

ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 621.3.08

Ф. Б. ГРИНЕВИЧ,
К. Б. КАРАНДЕЕВ, М. П. ЦАПЕНКО

(Фрунзе — Новосибирск)

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СЛЕДЯЩИХ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ, ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ ИХ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рассматриваются причины возникновения и способы устранения автоколебаний цифровых измерительных приборов следящего уравнивания, вызываемых дискретным характером компенсационной величины (автоколебания в младшем разряде), а также погрешностями подгонки и допуском элементов измерительной цепи (автоколебания в старших разрядах).

Цифровые приборы следящего уравнивания, к сожалению, в настоящее время не получили должного распространения, хотя преимущества их при определенных условиях эксплуатации несомненны [1, 2]. По сравнению с приборами поразрядного и развертывающего уравнивания следящие приборы могут дать при равной инерционности их элементов значительно меньшую динамическую погрешность при измерении плавно изменяющихся величин. Первые следящие приборы были электромеханическими [1—4]. В них в качестве исполнительных элементов применялись реверсивные двигатели. С появлением реверсивных счетчиков импульсов управление уравниванием следящих приборов стало возможным сделать полностью электронным [5, 6].

Мы не сомневаемся, что при использовании электронных средств управления следящее уравнивание найдет должное применение в цифровых электроизмерительных приборах, и работы в этом направлении считаем весьма актуальными.

Цифровой электроизмерительный прибор со следящим уравниванием как автоматическое устройство представляет собой дискретную систему автоматического регулирования с отрицательной обратной связью. Очевидно, что в такой системе нарушение устойчивости (возникновение автоколебаний) может произойти по различным причинам. Некоторые из видов автоколебаний могут возникнуть из-за нерационального выбора динамических характеристик системы уравнивания, инерционности ключей, переходных процессов в измерительной цепи и т. п. Эти вопросы становятся особенно актуальными при создании быстродействующих приборов повышенного класса точности.

Другие виды автоколебаний в цифровых следящих приборах могут возникнуть при определенных статических характеристиках прибора, даже при идеальных динамических характеристиках системы уравни-

шивания [1, 2, 7]. Данная статья посвящена рассмотрению способов устранения именно этого типа автоколебаний в цифровых приборах следящего уравнивания.

Остановимся на двух наиболее важных разновидностях таких автоколебаний и на способах их устранения. Первый вид автоколебаний автоматических цифровых измерительных приборов следящего уравнивания может появляться из-за дискретного характера изменения компенсационной величины (или изменения измеряемой величины) в случае, если порог чувствительности (порог срабатывания) детектора равновесия (устройства сравнения) меньше одного деления шкалы прибора. (Под порогом чувствительности подразумевается абсолютное значение разности между компенсационной и измеряемой величинами, при которой срабатывают релейные элементы устройства сравнения.) Амплитуда этих колебаний находится в пределах двух и реже нескольких единиц делений младшего разряда (декады). (В дальнейшем для большей определенности будем рассматривать наиболее распространенные приборы следящего уравнивания, основанные на использовании десятичного или двоично-десятичного кода.) Этот вид автоколебаний будем называть автоколебаниями в младшем разряде.

Второй вид автоколебаний может возникнуть при значениях измеряемой величины, близких к целым значениям старших разрядов компенсационной величины. Автоколебания этого вида могут быть вызваны неточностями подгонки и характером допусков измерительной цепи прибора и проявляются в неустойчивости показаний прибора при замещении суммарных значений младших разрядов измерительной цепи старшими разрядами. Будем называть этот режим автоколебаниями в старших разрядах. Естественно, что этот вид автоколебаний может привести к серьезным ошибкам результата измерения.

Перейдем к более детальному рассмотрению способов достижения устойчивой работы приборов в этих режимах.

