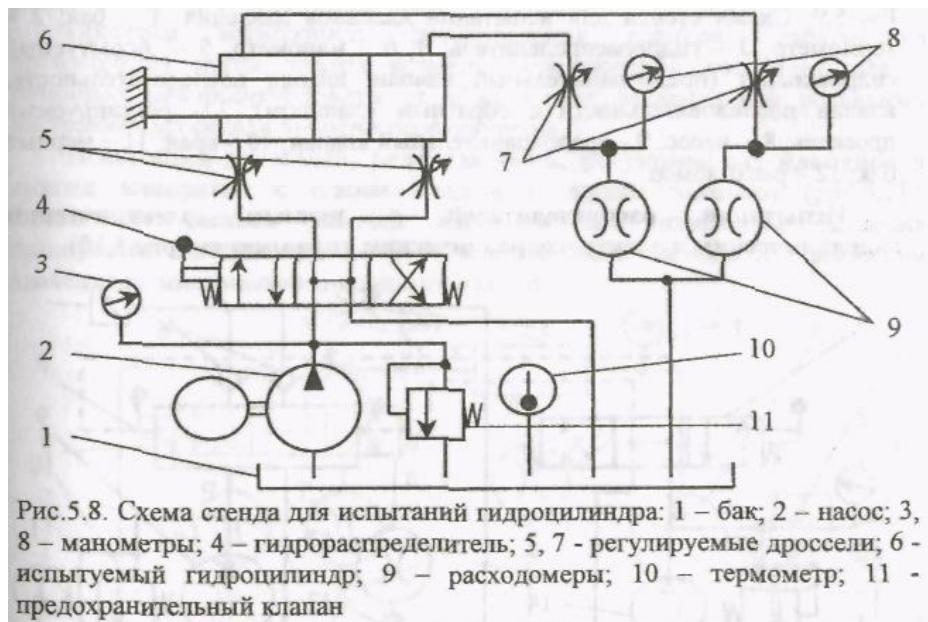
$$q_{om} = \frac{Q_2 - Q_1}{\omega_2 - \omega_1},$$

где  $Q_1$  - расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ , при частоте вращения  $\omega_1$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;  $Q_2$  - расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ , при частоте вращения  $\omega_2$ ,  $\text{с}^{-1}$ .

Частоты вращения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  должны быть установлены в интервале 20...100% номинальной частоты вращения и отличаться не менее чем на 50% от номинальной частоты вращения. Измерения должны производиться при постоянной нагрузке на валу.

Испытания гидроцилиндров (рис.5.8). Величина внутренних утечек жидкости проверяется в конечных и среднем положениях поршня при давлении не менее 1,25 номинального на второй минуте после остановки поршня и стабилизации давления. Время замера утечек в каждом положении не менее 2 мин.



