

**К. М. СОБОЛЕВСКИЙ**

(Новосибирск)

**ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ УРАВНОВЕШИВАНИЯ  
И ЭЛЕМЕНТЫ ИХ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ\***

Охарактеризована роль электроизмерительных цепей уравновешивания в современной измерительной аппаратуре и дан краткий обзор основных достижений в области теории и практического построения этих цепей. Рассмотрены предпосылки, которые целесообразно положить в основу синтеза цепей уравновешивания по заданным метрологическим и эксплуатационным характеристикам. Сформулированы первоочередные задачи, решение которых позволит перейти к синтезу электроизмерительных цепей уравновешивания в целом.

Построение современной неавтоматической и автоматической измерительной аппаратуры, в частности, создание качественно новых измерительных устройств — сложных автоматических комплексов отбора, переработки и выдачи измерительной информации, получивших название «измерительные информационные системы» [1], неизмеримо расширяет горизонт задач, возлагаемых на электроизмерительные цепи уравновешивания, приводит к формулировке предъявляемых к ним новых требований. Роль электроизмерительных цепей уравновешивания (ЭИЦУ) в сложных автоматических измерительных приборах (АИП) и измерительных информационных системах (ИИС) особенно многогранна. Расширение и усложнение функций ЭИЦУ как важнейшей составной части устройств сравнения преобразованных в электрические параметры измеряемых величин с образцовыми мерами, т. е. составной части собственно измерительных устройств и блоков формирования известных величин, — далеко не единственная специфика использования измерительных цепей в АИП и ИИС. На ЭИЦУ может оказаться необходимым возложить также ряд операций, связанных с переработкой информации в вычислительных, логических и командных устройствах АИП и ИИС и с первичным отбором информации системой чувствительных элементов [1, 2].

Очевидно, что применение измерительных цепей уравновешивания в их современном виде далеко не всегда сможет удовлетворить поставленной задаче. Поэтому, наряду с разрешением других научных задач, предопределяющих успешное создание требующейся электроизмерительной аппаратуры, необходимо всесторонне развивать теорию ЭИЦУ и вести интенсивные исследования в поисках новых рациональных путей

\* Материал доложен на VI Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1964 г. в Новосибирске.

их технической реализации. Решение указанной задачи, естественно, будет способствовать общему прогрессу электрометрии и успешному использованию ее достижений в других областях науки и техники.

Прежде чем перейти к рассмотрению современного состояния теории и практики ЭИЦУ и первоочередных задач в этой области, уместно напомнить, что в настоящее время отсутствует общепринятое определение понятия «электроизмерительная цепь уравнивания», равно как и понятия «электроизмерительная цепь» вообще\*. Большинство отечественных специалистов (см., например, [3—14]) под электроизмерительной цепью уравнивания подразумевают электрическую цепь, содержащую определенные известные элементы (в частности, образцовые меры) и исследуемые (пассивные или активные), характеризуемую заданным измерительным режимом (измерительным состоянием) или определенным отклонением от некоторого заданного режима и предназначенную для сравнения указанных исследуемых элементов с известными или же для преобразования параметров исследуемых элементов в необходимую форму. Несмотря на огромное многообразие частных вариантов и даже целых родственных групп ЭИЦУ, ныне представляется установившимся и общепринятым [5, 6, 9, 10, 14] деление цепей уравнивания на две основные группы — на мостовые и компенсационные цепи. Это деление обусловлено, главным образом, двумя факторами: используемым методом измерения и характером измеряемых величин. Довольно очевидным отличием указанных двух групп ЭИЦУ является то, что если в мостовых цепях ток или напряжение являются всего лишь своего рода связующими звеньями, позволяющими выявить определенное соотношение между искомым и известными параметрами пассивных элементов ЭИЦУ, то в компенсационных цепях, служащих для определения соотношения между некоторыми сравниваемыми токами или напряжениями, в качестве связующих звеньев выступают пассивные параметры элементов ЭИЦУ. Общепринятым является также деление ЭИЦУ на цепи постоянного и переменного тока, поскольку род тока зачастую приводит к коренным отличиям в поведении этих цепей при кажущемся внешнем сходстве их структуры. Последнее не означает, однако, что во многих случаях не бывает возможным и полезным общее рассмотрение свойств ЭИЦУ независимо от рода тока, с последующим получением соответствующих выводов для ЭИЦУ постоянного тока как для частного случая.