Автоколебания в младшем разряде могут быть устранены несколькими способами. Один из способов заключается в увеличении числа делений младшего разряда (или увеличении порога срабатывания устройства сравнения) до тех пор, пока значение цены деления младшего разряда не станет меньше порога чувствительности детектора равновесия [1, 2, 7, 8]. Конечно, при этом существенно усложняется измерительная цепь прибора и уменьшается его быстродействие. Предельным является случай, когда последний разряд выполняется не дискретным, а непрерывным [1, 2]. Прибор при этом становится неполностью цифровым, а следовательно, автоматическое снятие показаний, передача их на расстояние и ввод данных в цифровые машины усложняются. Однако такой способ не может обеспечить полной гарантии от возникновения автоколебаний в младшем разряде, так как, во-первых, чувствительность прибора в различных частях диапазона измерения может меняться в довольно широких пределах (в качестве примера можно взять мосты переменного тока), а во-вторых, порог чувствительности детектора равновесия по своей природе также нестабилен. Очевидно, что с увеличением чувствительности измерительной цепи или значения порога срабатывания детектора равновесия по сравнению с расчетными могут возникнуть автоколебания, а при понижении их может увеличиться погрешность уравнивания.

Желательно было бы найти способ обеспечения устойчивости следящих приборов при минимальной погрешности, допускающий изменение чувствительности измерительной цепи и порога срабатывания детектора равновесия в цифровых приборах.

В [5, 6] предложен способ обеспечения устойчивости системы управления автоматических экстремальных мостов при изменении чувствительности мостовой цепи и порога чувствительности детектора равновесия в весьма широких пределах.

Аналогичный способ может быть применен и в экстремальных компенсаторах переменного тока [9], и в цифровых следящих приборах постоянного тока.

Модуляционный способ заключается в том, что формирование управляющего воздействия производится посредством модуляции компенсационного или специального модуляционного параметра, осуществляемой по трем соседним его значениям (в сторону увеличения и в сторону уменьшения от среднего значения) в порядке, аналогичном движению маятника. Для его осуществления необходимо, чтобы в цифровом следящем приборе (мосте, вольтметре и т. п.) компенсирующий параметр (или измеряемая величина) периодически изменялся на половину шага уравнивания в сторону увеличения и в сторону уменьшения от отсчитываемого значения, а формирование управляющего воздействия производилось в зависимости от характера импульсов, полученных при сравнении неизвестной величины с компенсирующим параметром (рис. 1).

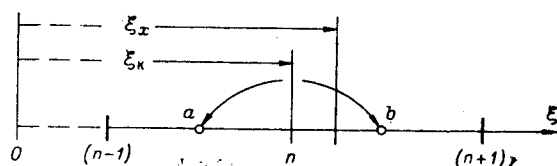


Рис. 1.

делению n шкалы, а его модуляция — перемещению конца отрезка ξ_k по отрезку ab . Если измеряемая величина такова, что конец отрезка ξ_k находится на отрезке ab , то при сравнении $(\xi_k - 0,5 ab)$ и $(\xi_k + 0,5 ab)$ с ξ_x полу-

чаются отрицательный и положительный импульсы. При этом погрешность из-за дискретности не превысит полшага. Система будет находиться в состоянии квазиравновесия. Если конец ξ_x выйдет за отрезок ab влево или вправо, то при выполнении тех же операций сравнения получатся либо два отрицательных, либо два положительных импульса, что свидетельствует о необходимости соответственно увеличения или уменьшения компенсирующего параметра. Как только начнут поступать разнополярные импульсы, система придет в квазиравновесие. Нетрудно видеть, что при данном способе устойчивость системы в принципе сохраняется даже в том случае, если порог чувствительности и детектора равновесия сколь угодно мал.

На рис. 2 показаны эпюры импульсов устройства сравнения при трех состояниях измерительной цепи («равновесие», «мало», «много»), а также один из вариантов структурной схемы детектора равновесия, обеспечивающего уравнивание цепи и устойчивый отсчет при значительных изменениях чувствительности детектора равновесия. Схема построена в предположении, что в приборе применены реверсивные счетчики импульсов. На вход устройства сравнения УС подается измеряемая величина ξ_x и компенсирующий параметр ξ_k , модулируемый на \pm полшага.

В зависимости от состояния измерительной цепи ИЦ на выходе УС появляется та или иная комбинация импульсов. Ритм работы детектора и всего измерительного прибора задает тактовый генератор ТГ. На выходе УС расположены логические схемы НЕТ₁ и НЕТ₂, первая из которых пропускает отрицательные, а вторая положительные импульсы. Схемы НЕТ₁ и НЕТ₂ управляются сигналами от ТГ. Схема И служит

для управления триггером реверса $T_1 - T_2$. Триггер реверса через шины реверса ШР управляет направлением счета реверсивного счетчика. Схема работает следующим образом. При появлении первого импульса логические схемы $HE T_1$ и $HE T_2$ закрыты тактовым генератором, а схема И открыта. На триггер реверса проходит импульс и в зависимости от знака опрокидывает триггер реверса. На схемы I_1 и I_2 импульсы не поступают.

