

В.И. Ильин

**Наладка приборов и систем
автоматизации**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 62-63
ББК 30.6
В11

В.И. Ильин
В11 **Наладка приборов и систем автоматизации / В.И. Ильин – М.: Книга по Требованию, 2021. – 352 с.**

ISBN 978-5-458-28474-5

В учебнике изложены физические основы и принцип построения систем контроля, регуляторов и систем автоматического регулирования. Описаны конструкции приборов, устройств и регуляторов, техническая документация проекта автоматизации технологических процессов, технология и техника наладки приборов, аппаратуры и систем автоматического контроля, регулирования и управления. Приведены примеры схем автоматизации технологических процессов.

ISBN 978-5-458-28474-5

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

Сложность профессии требует от них глубоких и прочных знаний физики и математики, постоянного совершенствования в выполнении наладочных операций, умения ориентироваться в различных сложных технологических процессах, приборы и системы автоматизации которых им придется наладживать.

Второе издание учебника дополнено материалами по наладке некоторых новых типов аппаратуры. Значительные изменения внесены в компоновку материала. Так, все общие вопросы метрологии, измерительной техники и основ автоматического управления изложены в первом разделе. Второй раздел целиком посвящен рассмотрению технических средств систем автоматизации, в том числе автоматических регуляторов и блоков. Существенные при проведении наладочных работ особенности проектов автоматизации изложены в третьем разделе. Завершает учебник четвертый раздел, в котором изложены технология и организационные формы наладки приборов и систем автоматизации конкретных типов и структур.

Введение, разделы второй и четвертый, главы I и X первого раздела написаны Б. З. Барласовым, разделы первый и третий, § 52, 53 второго раздела и глава XXV четвертого раздела написаны В. И. Ильиным.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ, РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

ГЛАВА I

СВЕДЕНИЯ ИЗ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

§ 1. Основные понятия, определения

Основные определения и терминология, относящиеся к контрольно-измерительным приборам и системам измерений, устанавливаются стандартом ГОСТ 16263—70 «Метрология. Термины и определения».

Совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, которые соединены между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления, называется *системой измерения*.

Например, температура, измеренная ртутным термометром, преобразуется в высоту перемещения столбика ртути в термометре расширения. Таких преобразований в системе может быть несколько. Так, в электрическом счетчике работа электрического тока преобразуется сначала в пропорциональное вращение диска, а затем в показания цифрового указателя.

Средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования и обработки, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем, называется *измерительным преобразователем*. Элемент преобразователя, непосредственно соединенный с преобразуемой величиной и находящийся под ее воздействием, называется *чувствительным элементом*. Измерительный преобразователь, к которому подводится измеряемая среда (величина) и который стоит первым в измерительной цепи, называется *первичным измерительным преобразователем*. Для дистанционной передачи сигнала измерительной информации на измерительный прибор (вторичный), который вырабатывает сигнал измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем (оператором), предназначены *передающие измерительные преобразователи*.

Для соединения первичных передающих измерительных преобразователей и вторичных приборов, устанавливаемых на центральном пункте управления, служат каналы (линии) связи.

Для обеспечения энергией средств измерения и их защиты от внешних воздействий, внутренних перегрузок и т. д. служат вспомогательные устройства системы измерения.

В зависимости от назначения и поставленных задач измерительную систему выполняют в виде цепи последовательно или параллельно соединенных преобразователей, каналов связи и измерительных приборов. Конструктивно элементы системы могут быть выполнены в виде отдельных устройств, объединены в блоке или скомпонованы в единое устройство.

На практике удобно, если измерительная информация независимо от вида измеряемых величин и их значений для дистанционной передачи и последующего воспроизведения преобразуется в единую форму (например, в пропорциональный сигнал постоянного тока). В этом случае конструкции передающих преобразователей, каналов связи и вторичных приборов могут быть унифицированы.

Измерительная информация чаще всего воспроизводится в виде положения указателя (например, стрелки или светового луча) относительно отметок шкалы прибора. Шкала представляет собой совокупность отметок и проставленных около некоторых из них чисел отсчета или других символов, соответствующих ряду последовательных значений величины. Число отсчета соответствует некоторому значению измеряемой величины или указывает порядковый номер отметки. Для каждого измерительного прибора устанавливается диапазон показаний — область значений шкалы, ограниченная начальным и конечным ее значениями.