Электроизмерительные цепи уравнивания получили самое широкое применение не только в измерительной технике, но и в автоматике, телемеханике, вычислительной технике и т. д.\*\* (см., например, [3—32] и приводимую в этих работах обширную библиографию). Большое развитие получила теория цепей уравнивания.

В частности, достаточно полно разработаны вопросы теории и использования мостовых цепей постоянного тока: всесторонне рассмотрены вопросы влияния погрешностей составных элементов ЭИЦУ на погрешность цепи в целом, вопросы чувствительности ЭИЦУ при различных режимах работы, вопрос о связи чувствительности ЭИЦУ с погрешностью измерения, вопросы рационального согласования параметров

\* См. «Международный электротехнический словарь. Измерительные приборы». М., Физматгиз, 1962.

\*\* На примере мостовой цепи показана, в частности, выполнимость условий абсолютной инвариантности в физических реальных системах (см. В. С. Кулебакин. «О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах». — Докл. АН СССР, 1948, т. 60, № 2); есть интересное сообщение о создании ультрастабильной системы (гомеостат Эшби), основанной на использовании мостовой цепи (см. У. Росс Эшби. «Конструкция мозга». М., Изд-во «Мир», 1964, стр. 164).

ЭИЦУ с целью получения минимальной или заданной погрешности измерения, вопросы расчета ЭИЦУ с применением различных общих методов анализа электрических цепей, равно как и вопросы применения этих методов для определения метрологических характеристик цепи (чувствительности, погрешности); разработаны и нашли широкое применение многочисленные конструкции мостовых установок, среди которых немало весьма совершенных (см., например, [4—6, 10, 33—44]). Существенные результаты достигнуты также в области компенсационных цепей постоянного тока, получившие воплощение в ряде созданных высокоточных компенсационных установок с ручным уравниванием и автоматических измерительных компенсаторов; заслуживает внимания выявленная в последнее время возможность создания однородных многоступенчатых цепей увеличения точности регулировки и отсчета напряжений в компенсационных ЭИЦУ (см., например, [3, 5, 6, 10, 45—50]).

Еще более многогранными и результативными оказались исследования в области мостовых и компенсационных ЭИЦУ переменного тока. Эти исследования, направленные длительное время, главным образом, на создание и изучение многих отдельных разрозненных вариантов мостов и компенсаторов переменного тока, постепенно начали приобретать все более систематический характер, и к настоящему времени в этой области установилось несколько самостоятельных направлений исследования, в которых достигаются все новые и новые результаты, имеющие большое теоретическое и практическое значение. Большая и полезная работа проведена многими исследователями по классификации ЭИЦУ переменного тока [3—5, 7, 11, 14, 51—54]. Разработана теория раздельного уравнивания мостов переменного тока [4, 10, 55], на базе которой в дальнейшем была создана обобщенная теория мостовых цепей переменного тока [8], послужившая основой получения широкого нового класса квазиуравновешенных цепей [8, 10, 28, 32, 56—60]. Дальнейшие исследования в этом направлении выявили предпосылки для создания основ подобной обобщенной теории любых линейных цепей уравнивания [61]. Разработаны и исследованы принципы построения автоматических мостовых и компенсационных устройств переменного тока [7, 11, 24, 62—73] и созданы основы теории автоматических мостов с экстремальным регулированием и с параметрической модуляцией [11]. Разработаны многочисленные варианты конкретных ЭИЦУ, предназначенных для решения самых разнообразных измерительных задач [5, 6, 8—10, 15—21, 25—32, 74—87], в том числе мостовых цепей с индуктивно связанными плечевыми элементами и многомостовых измерительных цепей [12, 32], мостовых цепей с активными плечевыми элементами [87], измерительных преобразователей параметров электрических цепей в частоту [9, 25, 31]. Созданы основы теории фазопостоянных измерительных цепей переменного тока [9]. Решен ряд задач по улучшению методов анализа, а также по синтезу ЭИЦУ переменного тока [42, 43, 57, 58, 60, 88—90]. Начаты исследования по применению для анализа и синтеза мостовых цепей переменного тока электронных вычислительных машин [60, 91]. Интересные общие свойства мостов переменного тока установлены на основе обобщенных круговых диаграмм и обобщенных параметров мостовых цепей [67, 73, 92]. Установлены специфические для переменного тока свойства чувствительности ЭИЦУ [93—97] и особые требования по определению погрешности измерения комплексных электрических величин [98]. Разработаны основные принципы и методы защиты ЭИЦУ переменного тока от влияния электромагнитных помех [3, 5, 10, 15, 20, 21, 32, 97, 99—107]. Таков далеко не полный перечень важнейших результатов исследований в области ЭИЦУ переменного тока.