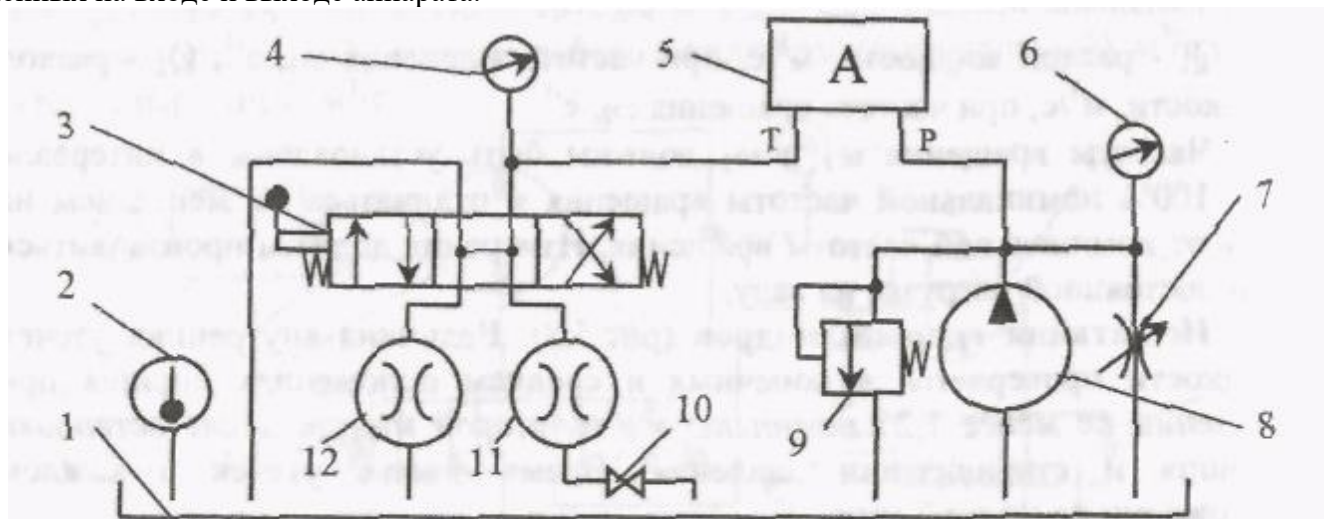


Величина давления страгивания поршня (плунжера) определяется подачей рабочей жидкости в одну из полостей гидроцилиндра при постепенном увеличении давления до давления страгивания.

Давление холостого хода (без нагрузки) определяется после страгивания подачей рабочей жидкости в одну из полостей гидроцилиндра. Движение поршня (плунжера) должно быть плавным.

Испытания предохранительных клапанов, клапанов последовательности и гидроклапанов с обратным клапаном (рис.5.9).

Изменение расхода через испытуемый аппарат обеспечивается настройкой дросселя. Перепад давлений на испытуемом аппарате определяется как разность показаний манометров, установленных на входе и выходе аппарата.



Испытания распределителей с ручным, электрическим, гидравлическим и электрогидравлическим управлением (рис.5.10).