Если независимо от вида и области значений измеряемых величин начальному и конечному значениям шкалы прибора соответствует всегда один и тот же выходной сигнал передающего преобразователя, то такая система называется унифицированной.

В ряде случаев измерительная информация должна быть сохранена, для этого применяют регистрирующие измерительные приборы, которые непрерывно регистрируют на движущейся с постоянной скоростью диаграммной ленте текущее значение величины. Приборы, которые одновременно регистрируют несколько измеряемых величин, называются многоточечными. Измерительная информация в регистрирующих приборах представляется в виде непрерывных кривых (у самопишущих приборов) или в виде цифровых индексов, которые печатаются на диаграммной ленте с заданным интервалом (печатающий прибор).

По исполнению измерительные преобразователи, приборы и устройства подразделяют на следующие группы: обыкновенные, пылезащищенные, взрывозащищенные, герметические, водозащищенные, защищенные от агрессивной среды.

По защите от воздействия температуры и влажности стандартами предусмотрено подразделение конструкций устройств на четыре группы. Например, приборы и устройства первой группы могут работать в интервале температур от 223 (—50° С) до 323 К (50° С) и относительной влажности не больше $25 \pm 3\%$, а третьей — в интервале температур 278—323 К и при относительной влажности не больше чем 80%.

По защите от механических воздействий различают обыкновенное и виброустойчивое исполнение.

В процессе исследований, производстве и в быту пользуются физическими величинами (длина, масса, время и др.). Чтобы пользоваться этими физическими величинами, необходимо определить их количественные оценки. Физическая величина оценивается некоторым числом принятых для нее единиц. Например, 12 кг — значение массы тела. При наличии числовых значений физических величин имеется возможность для их сравнения и проведения различных математических операций. Получить же числовое значение величины можно только в процессе выполнения измерения. Измерение — это нахождение числового значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Для сравнения числовых значений физические величины должны быть выражены в определенных единицах, принятых для данной величины, и, кроме того, должна быть известна точность, с которой получено значение величины. Действительно, достаточно трудно сопоставить скорости движения человека, выраженные в шагах в 1 мин, так как длина шага не является общепринятой единицей и индивидуальна для каждого человека.

Измерение всегда предусматривает проведение физического эксперимента, для которого необходимо наличие средств измерений и метода или способа измерения. Процесс измерения охватывает следующие основные элементы: измеряемые величины, условия измерений, технические средства измерений, методы измерений, наблюдателя или регистрирующее устройство, результат измерений, единицы физических величин.

Измеряемые величины разделяют на непрерывные (аналоговые) и прерывистые (дискретные). *Непрерывные* физические величины характеризуются тем, что в заданном диапазоне изменения они могут иметь бесконечное множество числовых значений. Примером непрерывной величины является сила тока, измеряемая стрелочным прибором. *Дискретные* величины характеризуются конечным числом возможных принимаемых значений (уровней). Примером прерывистой величины может быть последовательность импульсов и пауз, которой определяется команда в устройствах телемеханики. Характер изменения величин во многом определяет выбор средств измерения и их характеристики. Для этого до начала измерения должен быть известен, например, порядок числового значения измеряемой величины. Например, для измерения температуры тела человека выбирают ртутный термометр, а температуры расплавленной стали — термометр в комплекте с пирометрическим милливольтметром или потенциометром.

Условия измерений, т. е. состояние объекта (среды) (одно из свойств которого изучается), влияющее (искажающее) на результат измерений, имеют важное значение для правильного определения значения физической величины. Если измерить сопротивление медного провода, находящегося в различных температурных зонах, то результат измерения (сопротивление) будет различным, так как

сопротивление медного провода зависит от его температуры. На результат измерения температуры с помощью термопары будут влиять электромагнитные поля, существующие в зоне ее установки. Результаты измерения тока в цепи с помощью амперметра будут зависеть от внутреннего сопротивления последнего. Как правило, средства измерения выбирают с учетом того, чтобы при взаимодействии их с измеряемой средой не изменялись ее свойства.

Условия измерения (в лаборатории, на производстве, в быту) резко различны и во многом определяют выбор технических средств и метода измерений.

Технические средства (преобразователи, вторичные приборы), используемые для измерения, называются средствами измерений. Одни и те же средства измерений могут быть использованы для определения различных величин. Например, вольтметр в зависимости от типа преобразователя, в комплекте с которым его применяют, может измерять напряжение, температуру, состав газа и т. п.

Метод измерений — это совокупность приемов использования, принципов и средств измерений.