Перед поступлением второго импульса логические схемы $HE T_1$ и $HE T_2$ открываются, а И закрывается. Теперь с выхода УС отрицательный импульс может поступать на I_1 , а положительный — на I_2 . Схемы I_1 и I_2 управляются триггером реверса таким образом, что I_1 пропускает импульсы только тогда, когда положение триггера реверса соответ-

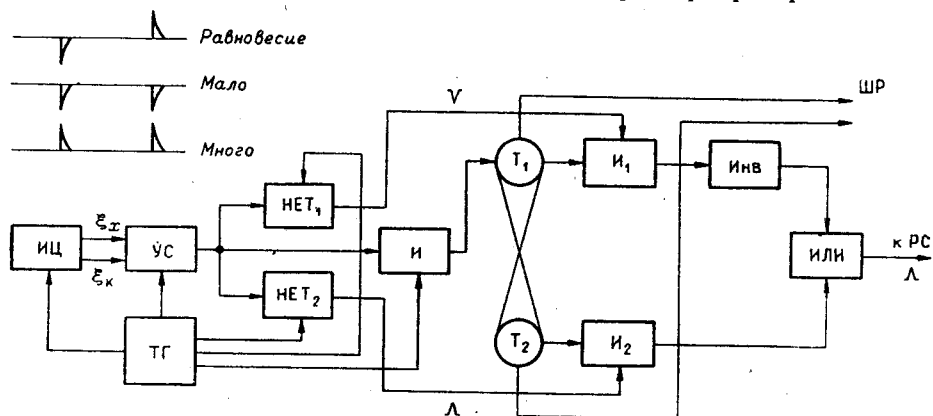


Рис. 2.

ствует увеличению U_k , а I_2 пропускает импульсы только тогда, когда положение триггера реверса соответствует уменьшению U_k . Если измерительная цепь уравновешена, т. е. погрешность уравновешивания не превышает половины шага, то первый импульс будет отрицательным, а второй — положительным. Первый импульс поступает на вход триггера и опрокидывает его в положение, соответствующее увеличению U_k . Второй импульс (положительный) поступает только на схему I_2 (схема $HE T_1$ положительных импульсов не пропускает). Однако, как было указано выше, I_2 при положении триггера реверса, соответствующем уменьшению U_k , импульсов не пропускает. Следовательно, в данном случае на выходе детектора равновесия импульсы не будут появляться. Реверсивный счетчик будет находиться в покое. Допустим, что измерительная цепь находится в положении «мало». С устройства сравнения при этом поступают два отрицательных импульса подряд. Первый отрицательный импульс опрокинет триггер реверса в положение, соответствующее увеличению U_k , а второй отрицательный импульс пройдет через схему I_1 , инвертор Инд и схему ИЛИ на вход реверсивного счетчика. Аналогичный процесс произойдет, если измерительная цепь будет находиться в состоянии «много», при котором сформируются два положительных импульса. Первый положительный импульс произведет опрокидывание триггера реверса, соответствующее уменьшению U_k , второй — пройдет через I_2 и ИЛИ на вход реверсивного счетчика. Реверсивный счетчик будет срабатывать, и система будет стремиться к состоянию равновесия.

Нам представляется, что последний способ устранения автоколебаний в младшем разряде можно широко применять при создании

разнообразных автоматических цифровых приборов следящего уравнивания. Этот способ может быть использован также для осреднения динамических составляющих измеряемой величины.

Перейдем теперь к рассмотрению способов устранения автоколебаний в старших разрядах. Для упрощения дальнейших выкладок предположим, что приняты специальные меры, исключающие автоколебания в младших разрядах.