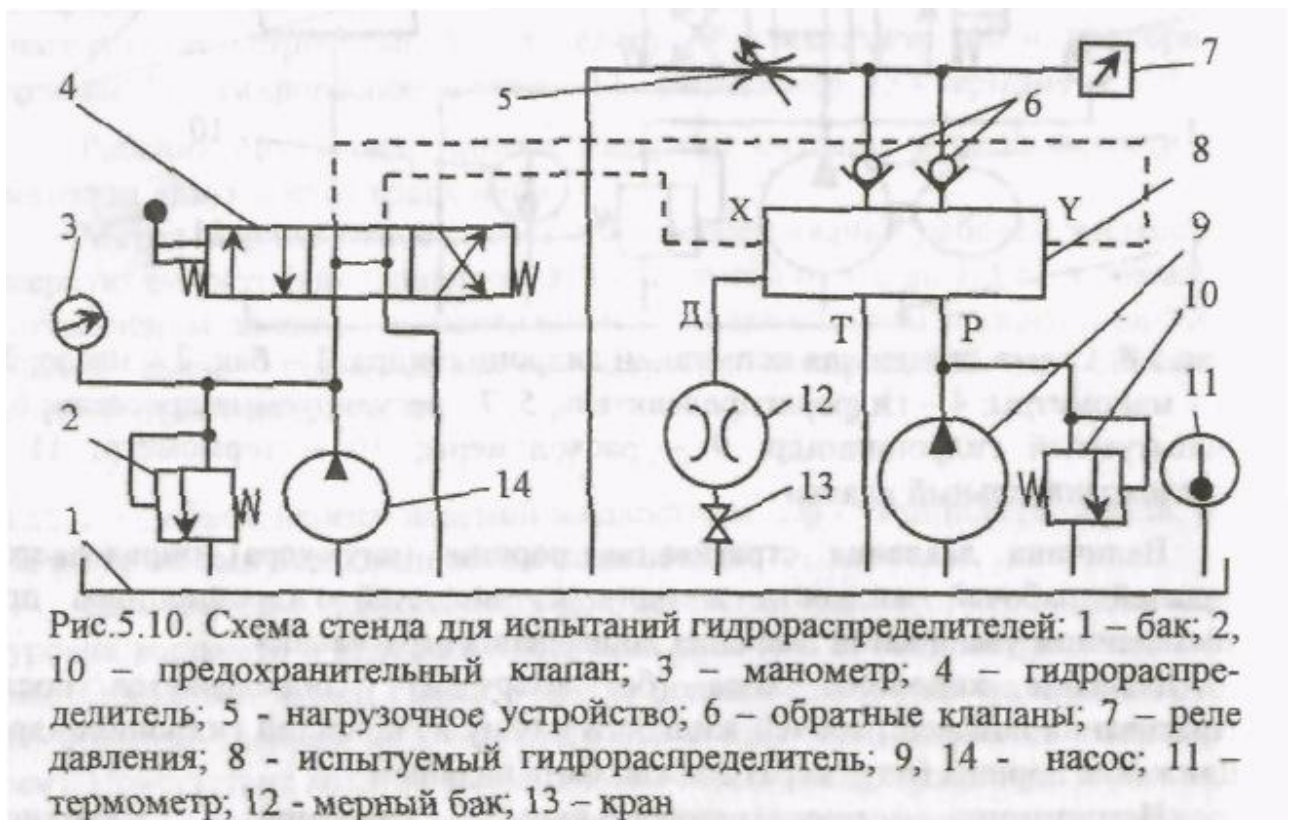


Рис.5.10. Схема стенда для испытаний гидрораспределителей: 1 – бак; 2, 10 – предохранительный клапан; 3 – манометр; 4 – гидрораспределитель; 5 – нагрузочное устройство; 6 – обратные клапаны; 7 – реле давления; 8 – испытуемый гидрораспределитель; 9, 14 – насос; 11 – термометр; 12 – мерный бак; 13 – кран

Насос 14 системы управления устанавливается только при испытании распределителей с гидравлическим и электрогидравлическим управлением; распределитель 4 – только при испытании распределителей с гидравлическим управлением.

Проверка распределителя на соответствие схеме производится по манометрам, подключенным к отводам распределителя в среднем и крайних положениях при номинальном (рабочем) давлении. Давление определяется настройкой нагрузочного устройства.

Суммарную утечку по зазорам распределителя измеряют в двух крайних положениях золотника с помощью мерной емкости, соединенной со сливным отверстием. При испытаниях распределителей с гидравлическим и электрогидравлическим управлением измерение производят при минимальном давлении управления. Минимальное давление управления устанавливается путем соответствующей настройки предохранительного клапана системы управления. Распределитель должен четко переключаться и удерживаться в крайних положениях при минимальном давлении управления.

Проверка возможности регулирования времени срабатывания производится путем замера времени переключения распределителя с помощью электросекундомера от команд реле давления при различных настройках дросселем времени переключения.

Испытания дросселей, реле давления, редукционных клапанов и других аппаратов с одним входом и одним выходом (рис.5.11). Отклонение расхода рабочей жидкости при изменении давления проверяется при расходе до 10% номинального расхода и повышении давления от минимального до номинального.

Утечки масла через закрытый дроссель и из дренажного отверстия замеряют при номинальном давлении на 2-й минуте после настройки давления.

Разность между давлением на входе и давлением настройки предохранительного клапана проверяют в диапазоне давлений от минимального до номинального.