Наблюдатель играет большую роль в процессе измерения. Информация об измеряемой величине, воздействующая на зрение и слух человека, может быть считана с показаний стрелочного прибора, с диаграммной ленты регистратора или телетайпа. Необходимо учитывать физические возможности наблюдателя и его состояние, так как эти факторы влияют на точность получаемых при измерении результатов.

Результат измерения физической величины — это числовое значение величины, найденное путем ее измерения. Отличие результата измерения от истинного значения определяется принципом действия и конструкцией аппаратуры, совершенством методов измерений и т. д. Точность отсчета по шкале прибора или диаграмме имеет конечную величину, определяемую их размерами.

В процессе развития науки и техники средства и методы измерений совершенствуются и их быстродействие и точность повышаются. Примером может служить появление в последнее время приборов с цифровой индикацией значения измеряемой величины, в которых точность отсчета не зависит от положения или состояния наблюдателя.

На практике результат измерения определяют как действительное значение измеряемой величины. Под действительным значением понимают значение физической величины, определенное экспериментально, которое может быть принято за истинное для данной конкретной цели. Так, например, при оценке результата измерения состава газа автоматическим газоанализатором за истинное значение принимается действительное значение концентрации, измеренное по лабораторному газоанализатору. Результат измерения может быть принят за действительное значение лишь в том случае, если известно, с какой точностью (или погрешностью) проведено измерение.

Единицы физических величин. К классу физических величин относят свойства физических объектов (механизмов,

аппаратов), которые являются общими для этих объектов в качественном отношении. К таким величинам относятся, например, масса объектов, их температура, скорость, давление, сила и т. п. Для того чтобы определить индивидуальные свойства объектов, необходимо дать количественную оценку этих общих свойств, т. е. определить числовое значение физической величины.

Значение физической величины выражают числом, которое показывает соотношение между измеренным значением и значением физической величины, принятым за единицу.

История развития единиц физических величин тесно связана с развитием науки и техники и общественных отношений. Первобытно-общинный строй, рабовладельческий и феодальный имели сравнительно низкий уровень развития производительных сил, хозяйство строилось на натуральном принципе. В этих условиях системы единиц создавались в каждом городе, селе и существовали независимо друг от друга. С приходом капитализма, характеризующегося развитыми производительными силами, общественным разделением труда, такое состояние с единицами физических величин стало неприемлемым.

В течение XIX в. вопросы разработки систем единиц физических величин находились в центре внимания выдающихся ученых всего мира. Были созданы эталоны единиц массы и длины, метрическая система мер, разработана система единиц СГС, еще до сих пор применяемая при научных исследованиях. В 1875 г. на международной конференции 17 стран с участием России была подписана международная Метрическая конвенция, по которой утверждались международные прототипы метра и километра и были созданы международные метрологические органы, одной из основных задач которых было создание и развитие системы единиц.

Созданные системы единиц строятся по единому принципу. Сначала выбирают несколько независимых физических величин и устанавливают для них единицы. Эти единицы называют основными. Выбор их производят таким образом, чтобы с помощью математических зависимостей (уравнений) можно было бы образовать единицы других величин. Единицы, выраженные через основные, называются производными, а совокупность основных и производных единиц — системой единиц.

К системам единиц предъявляется ряд требований, которым они должны удовлетворять:

- охват возможно большего числа отраслей науки и техники;
- удобство практического применения и простота;
- отсутствие громоздких пересчетных коэффициентов.

Всем этим требованиям отвечает международная система единиц (СИ), которая была принята в 1960 г. на Генеральной конференции по мерам и весам. В СССР СИ была введена как предпочтительная с 1963 г.

За основные единицы в СИ приняты: метр (м) — длина, килограмм (кг) — масса, секунда (с) — время, ампер (А) — сила электрического тока, кельвин (К) — термодинамическая температура, канделла (кд) — сила света и моль (моль) — количество вещества.

В связи с тем что большинство основных единиц СИ базируется на атомно-молекулярных константах, их воспроизведение может быть выполнено с более высокой точностью, чем, например, в системах МКС, СГС и др.

Рассмотрим примеры образования производных единиц СИ для некоторых физических величин, наиболее употребительных в системах автоматизации технологических процессов. В качестве единиц площади и объема на основании известных уравнений $S = L^2$ и $V = L^3$ получаем единицу площади — квадратный метр (m^2) и единицу объема — кубический метр (m^3). Ускорение (a), связанное с расстоянием (L) и временем (T), выражено соотношением $a = LT^{-2}$ и в СИ будет иметь единицу измерения m/c^2 (метр в секунду за секунду).