Таким образом, в области теории и практики ЭИЦУ накоплено уже значительное количество достаточно фундаментальных выводов, позволяющих успешно решать многие задачи современной науки и техники.

Казалось бы, что на основе имеющихся на сегодня сведений в области цепей уравнивания можно успешно и оптимально решать задачу практического создания любой необходимой цепи. Тем не менее, истинное положение далеко не такое. Дело в том, что большинство полученных теоретических результатов, к сожалению, относится к области отыскания рациональных в определенном смысле значений параметров ЭИЦУ с полнотой или в основном predetermined структурой, и сделаны пока лишь первые шаги в направлении синтеза структуры ЭИЦУ, да и то при условии predetermined геометрической конфигурации цепи и учете некоторых простейших начальных условий (например, уравниваемость, отдельный отсчет, отдельное измерение при квазиравновесии) [4, 5, 8, 10, 15, 20, 21, 25, 42, 57, 60, 88, 96]. Очевидно, что predetermined структура и даже геометрической конфигурации цепи может наложить столь значительный отпечаток на свойства создаваемой ЭИЦУ, что вряд ли можно говорить в этом случае об оптимальном решении задачи. Необходимо также иметь в виду, что в настоящее время происходит непрерывное усложнение измерительных задач, причем, как правило, наблюдается стремление придать электроизмерительной цепи взаимно противоречивые и нередко «экстремальные» свойства; в качестве примера можно указать на необходимость создания ЭИЦУ, обеспечивающих одновременно и высокое быстродействие измерительного процесса, и достаточно высокую точность измерения, и нечувствительность измерительного устройства к влиянию больших и переменных электромагнитных помех, и возможность отдельного измерения нескольких составляющих комплексной величины.

Указанные выше обстоятельства выдвигают в качестве неотложной задачи создание общей теории электроизмерительных цепей уравнивания, которая позволила бы разработать эффективные методы оптимального синтеза ЭИЦУ по заданным метрологическим и эксплуатационным характеристикам, дала бы возможность однозначно устанавливать разрешимость или же неразрешимость поставленной задачи с помощью существующих ныне технических средств, а в последнем случае дала бы возможность уточнить необходимые направления поисков новых элементов электрической цепи или улучшения характеристик существующих элементов.

Нам представляется, что некоторые элементы такой общей теории электроизмерительных цепей уравнивания могли бы быть сформулированы уже сегодня, на основе достигнутых к настоящему времени теоретических и практических результатов исследований в области ЭИЦУ.

Вполне естественно, что в основу общей теории желательно было бы положить прежде всего какой-либо единый метод оценки измерительного режима (измерительного состояния) цепи. Как известно, измерительное состояние цепи можно оценивать одним из двух отличных друг от друга путей: 1) по значению какого-либо одного выходного параметра цепи (например, выходного напряжения, тока, выходной мощности); 2) по соотношению между какими-либо выходными параметрами. Второй путь выгодно отличается от первого, так как позволяет глубже вникнуть в физическую картину поведения цепи и открывает широкие возможности использования самых различных режимов измерительной цепи. Именно на этой основе был выявлен многочисленный класс квази-

уравновешенных мостовых цепей переменного тока [8, 10]. На этой же основе были вскрыты некоторые общие частотные свойства цепей уравновешивания [9]. Поэтому оценку измерительного режима цепи уравновешивания целесообразно, на наш взгляд, в основном производить по соотношению между выходными параметрами.