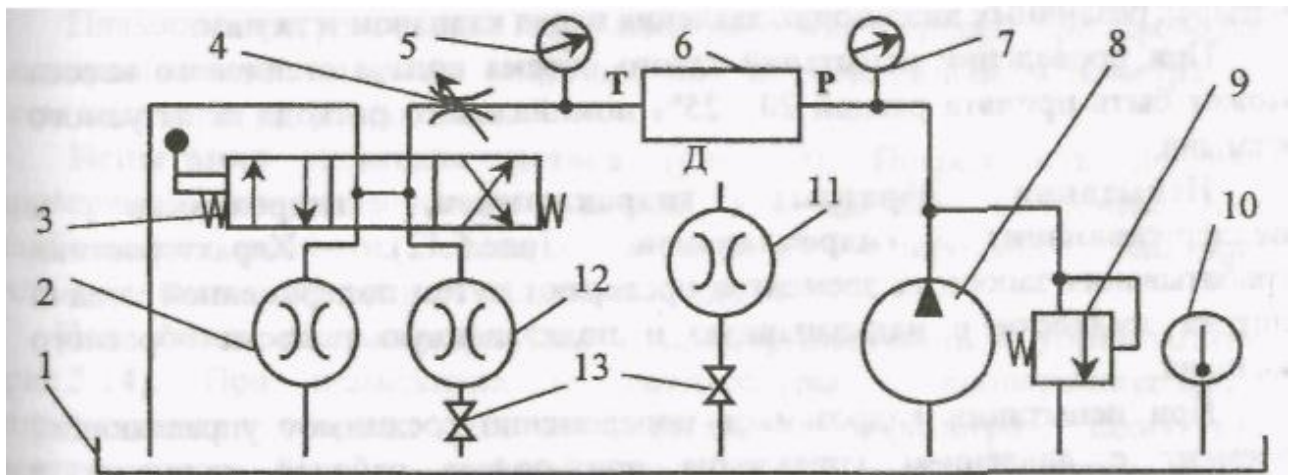


Рис.5.11. Схема стенда для испытаний гидроаппаратов с одним входом и одним выходом: 1 – бак; 2 – расходомер; 3 – гидрораспределитель; 4 – нагрузочное устройство; 5, 7 – манометр; 6 – испытуемый гидроаппарат; 8 – насос; 9 – предохранительный клапан; 10 – термометр; 11, 12 – мерные баки; 13 – краны

Реле давления проверяют на нечувствительность во всем диапазоне контролируемого давления путем изменения давления в системе стенда на величину нечувствительности с выдержкой 2 мин на каждой ступени давления. Проверка производится при минимальном, номинальном и двух промежуточных значениях давления. Утечку из дренажного отверстия контролируют при номинальном давлении.

Пределы и плавность регулирования редуцированного давления редуцирующих клапанов проверяют при номинальном давлении перед клапаном путем изменения настраиваемого редуцированного давления во всем диапазоне давлений. Проверка производится 2...3 раза.

Стабильность редуцированного давления при неизменном режиме проверяют по манометру, установленному за клапаном, и перекрытом (с помощью нагрузочного устройства) расходе через клапан в течение 5 мин. Одновременно с помощью мерной емкости проверяют расход рабочей жидкости через клапан настройки.

Стабильность редуцированного давления при изменении расхода проверяют по установленному за клапаном манометру при двух, трех значениях расхода в диапазоне от  $Q^{\wedge}$ , до  $Q^{\wedge\wedge}$  и наибольшей и наименьшей разнице давлений перед клапаном и за ним.

Стабильность редуцированного давления при изменении подводимого давления проверяют по установленному за клапаном манометру при трех, четырех различных диапазонах давления перед клапаном и за ним.

При проведении испытаний такого объема подача стендового насоса может быть принята равной 20...25% номинального расхода испытуемого клапана.

Испытания обратных гидроклапанов, гидрозамков и поддерживающих гидроклапанов (рис.5 12). Характеристики срабатывания запорных элементов проверяют путем попеременной подачи потока жидкости в надклапанную и подклапанную полости обратного клапана.