Единицу силы F получают из соотношения $F = ma = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ мс}^{-2}$. Эта единица называется ньютон.

Для давления p в СИ получаем единицу из уравнения $p = F/S = L^{-1} \cdot M \cdot T^{-2}$ ($\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$).

Эта единица, численно равная давлению, которое развивает сила в 1 Н на площади в 1 м^2 , называется паскалем (Па).

Для удобства вычислений в СИ предусматривается простое образование кратных и дольных единиц. Кратные и дольные единицы образуются от основных и производных путем умножения их значений на целые степени числа 10. Именуются кратные и дольные единицы путем прибавления приставки к наименованию единицы. Стандартные приставки имеют следующие обозначения (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Множитель, на который умножается единица	Приставка	Обозначение		Множитель, на который умножается единица	Приставка	Обозначение	
		русское	международное			русское	международное
10^{12}	тера	Т	T	10^{-3}	милли	м	m
10^9	гига	Г	G	10^{-6}	микро	мк	μ
10^6	мега	М	M	10^{-9}	нано	н	n
10^3	кило	к	k	10^{-12}	пико	п	p

Например, вместо 5000 Ом удобно записать значение сопротивления 5 кОм, вместо давления 980 000 Па — 0,98 МПа и т. п.

Связь между производными и основными единицами СИ выражается с помощью размерности. Размерность производных величин записывается в виде дроби ($\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{м}$) или с применением отрицательных степеней ($\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$). При практических расчетах размерность полученного результата вычисления значения физической величины позволяет проконтролировать правильность решения задачи.

Наряду с единицами СИ в технике допущены к применению внесистемные единицы, имеющие большое практическое распространение.

К таким единицам относятся: единица массы — тонна, единица площади — гектар, единица температуры — градус Цельсия. Большое распространение имеет единица веса и силы — 1 килограмм-сила (кгс), давления — 1 кгс/см², плотности — 1 г/л и т. п.

Наиболее распространенные внесистемные единицы и их связь с единицами системы СИ приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Соотношение между внесистемными единицами и единицами СИ

Физическая	Наименование единицы	Обозначение	Значение в единицах СИ
Сила, вес Давление	Килограмм-сила	кгс	9,81 Н
	Миллиметр водяного столба	мм вод. ст.	9,81 Па
	Миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	133,3 Па
	Килограмм-сила на квадратный сантиметр	кгс/см ²	9,81 · 10 ⁴ Па
	Килограмм-сила на квадратный метр	кгс/м ²	9,81 Па
Энергия	Килограмм-сила на метр	кгс/м	9,81 Дж
	Калория	кал	4,19 Дж
	Киловатт-час	кВт·ч	3,6 · 10 ⁶ Дж
Мощность	Лошадиная сила	л. с.	736 Вт

Пользуясь таблицей, легко перевести, например, давление, равное 730 мм рт. ст., в единицы СИ: $p = 730 \cdot 133,3 = 97\,309 \text{ Па} \approx 0,097 \text{ МПа}$.

В дальнейшем в учебнике для характеристики температуры будут приняты внесистемные единицы С. Это вызвано тем обстоятельством, что образцовые средства измерения, находящиеся в обращении, имеют шкалы, отградуированные в этих единицах, и отечественная приборостроительная промышленность пока не выпускает термометров, отградуированных в кельвинах.

§ 2. Погрешности измерений

Погрешностью измерительного прибора называют отклонение его показаний от действительного значения измеряемой величины, определенного с известной более высокой точностью (ГОСТ 16263—70).

Для каждого средства измерения стандартами, техническими условиями и другими нормативными материалами устанавливаются нормальные условия применения, т. е. такие, при которых влияющие величины имеют нормальные значения или находятся в пределах нормальных значений. К таким влияющим величинам относятся температура и влажность окружающего воздуха, допустимые значения

напряженности электрических и магнитных полей, колебания частоты и напряжения электропитания и т. п.

Погрешность средства измерения, используемого в нормальных условиях, называется основной. Дополнительная погрешность вызывается отклонением одной из влияющих величин от нормального значения или выходом за пределы нормальной области значений.