В настоящее время открываются возможности оценивать по соотношению между выходными параметрами измерительные режимы, по крайней мере, любых линейных ЭИЦУ с использованием в качестве соотносимых величин любых пар выходных параметров — напряжений на участках цепи, узловых напряжений, токов в ветвях цепи и контурных токов, — если только эти выходные параметры могут быть представлены в виде неизвестных системы линейных уравнений, описывающей рассматриваемую цепь, причем исследуемая величина, связанная с отношением выходных параметров функциональной зависимостью (в общем случае — в виде дробно-линейной функции), также выступает в качестве одной из неизвестных этой же системы уравнений [61, 108]. Указанное обстоятельство позволяет, в частности, уже сегодня ставить некоторые простейшие задачи синтеза любых линейных квазиуравновешенных цепей для отдельного определения составляющих исследуемых комплексных величин [57, 58]. Интересные и весьма универсальные результаты (в смысле применимости для сравнительной оценки цепей уравновешивания) получаются при исследовании с указанных позиций таких важных характеристик цепи уравновешивания, как чувствительность и погрешность.

Заметим, кстати, что в соответствии с изложенным выше общим подходом существенно уточняется и определение самих методов измерений, реализуемых с помощью цепей уравновешивания, исключается возможность каких бы то ни было противоречий между определением метода измерения и работой устройств, этот метод воплощающих, от чего далеко не свободны известные определения. Очевидно, что в таком общем смысле под мостовым методом измерения следует понимать метод, основанный на приведении к заданному значению (или на определении отклонения от заданного значения) отношения двух выходных величин (напряжений, токов), созданных в электрической цепи, содержащей исследуемые и известные пассивные элементы, одним или несколькими несравнимаемыми активными элементами (источниками питания); для этого метода характерно то, что при равновесии или квазиравновесии электрической цепи результат сравнения исследуемого объекта с образцовыми мерами не зависит от параметров источников питания. Под компенсационным методом измерения следует понимать метод, основанный на приведении к заданному значению (или на определении отклонения от заданного значения) отношения двух независимых, самостоятельных выходных величин (напряжений, токов), созданных в электрической цепи, содержащей известные пассивные элементы, двумя сравнимаемыми группами активных элементов (исследуемых и источников питания); в этом случае результат сравнения всегда зависит от параметров источников питания, однако при равновесии или квазиравновесии не зависит от параметров пассивных элементов цепи, определяясь только соотношением между ними.

Таким образом, если необходимость использования охарактеризованного выше метода оценки измерительного режима цепи (по соотношению между некоторыми двумя выходными величинами) в качестве основы общей теории ЭИЦУ, возможно, и не окончательно доказана, то, по крайней мере, такой метод рассмотрения цепей уравновешивания представляется исключительно удобным и многообещающим.

Принимая за основу единый метод оценки измерительного режима цепи по соотношению между выходными величинами, было бы, однако, глубоко ошибочным отказываться при этом от тех возможностей и результатов, которые были вскрыты и получены при оценке режимов измерительных цепей по одному выходному параметру. Многие из этих результатов, несомненно, окажутся полезными при разработке общей теории ЭИЦУ. В этом смысле особо эффективна трактовка измерительной цепи как некоторого многополюсника ( $2n$ -полюсника), в котором связь между активными и пассивными параметрами рассматриваемых ветвей или сторон может быть выражена в виде некоторых обобщенных параметров, имеющих в то же время реальный физический смысл [42, 43]. Так, в частности, трактовка мостовой цепи как шестиполюсника дала возможность показать [43], что основные характеристики моста (чувствительность по току, напряжению, мощности, степень нелинейности выходного тока неуравновешенного моста) определяются величинами входных и взаимных сопротивлений (проводимостей) уравновешенной цепи, введение которых позволяет выразить эти характеристики в самой общей форме независимо от структуры цепи; при этом непосредственное определение указанных входных и взаимных сопротивлений (проводимостей) для конкретных цепей не связано с громоздкими вычислениями. В [42] на основе трактовки электроизмерительной цепи как многополюсника показана возможность использовать в вычислительных работах по анализу и синтезу ЭИЦУ заранее составленные таблицы результатов эквивалентных преобразований отдельных участков цепи, а также таблицы с условиями равновесия некоторых основных типов мостовых цепей.