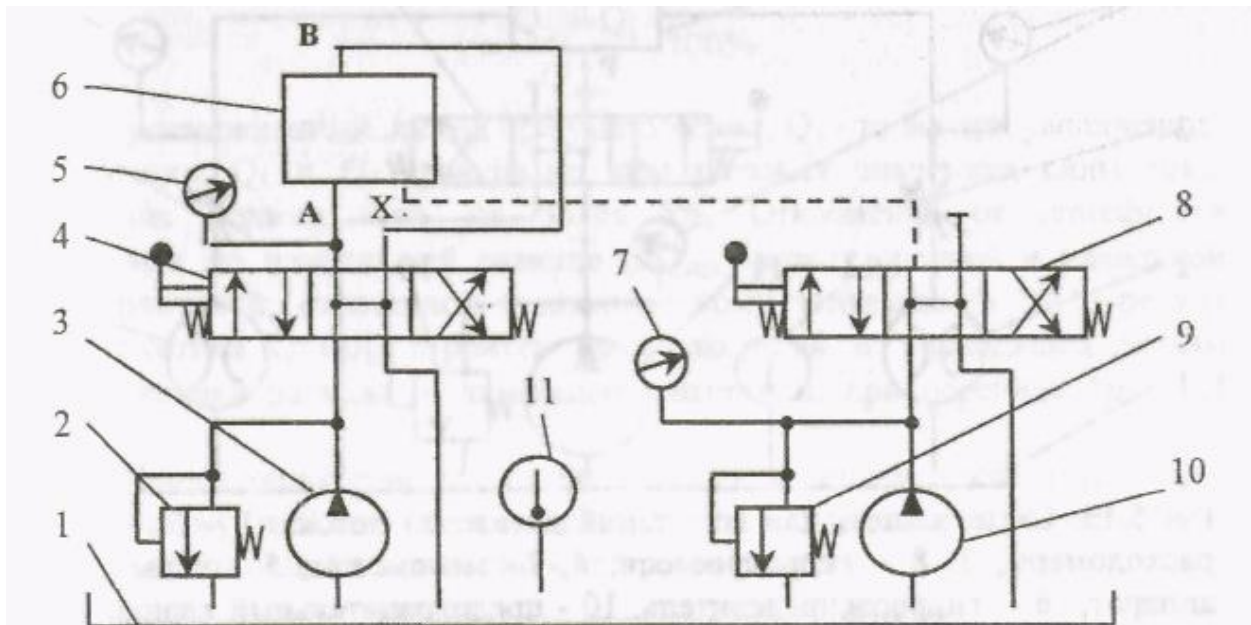


Рис.5.12. Схема стенда для испытаний обратного клапана, гидрозамка и других аппаратов с внешним управляющим входом: 1 – бак; 2, 9 – предохранительный клапан; 3, 10 – насос; 4, 8 – гидрораспределитель; 5, 7 – манометр; 6 – испытываемое устройство; 11 – термометр

При испытании гидрозамков попеременно соединяют управляющий элемент с давлением управления при подаче рабочей жидкости в надклапанную полость. Давление основного потока 0,5...1 МПа. Контроль четкости отсечки основного потока – визуальный. Утечки через клапан проверяют при номинальном давлении с помощью мерной емкости, соединенной с подклапанной полостью, на второй минуте после повышения давления.

Герметичность поддерживающего клапана проверяют наливом керосина в надклапанное пространство. Заметное падение уровня керосина в течение 5 мин не допускается. Проверку можно осуществлять по манометру с рабочей средой – керосином.

Проверку открытия гидрозамка производят при номинальном давлении в надклапанной полости. При этом клапан должен открываться при давлении управления не выше номинального. Контроль осуществляется по показаниям манометров. Проверку производят 2...3 раза.

Плавность регулирования величины давления подпора при проверке поддерживающих клапанов контролируют по показаниям манометра во всем диапазоне регулирования.

**Испытания делителя потока** (рис.5.13). Погрешность деления проверяют при наименьшем расходе для данной настройки, при наибольшей разности давления в отводах. Наибольшее давление устанавливают поочередно в каждом из отводов.

**Испытания гидроаппаратуры с пропорциональным управлением** (рис.5.14). При испытаниях гидроаппаратуры с пропорциональным управлением проверяют ряд дополнительных параметров, таких как регулирование расхода рабочей жидкости, мощность управления, гистерезис, отклонение от линейности.

Расход рабочей жидкости регулируется путем изменения величины задающего сигнала на входе электронного блока (на рисунке не обозначен). При этом регулируется расход рабочей жидкости от минимального до максимального в двух направлениях -отРкАиотРкВ при постоянном перепаде  $\Delta p = 0,8$  МПа. Замеры проводятся расходомером или мерным баком и секундомером при номинальном и максимальном расходе для данного распределителя.