При разработке и изготовлении измерительной цепи прибора обычно основное внимание уделяется точности подгонки ее элементов. Если погрешность их изготовления не превышает заданного значения, то считается, что прибор укладывается в класс точности. Однако при этом может оказаться, что применение такой совершенной, с метрологической точки зрения, цепи в цифровом следящем приборе приведет к возникновению автоколебаний при некоторых значениях измеряемых величин.

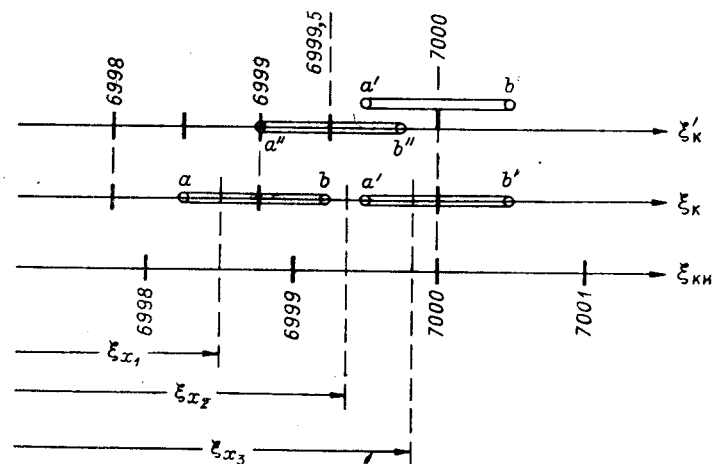


Рис. 3.

Дело в том, что на нормальную работу следящего цифрового прибора, имеющего минимальную погрешность уравнивания (полшага), влияет не только величина допуска, но и его знак. Если, например, применены образцовые меры, вполне соответствующие классу прибора, но имеющие допуски разных значений и знаков, то может случиться, что при некоторых значениях измеряемой величины в приборе возникнут незатухающие колебания. Поясним сказанное примером. На рис. 3 показаны числовая ось изменения измеряемого параметра ξ_x и два варианта числовых осей (шкал) изменения компенсирующего параметра ξ_k в цифровом следящем приборе. В идеальном случае точки числовой оси ξ_x и шкалы ξ_k должны совпадать. Это возможно было бы сделать в двух случаях: все образцовые меры и элементы измерительной цепи подогнаны очень точно или все они имеют равный по величине и по знаку допуск. И то и другое реализовать практически трудно или во многих случаях даже невозможно. Следовательно, в общем случае дискретные точки ξ_x и ξ_k в пределах допусков в реальной измерительной цепи совпадать не будут. Это несовпадение становится особенно заметным в тех точках, где происходит замена одного набора образцовых мер другим набором или отдельной образцовой мерой, т. е. в точках изменения наибольшего числа значащих цифр. На рис. 3 показано изменение компенсирующего параметра ξ_k и параметра ξ_x в окрестности точки, соответ-

ствующей отсчету 7000 (в качестве примера взят четырехдекадный прибор), где происходит смена всех трех последних значащих цифр. При этом образцовые меры, связанные с тремя младшими декадами, заменяются образцовой мерой старшей декады. При построении шкалы ξ_k принято, что допуск образцовых мер старшей декады и допуски образцовых мер трех младших декад имеют разные знаки. Вследствие этого точки 6999, 6998 . . . шкалы ξ_k сдвинуты несколько влево (на рис. 3 примерно на 0,2 шага). Рассмотрим, как будут изменяться показания прибора при плавном увеличении ξ_x . Если $\xi_x = \xi_{x_1}$ (см. рис. 3), то прибор будет показывать 6999, так как точка ξ_{x_1} находится на отрезке устойчивого равновесия ab . При увеличении ξ_x вплоть до точки b (ось ξ_k) показания будут прежними, а равновесие устойчивым. Если ξ_x будет равно ξ_{x_2} , то детектор равновесия выдаст импульс, который переключит прибор на показание 7000, так как равновесие превысило половину шага. Однако, как видно из рис. 3, значение параметра ξ_{x_2} не находится на следующем отрезке устойчивого равновесия $a'b'$. В связи с разными знаками допусков образцовых мер появляется некоторая «мертвая зона», соответствующая отрезку ba' . При показании 7000 детектор равновесия перейдет в положение «много» и выдаст импульс для перехода к показанию 6999. Далее все повторится сначала: возникнут автоколебания, которые погаснут только тогда, когда ξ_x попадет на отрезок $a'b'$ (например, измеряемая величина станет равной ξ_{x_2}).