Очевидно, что представление электроизмерительной цепи в виде некоторого многополюсника, оказавшееся удобным и полезным при оценке измерительного режима цепи по одному выходному параметру, необходимо сохранить и при разработке общей теории с позиций оценки соотношения между выходными параметрами. При этом, естественно, характер представления изменится; например, может оказаться целесообразным придать многополюснику в общем случае вид восьмиполюсника (ветвь источника питания, ветвь с исследуемым объектом и две выходных стороны) или десятиполюсника (восемь прежних полюсов и два полюса ветви с образцовыми мерами).

Общее рассмотрение вопросов оптимального согласования параметров цепи уравновешивания с целью обеспечения требуемых ее основных метрологических характеристик (точности, чувствительности) при наиболее рациональном использовании технических средств должно, на наш взгляд, базироваться на известном основном уравнении согласования [39]. При этом, однако, необходимо учитывать возможность его уточнения, особенно для случая, когда в качестве таких характеристик будут подразумеваться не статические, а динамические характеристики. Для этой цели может оказаться целесообразным воспользоваться в той или иной форме результатами, достигнутыми в последнее время как в электрометрии (см., например, [109]), так и в смежных областях, в частности — при исследовании динамической и инструментальной точности электромеханических цепей систем контроля и управления [110, 111], а также в теории чувствительности [112], приобретающей ныне самостоятельное значение.

Нельзя не учитывать полученные к настоящему времени выводы и методы исследования и при общей трактовке такого важного для ЭИЦУ вопроса, как обеспечение оптимальных эксплуатационных характеристик цепи, например, обеспечение оптимальных энергетических режи-

мов ее элементов [113] или же обеспечение необходимой защищаемости ЭИЦУ от влияния электромагнитных помех [5, 10, 21, 32, 103—107].

Вполне естественно, что при рассмотрении всех изложенных выше вопросов (а также не затронутых нами других вопросов, подлежащих рассмотрению при создании ЭИЦУ) не с позиции анализа и расчета цепей, а с позиции их оптимального синтеза нельзя будет уже обойтись применением одних лишь привычных методов — классических и обобщенных, широко используемых для анализа и расчета электрических цепей. Невозможно также решить проблему синтеза измерительных цепей уравнивания путем непосредственного заимствования методов синтеза, используемых в теории электрических цепей [114—117], в частности, при синтезе фильтров. Очевидно, что рациональное «преломление» методов, разработанных в области синтеза электрических цепей, окажется, безусловно, необходимым и полезным в разрешении проблемы синтеза ЭИЦУ. Однако в целом при разработке теоретических основ оптимального синтеза ЭИЦУ неизбежно придется столкнуться с необходимостью широкого использования современного многообразного математического аппарата, особенно в задачах синтеза ЭИЦУ при учете одновременно нескольких и, наконец, всех требуемых основных метрологических и эксплуатационных характеристик синтезируемой цепи. Например, представляется достаточно очевидным, что даже при решении такой сравнительно несложной задачи, как поиск оптимальной структуры цепи при заданном измерительном режиме, заданных измеряемых параметрах, чувствительности и статической точности, нельзя не прибегнуть, по крайней мере, к использованию методов двух математических дисциплин — математической логики и теории вероятностей. Не исключено также, что в отдельных случаях окажется возможным и целесообразным при синтезе структур ЭИЦУ использование тех решений и методов, которые разрабатываются применительно к синтезу структур АИП и ИИС в целом.