Погрешности выражаются в виде абсолютных и относительных величин. *Абсолютная погрешность* средства измерения — разность между показанием прибора и истинным (действительным) значением измеряемой величины. Абсолютная погрешность Δx определяется по формуле

$$\Delta x = x_{\text{п}} - x,$$

где $x_{\text{п}}$ — показания прибора; x — истинное (действительное) значение измеряемой величины.

Абсолютная погрешность выражается именованным числом и имеет размерность измеряемой величины. Для практического применения в качестве меры точности прибора абсолютные погрешности неудобны. Действительно, если температура стали в мартеновской печи определяется с абсолютной погрешностью 5°C , то эта точность может считаться идеальной. Определение с этой же точностью температуры воздуха в овощехранилище нельзя считать приемлемым.

Более сравнимые результаты при оценке погрешностей измерений дает использование *относительной погрешности* меры (измерительного прибора) $\gamma_{\text{отн}}$, которая, как правило, выражается в процентах и определяется по формуле

$$\gamma_{\text{отн}} = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%.$$

Для оценки точности измерительных приборов широкое распространение получила приведенная погрешность γ , которая определяется

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_{\text{к}} - x_{\text{н}}} \cdot 100\%,$$

где $x_{\text{к}}$ и $x_{\text{н}}$ — наибольшее и наименьшее значения измеряемой величины, определяемые для прибора.

Требования к точности средств измерений обусловлены целями и задачами, для решения которых осуществляются измерения. Одновременно повышение точности (уменьшение погрешности) средства измерения, как правило, связано с усложнением его конструкции и увеличением стоимости. Для оценки точности работы средств измерения, предназначенных для различных целей, в СССР установлены так называемые классы точности измерительной аппаратуры.

Классом точности средства измерения называют его обобщенную характеристику, определяемую пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливаются стандартами на отдельные виды средств измерений.

Для технических средств измерений установлен следующий ряд классов точности: 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Если температуру измеряют термометром с пределом измерений $0 \div 100^\circ\text{C}$ ($x_n \div x_n$) и классом точности 2,5, то абсолютная погрешность измерений на любой точке не должна превышать $2,5^\circ\text{C}$. Эта величина называется *пределом допускаемой погрешности*. Если погрешность определяют при нормальных условиях, то речь идет о пределе допускаемой основной погрешности.

Разность $x_n - x_n$ называется нормирующим значением $x_{нр}$. В тех случаях когда нулевое значение физической величины находится на краю диапазона измерения, как в рассмотренном примере, $x_{нр} = x_n$, если нулевое значение измеряемой величины находится внутри диапазона измерений, то $x_{нр}$ будет равен сумме абсолютных значений верхнего и нижнего пределов измерений. Например, для термометра, измеряющего температуру наружного воздуха в пределах от минус 30 до плюс 50°C , $x_{нр} = |-30| + |50| = 80^\circ\text{C}$.

Класс точности устройства указывают в его аттестате и, как правило, на корпусе или на шкале измерительного прибора. Изображение класса точности $[0,5]$ означает, что предел допускаемой основной погрешности выражен в процентах от измеряемой величины, в единицах которой отградуирована шкала, и равен $\pm 0,5\%$. Например, такое изображение характерно для амперметров, вольтметров и других электроизмерительных приборов. Изображение 0,5 показывает, что предел допускаемой основной погрешности выражен в процентах от нормирующего значения физической величины, на которую реагирует устройство. Такое обозначение может быть на шкале спидометра автомобиля, так как несмотря на то что его шкала отградуирована в километрах, на деле он представляет собой счетчик числа оборотов колеса.

Часто класс точности изображают дробью, например $0,5/0,2$. Такое изображение означает, что предел допускаемой основной погрешности рассчитывают по формуле

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{x_n}{x_n} - 1 \right) \right],$$

где δ -- предел допускаемой погрешности, x_n -- конечное значение диапазона измерения, x_n -- показания прибора, c и d -- постоянные числа, равные соответственно 0,5 и 0,2. Для термометра с диапазоном измерения $0 \div 100^\circ\text{C}$ при указанном способе выражения предел допускаемой основной погрешности будет равен для температуры 40°C

$$\delta = \pm \left[0,5 + 0,2 \left(\frac{100}{40} - 1 \right) \right] = \pm 0,8.$$

0,5

Обозначение \surd означает, что предел допускаемой погрешности устройства выражается в процентах нормирующего значения, обусловленного линейными размерами шкалы; такое обозначение характерно для линеек, штангенциркулей и т. п.