Увеличение порога чувствительности детектора или увеличение шага модуляции нельзя считать приемлемыми способами ликвидации рассмотренных автоколебаний, поскольку при этом увеличивается погрешность уравнивания.

Одним из способов устранения этих автоколебаний [1, 2] является увеличение числа делений младшей декады таким образом, чтобы в этой декаде значение компенсационной величины было равно

$$U_{к.е} = \left(9 + \frac{\delta \% p}{100}\right) \xi_{к.е}.$$

Здесь δ — относительная приведенная погрешность;

p — общее число делений шкалы;

$\xi_{к.е}$ — цена деления прибора.

Обычно число дополнительных делений в младшем разряде не превышает двух. Для реализации этого способа необходимо предусмотреть возможность автоматической корректировки показаний прибора в случае, если уравнивание произошло именно на дополнительных делениях младшего разряда. Эта корректировка должна сводиться к тому, чтобы показание декады десятков увеличивалось или уменьшалось на одну единицу, а показание декады единиц соответственно изменилось на десять единиц.

Наиболее радикальным способом устранения автоколебаний будет введение в младшую декаду дополнительной ступеньки уравнивания, величина которой не меньше максимальной разницы подгонки образцовых мер (здесь имеется в виду не погрешность подгонки, а разброс в подгонке). Если величина разброса в подгонке мер не превышает полшага, то величину дополнительной ступеньки удобно выбирать равной половине шага. Дополнительная ступенька должна быть введена в отсчет. Легче всего это сделать путем введения дополнительного знака с двумя цифрами 0 и 5, если ступенька равна половине шага. Как видно из шкалы ξ^k , куда введена ступенька в полшага, «мертвых зон» в приборе нет и автоколебания в системе уравнивания возникать

не будут. На отрезке $a'b$ возможны два варианта отсчета: 6999,5 или 7000,0. Характерным при введении дополнительной ступеньки является то, что ни погрешность уравнивания, ни погрешность отсчета при этом не увеличиваются, а только по всей шкале (за исключением некоторых участков отрезков, где происходит сброс девяток или нулей младшей декады) одному и тому же значению измеряемой величины могут соответствовать два состояния измерительной цепи и два отсчета. Например, при $\xi_x = \xi_x$ возможен отсчет 6998,5 или отсчет 6999,0 (без введения дополнительной ступеньки уравнивания каждому ξ_x соответствовало бы только одно состояние измерительной цепи и один отсчет).

При введении дополнительной ступеньки уравнивания в младшую декаду число шагов уравнивания, если не применять специальных мер, возрастет вдвое. Это значительно снизит быстродействие. Для исключения этого можно применить логическую схему, представленную на рис. 4. Включением дополнительной ступеньки управляет

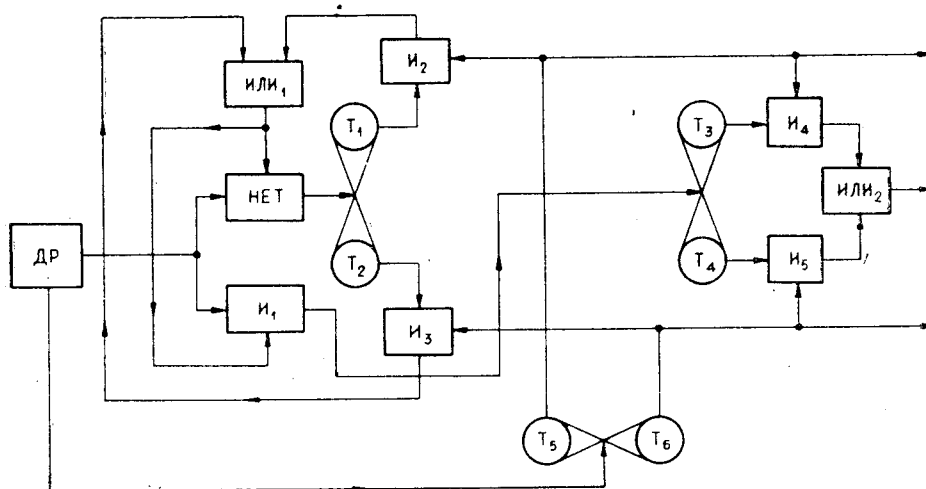


Рис. 4.