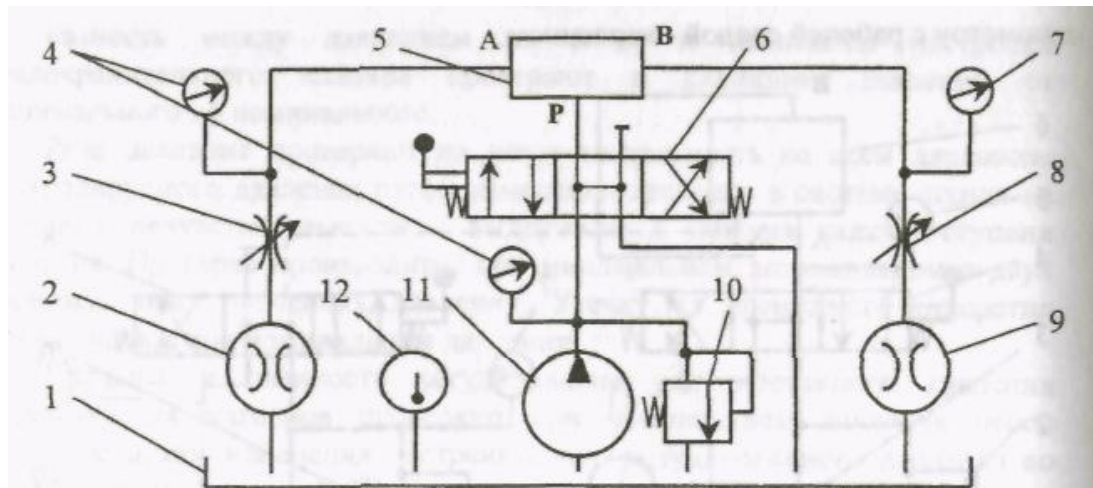


Рис.5.13. Схема стенда для испытаний делителей потока: 1 – бак; 2, 9 – расходомеры; 3, 8 – гидродроссели; 4, 7 – манометры; 5 – испытуемый аппарат; 6 – гидрораспределитель; 10 – предохранительный клапан; 11 – насос; 12 – термометр.