триггер, собранный на триодах $T_1 - T_2$, детектор равновесия ДР формирует импульсы, вызывающие срабатывание реверсивных счетчиков, а также управляет направлением их счета посредством триггера реверса, собранного на триодах $T_5 - T_6$. Триггер $T_3 - T_4$ является входным каскадом реверсивного счетчика (вход младшей декады).

Схема работает следующим образом. Допустим, что триггер $T_1 - T_2$ находится в состоянии 0, а триггер реверса в состоянии «прямого счета» и на выходах триодов T_1 и T_6 имеются сигналы. При этом запрещающая схема НЕТ, стоящая на входе триггера $T_1 - T_2$, будет пропускать импульсы с детектора равновесия ДР, поскольку со схемы ИЛИ на схему НЕТ сигнал не поступает (I_2 и I_3 на своем выходе сигналов иметь не будут). Схема I_1 , на которую также поступают импульсы от детектора равновесия, будет при этом запертой. Первый импульс, поступивший от ДР, вызовет срабатывание триггера $T_1 - T_2$. Дополнительная ступенька уравнивания включится (в нашем примере полшага). При этом посредством сигнала, проходящего через I_3 и ИЛИ₁, схема НЕТ закроется, а I_1 откроется, и в дальнейшем импульсы будут поступать только на вход младшей декады реверсивного счетчика. Последовательность набора цифр дополнительной ступеньки и младшей декады будет сле-

дующей: 0,0—0,5—1,5—2,5—3,5. . . . При обратном счете триггер реверса опрокидывается и появляется сигнал на выходе Т₅. Поскольку на выходе Т₁ сигнала нет, то на выходах И₂ и ИЛИ₁ также сигналов не будет. Схема НЕТ будет открыта, а И₁ закрыта. Импульс с детектора равновесия вызовет срабатывание триггера Т₁—Т₂, отключение дополнительной ступеньки и сброс показания полшага. Последовательность обратного счета будет такой: 9,5—9,0—8,0, . . . , 1,0—0,0. Как при прямом, так и при обратном счете для полного набора цифр младшей декады при наличии дополнительной ступеньки требуется 11 шагов.

Наконец, рассмотрим вопрос о допустимом значении разброса подгонки образцовых мер декад, при котором еще возможно устранение автоколебаний описанным выше способом. Очевидно, что величина раз-

предельную относительную погрешность, возникающую за счет неточности подгонки образцовых мер декад, можно выразить через предельные относительные погрешности β_i каждой декады:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i a_i \cdot 10^{-(i-1)}}{\sum_{i=1}^n a_i \cdot 10^{-(i-1)}}, \quad (1)$$

где n — общее число декад;

i — порядковый номер декады, начиная со старшей;

a_i — значащая цифра i -й декады.

Из (1) видно, что для того, чтобы погрешность δ была равна (или не превышала) погрешности первой декады $\beta_1 \leq \delta$, необходимо выполнение следующего условия:

$$\beta_1 \geq \beta_2 \geq \dots \geq \beta_n. \quad (2)$$

Из (2) следует, что принципиально без понижения точности измерения образцовые меры всех декад, в том числе и последней, должны быть подогнаны с погрешностью, не превышающей погрешности подгонки образцовых мер первой декады. Практически можно согласиться с небольшим понижением точности измерения, т. е. с увеличением погрешности δ за счет увеличения погрешности подгонки образцовых мер младших декад. Очевидно, что во многих случаях это может оказаться целесообразным. Определим допустимую погрешность β_2 подгонки образцовых мер второй декады, при которой δ увеличивается на $\Delta\delta$. Предположим, что $\beta_1 = \delta$. Наибольшее значение $\Delta\delta$ получится при условии, что $a_1 = 1$; $a_2 = 9$; $a_3 = a_4 = \dots = a_n = 0$.

Выражение (2) при этом имеет вид

$$\delta + \Delta\delta = \frac{\beta_1 + \beta_2 \cdot 9 \cdot 10^{-1}}{1 + 9 \cdot 10^{-1}} \approx \frac{\beta_1 + \beta_2}{2},$$

откуда

$$\beta_2 = \delta \left(1 + 2 \frac{\Delta\delta}{\delta} \right). \quad (3)$$

Из (3) следует, что только при значительных допустимых относительных приращениях $\frac{\Delta\delta}{\delta}$ можно существенно снизить точность подгонки образцовых мер второй декады. Например, если принять понижение точности в полтора раза ($\frac{\Delta}{\delta} = 0,5$), то допустимая величина β_2 увеличится в два раза. Однако в большинстве случаев такое понижение точности прибора нельзя считать приемлемым. По-видимому, часто можно согласиться с увеличением погрешности, когда $\frac{\Delta\delta}{\delta} = 0,1 \div 0,15$. При этом допустимая величина β_2 увеличится в 1,2—1,3 раза. Очевидно, такое снижение метрологических требований к образцовым мерам второй декады нельзя считать существенным. Следовательно, мы приходим к выводу, что $\beta_1 = \beta_2 = \delta$, т. е. образцовые меры первых двух декад должны быть одинаково высокоточными.

Поступая аналогично предыдущему, можно определить, что допустимая погрешность подгонки β_3 образцовых мер третьей декады будет приблизительно равна

$$\beta_3 \approx \delta \left(1 + 10 \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta} \right). \quad (4)$$

Как видно из (4), с увеличением погрешности δ в 1,1—1,2 раза ($\frac{\Delta\delta}{\delta} = 0,1 \div 0,2$) погрешность β_3 увеличивается в 2—3 раза. Если величина $\frac{\Delta\delta}{\delta} = 0,1 \div 0,2$ является приемлемой, то допустимая погрешность подгонки образцовых мер третьей декады может быть в два-три раза больше погрешности подгонки образцовых мер первой декады.

Для i -й декады (за исключением второй) верно общее выражение

$$\beta_i \approx \delta \left(1 + 10^{i-2} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta} \right). \quad (5)$$

Следовательно, при $\frac{\Delta\delta}{\delta} = 0,1 \div 0,2$ допустимая погрешность β_4 для четвертой декады будет в 10—20 раз больше величины δ . Для четырехдекадного прибора можно рекомендовать следующие допустимые величины погрешностей:

$$\beta_1 = \beta_2 = \delta; \quad \beta_3 = 2\delta; \quad \beta_4 = 10\delta. \quad (6)$$

За исключением некоторых частных случаев, погрешность δ не должна превышать половины цены деления младшей декады, т. е.

$$\delta \leq 0,5 \cdot 10^{(1-n)}, \quad (7)$$

где n — число декад.

Подставляя (7) в (6), получим:

$$\beta_1 = \beta_2 \leq 5 \cdot 10^{-n}; \quad \beta_3 \leq 10 \cdot 10^{-n}; \quad \beta_4 \leq 50 \cdot 10^{-n}. \quad (8)$$

Вообще для $i > 3$ $\beta_i \leq 5 \cdot 10^{i-(n+3)}$.

Выше указывалось, что величину дополнительной ступеньки, вводимой для обеспечения устойчивости, наиболее удобно выбирать равной

половине шага младшей декады. При этом разброс в подгонке образцовых мер (вариация подгонки) также не должен превышать половины шага. Обозначим относительные вариации подгонки образцовых мер для каждой декады $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$. Тогда условие обеспечения устойчивости запишем следующим образом:

$$\varepsilon_1 \Delta a_1 + \varepsilon_2 \Delta a_2 \cdot 10^{-1} + \varepsilon_3 \Delta a_3 \cdot 10^{-2} + \dots + \varepsilon_n \Delta a_n \cdot 10^{1-n} = 5 \cdot 10^{-n}, \quad (9)$$

где Δa_i — изменения значащих цифр при междекадных переходах.