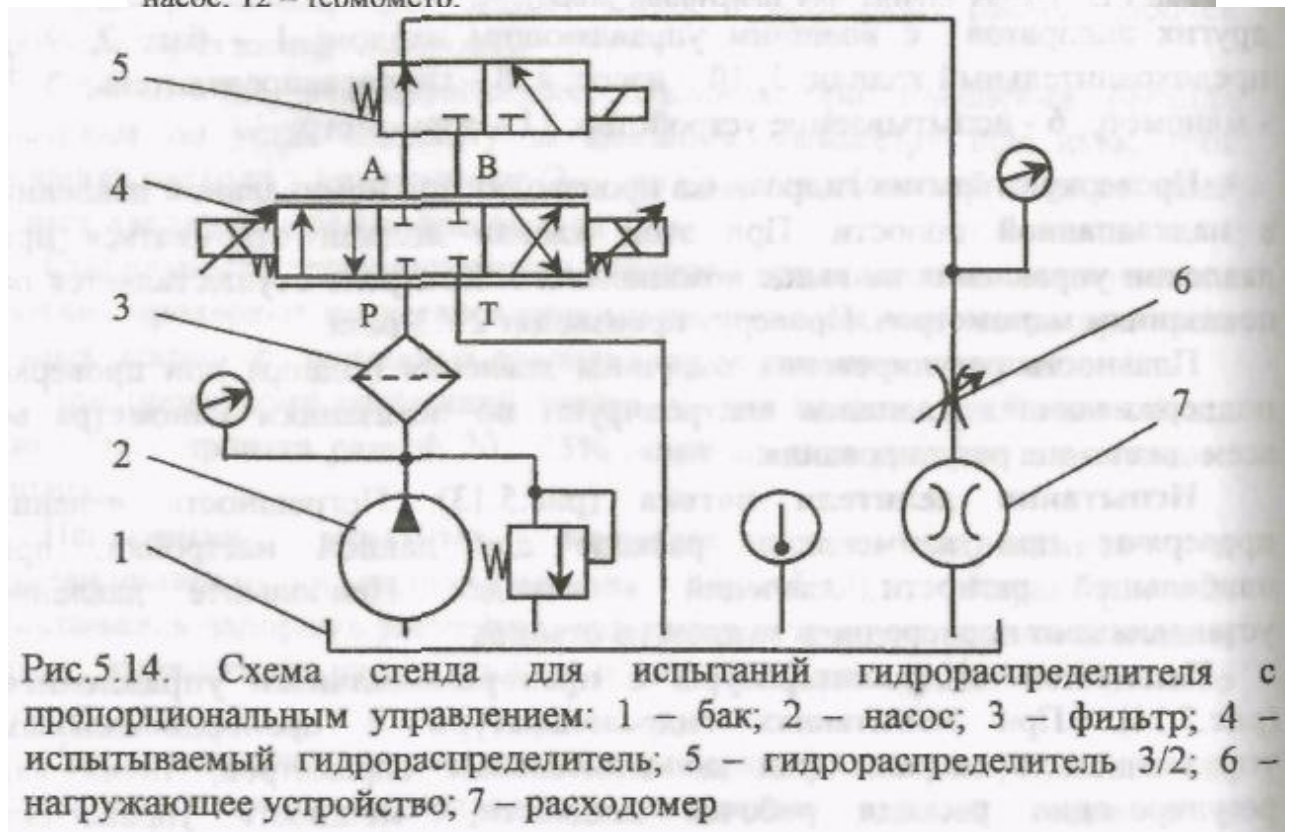


Рис.5.14. Схема стенда для испытаний гидрораспределителя с пропорциональным управлением: 1 – бак; 2 – насос; 3 – фильтр; 4 – испытываемый гидрораспределитель; 5 – гидрораспределитель 3/2; 6 – нагружающее устройство; 7 – расходомер

Мощность управления проверяют при номинальном давлении на входе и номинальном расходе рабочей жидкости при перепаде  $\Delta p = 0,8$  МПа. Измерение производят ваттметром в цепи питания электромагнита. Потребляемая мощность не должна превышать 18 Вт.

Гистерезис проверяют при номинальном давлении на входе (32 МПа) и перепаде  $\Delta p = 0,8$  МПа путем плавного изменения задающего сигнала на входе электронного блока и изменения расхода рабочей жидкости от номинального до минимального и в обратном порядке. Величину гистерезиса определяют по соотношению

$$\gamma = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_{\text{ном}}} \cdot 100\%,$$

где  $Q$  – установленный расход при уменьшении;  $Q_i$  – то же при увеличении. Расходы  $Q_j$  и  $Q_i$  срав-



нивают при пиковых значениях силы тока. Гистерезис должен быть не более 5%. Отклонение от линейности определяют по наибольшей разнице ( $\Delta Q_{mnO}$  между средней и идеальной характеристикой, отнесенной к номинальному значению (в %). Средняя характеристика  $Q=f(u;)$  строится по восходящей и нисходящей ветвям характеристики расхода от задающего сигнала  $u$  при перепаде  $\Delta p = 0,8$  МПа.

Идеальная характеристика строится по двум точкам, соответствующим номинальному и 0,1 номинального расхода на средней характеристике. Отклонение от линейности не должно превышать 5%.

### Мобильные средства диагностики

Промышленностью производятся универсальные комбинированные приборы переносного типа для измерения и регистрации давления, расхода и температуры жидкости. Для удобства и быстроты монтажа датчиков этих приборов в конструкции гидравлической системы должны быть установлены элементы сопряжения для преобразователей давления. Это совокупность узлов, позволяющая при эксплуатации, ремонте, техническом обслуживании и наладке гидравлических систем быстро подсоединить к гидроприводу требуемый датчик без остановки и разгерметизации гидропривода.

К такого типа мобильным приборам относятся **гидравлические мультиметры, гидротестеры и гидравлические осциллографы.**

**Гидравлический мультиметр** - показывающий прибор с цифровой индикацией, предназначен для отладки работы гидравлических систем при пусконаладочных работах, а также для оперативного поиска неисправностей в гидравлической системе в процессе эксплуатации. С помощью этого гидротестера можно произвести испытания насоса непосредственно на технологическом оборудовании без демонтажа и выдать заключение о его годности. Прибор позволяет замерять параметры жидкости в следующих диапазонах.

Расход 0...600 л/мин

Давление 0...100 МПа Температура 0...1000°C

**Тестеры гидравлические (гидротестеры)** представляют собой комплекс приборов и устройств, предназначенных для технического диагностирования, контроля за работой гидрофицированного оборудования, оценки технического состояния и поиска неисправных компонентов. Данный класс приборов позволяет организовать своевременное профилактическое обслуживание гидрофицированных машин для предотвращения преждевременных отказов, сократить время поиска неисправностей и выяснения причин возникновения отказов.

Область применения - гидроприводы стационарных и мобильных машин, испытательные стенды и другое гидрофицированное оборудование.

В зависимости от условий применения, номенклатуры и требуемой полноты анализа контролируемых параметров выпускаются три типа (исполнения) гидравлических тестеров: механические, электронные и цифровые.