В старшей декаде $\Delta a_1 = 1$. В остальных декадах для наихудшего случая, когда декады переходят из положения 9 в 0, имеем $\Delta a_2 = \Delta a_3 = \dots = 9 \approx 10$. С учетом последнего условия (9) примет вид

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \cdot 10^{-1} + \dots + \varepsilon_n \cdot 10^{2-n} \leq 5 \cdot 10^{-n}. \quad (10)$$

Выражение (10) есть неравенство со многими неизвестными. Для того чтобы возможно было дать рекомендации о выборе величин $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, необходимы дополнительные ограничения. Очевидно, что вариации подгонки образцовой меры зависят от ее класса. Естественно поэтому в качестве дополнительного условия потребовать, чтобы величины $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ относились между собой так, как и погрешности $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, определяемые выражением (8), т. е. чтобы

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_3}{2} = \frac{\varepsilon_4}{10} = \dots = \frac{\varepsilon_i}{10^{i-3}}. \quad (11)$$

С учетом (11) выражение (10) можно представить как

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_1 + 2\varepsilon_1 \cdot 10^{-1} + (n-3)\varepsilon_1 \cdot 10^{-1} \leq 5 \cdot 10^{-n},$$

откуда

$$2\varepsilon_1 + (n-1)\varepsilon_1 \cdot 10^{-1} \leq 5 \cdot 10^{-n};$$

$$\left(2 + \frac{n-1}{10}\right)\varepsilon_1 \leq 5 \cdot 10^{-n};$$

$$\varepsilon_1 \leq \frac{50}{20 + (n-1)} \cdot 10^{-n}.$$

Если принять, что в среднем $n = 4 \div 6$, то приближенно можно считать:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = \varepsilon_2 &\leq 2 \cdot 10^{-n}; & \varepsilon_3 &= 4 \cdot 10^{-n}; \\ \varepsilon_4 &= 20 \cdot 10^{-n}, & \varepsilon_i &= 2 \cdot 10^{i-(n+3)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Из сравнения выражений (8) и (12) видно, что величины ε_i в 2,5 раза меньше погрешностей β_i , т. е. вариация подгонки образцовых мер для обеспечения устойчивости должна быть меньше погрешности образцовой меры.

При выводе соотношений (8) — (12) не учитывался статистический характер величин, которыми мы оперировали. Например, с учетом этого обстоятельства выражение (12) не будет столь жестко задавать вариации подгонки. Однако из полученных выражений следует, что для

предупреждения возникновения автоколебаний в следящих цифровых приборах необходимо не только принятие специальных мер, относящихся к системе управления, но и наложение соответствующих ограничений на вариацию подгонки образцовых мер декад.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Цапенко. Автоматические измерительные компенсаторы с декадными магазинами сопротивлений.— Приборостроение, 1957, № 1.
2. М. П. Цапенко. Автоматические измерительные компенсаторы с декадными магазинами сопротивлений. Автореф. канд. дисс. МЭИ, 1956.
3. К. Б. Карандеев, А. Я. Шрамков. Автоматический цифровой вольтметр.— Докл. Львовского политехн. ин-та, вып. II, 1958.
4. А. Я. Шрамков. Автоматический прибор с цифровым отсчетом. Вопросы общего электроприборостроения. Киев, Изд-во АН УССР, 1960.
5. Ф. Б. Гриневиц. О построении цифровых автоматических мостов переменного тока.— Измерительная техника, 1963, № 6.
6. Ф. Б. Гриневиц, А. В. Чеботарев, А. И. Новик. Элементы и схемы цифровых экстремальных мостов переменного тока. Фрунзе, Изд-во АН КиргССР, 1963.
7. В. Ю. Кончаловский. К вопросу о статической точности цифровых измерительных устройств следящего типа.— ИВУЗ, Приборостроение, 1964, № 4.
8. А. И. Кондалев. Преобразователи формы информации. Киев, «Наукова думка», 1965.
9. Т. М. Алиев, А. М. Мелик-Шахназаров, И. Л. Шайн. Автоматические компенсационные устройства переменного тока. Баку, «АЗЕРНЕСИР», 1965.

*Поступила в редакцию
28 мая 1966 г.*

**F. B. Grinevich,
K. B. Karandeyev, M. P. Tsapenko**
**ON DIGITAL SYNCHROSTEP INSTRUMENTS STABILITY
DEPENDING ON ITS STATIC CHARACTERISTICS**

Origins of onset and ways of elimination of autooscillations into digital instruments with synchrostep balancing are considered. The autooscillations arise from discrete character of compensating quantity (low-order digit autooscillations) as well as adjustment errors and component tolerances (high-order digits autooscillations).