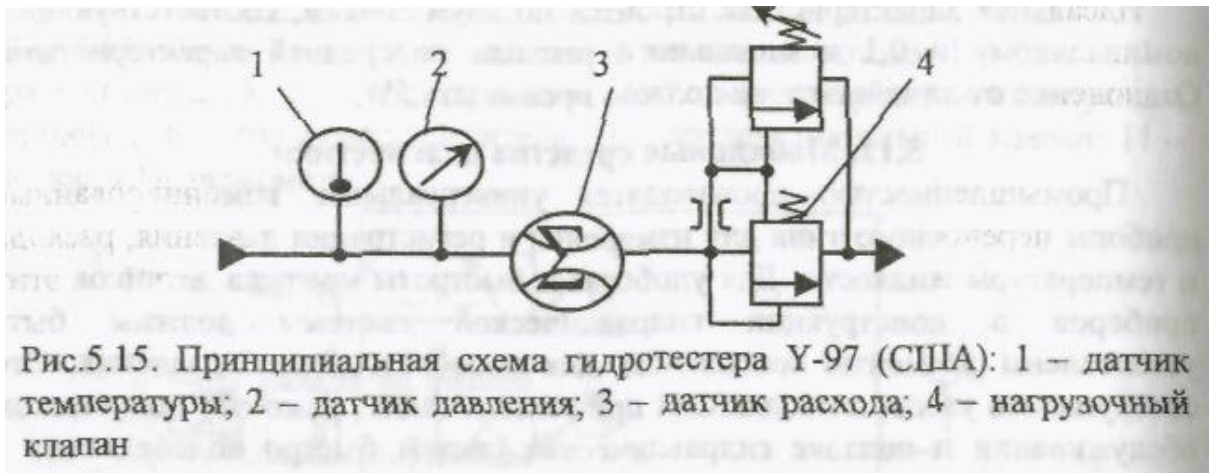
Механические гидротестеры представляет собой набор портативных механических средств измерения давления, температуры и расхода рабочей жидкости. Принципиальная схема такого прибора дана на рис.5.15.

Электронные гидротестеры выпускаются на базе индикаторов статических или динамических параметров и комплектуются датчиками давления, температуры, расхода.

Комплекты приборов и устройств, входящие в состав гидротестеров, поставляются в портативных носимых футлярах или чехлах. В комплект поставки тестеров гидравлических может входить присоединительная арматура (элементы сопряжения или контрольные точки), позволяющая производить подключение (отключение) измерительных датчиков без остановки гидрофицированного оборудования.

Применение присоединительной арматуры (элементов сопряжения) позволяет осуществлять следующие технологические операции:

подсоединение приборов для измерения избыточного давления (до 32 МПа) или вакуума, в том числе в труднодоступных местах; отбор проб рабочей жидкости; выпуск воздуха.



Рабочие жидкости - минеральные масла на нефтяной основе с вязкостью  $10...200 \text{ мм}^2/\text{с} (\text{сСт})$ .

Область применения - гидросистемы стационарных и мобильных машин, испытательные стенды и другое гидрофицированное оборудование.

Значительно более широкими возможностями располагает гидравлический осциллограф, структурная схема которого дана на рис.5.16

В совокупности с модулем управления прибор способен подать на испытываемую гидравлическую систему периодически повторяющийся возмущающий сигнал, позволяет регистрировать реакцию гидравлической системы в виде графиков ее параметров  $Q(t)$  и  $p(t)$ , изменяющихся в реальном масштабе времени. В результате анализа полученных данных можно оценить работоспособность гидравлической системы в целом и точные значения её параметров в конкретные моменты времени, а также осуществить диагностику неисправностей гидросистемы.



В состав гидравлического осциллографа входят следующие компоненты: встраиваемый в пятидюймовый слот компьютера 8-канальный 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь; устанавливаемый в свободный ISA слот компьютера интерфейс ввода/вывода; модуль сопряжения датчиков для нормирования параметров выходного сигнала датчиков (в том числе и нестандартных); модуль управления сервоклапаном (с возможностью ручного и автоматического управления); комплект датчиков; программное обеспечение.

В совокупности с модулем управления возможна автоматизация процесса испытаний. Управление работой узлов производится по специальной программе или выбранной из стандартного набора программ.