В любых задачах синтеза существенное значение имеют не только вопросы принципиальной осуществимости, но и вопросы практической реализуемости получаемых условий с помощью приемлемых технических средств. Применительно к задачам синтеза ЭИЦУ необходимо обратить особое внимание на то, что в настоящее время эти цепи могут быть построены уже не только из таких обычных пассивных элементов, как сопротивление, емкость, индуктивность, взаимоиндуктивность; успешное применение находят или могут найти и некоторые функционально новые элементы, к числу которых следует отнести прежде всего индуктивно связанные плечевые элементы [32], представляющие собой в принципиальном смысле наиболее на сегодня близкую к идеальной реализацию согласованной трехлучевой звезды, которая обладает свойством подавления влияния на точность отношения плеч каких угодно шунтирующих элементов [118]. Начинают успешно применяться в ЭИЦУ в качестве их элементов и управляемые элементы, или зависимые активные элементы; эти элементы, применявшиеся ранее для выполнения вспомогательных функций в качестве элементов устройств защиты электроизмерительной цепи от влияния электромагнитных помех [21], ныне широко используются для улучшения характеристик пассивных элементов, входящих в состав основной измерительной цепи [87]. Большие возможности заложены в использовании структурно новых элементов цепи уравнивания, какими являются, например, структурно однородные делители напряжения с практически неограниченной дискретностью [47, 48].

Таким образом, принимая в качестве критерия оценки измерительного режима цепи соотношение между двумя выходными параметрами

(напряжениями, токами), представляя электроизмерительную цепь в виде многополюсника (например, восьмиполюсника или десятиполюсника), основываясь на уравнении согласования параметров ЭИЦУ с целью рационального обеспечения требуемой точности измерения, учитывая необходимость обеспечения оптимальных энергетических, защитных и других эксплуатационных характеристик, считаясь с неизбежностью использования современного математического аппарата и принимая во внимание современные возросшие возможности практической реализации ЭИЦУ, можно сформулировать некоторые ближайшие задачи в области создания общей теории цепей уравнивания. В числе таких первоочередных задач могут быть названы:

выработка обобщенной трактовки основных метрологических характеристик электроизмерительных цепей уравнивания — чувствительности и погрешности;

установление связи между обобщенными метрологическими характеристиками цепи уравнивания и общими параметрами представляющего измерительную цепь многополюсника;

формулировка обобщенного условия согласования общих параметров измерительной цепи с целью обеспечения требуемой точности и чувствительности;

разработка методов синтеза цепей при заданной геометрической конфигурации и частично или полностью заданных начальных условиях;

разработка методов синтеза структур цепей уравнивания при отдельно задаваемых начальных условиях.

Решение сформулированных выше задач синтеза позволит в дальнейшем перейти к рассмотрению проблемы в целом, а именно к разработке методов синтеза электроизмерительных цепей уравнивания по заданным полностью метрологическим и эксплуатационным характеристикам.

В заключение необходимо подчеркнуть, что практическая эффективность реализации синтезируемых цепей будет в значительной степени зависеть от характеристик тех элементов, с помощью которых цепь реализуется. Очевидно, что если совершенство функционально и структурно простых элементов электрической цепи отнесется, главным образом, к сфере технологии и конструкции, то качество функционально простых, но структурно сложных элементов цепи в большой степени представляет предмет исследования, относящийся к теории электроизмерительных цепей. Следовательно, наряду с изложенными выше общими задачами необходимо продолжать исследование метрологических и эксплуатационных характеристик важнейших простых функционально и сложных структурно элементов электроизмерительных цепей уравнивания (делителей напряжения, делителей тока, шунтов, плеч отношения, вспомогательных управляемых элементов, используемых для улучшения или расширения характеристик пассивных элементов цепи, и др.) как с целью выявления их предельных возможностей при заданной структуре и заданных характеристиках составных частей, так и с целью получения заданных свойств элемента в целом при минимально жестких требованиях к характеристикам составных частей структуры, т. е. при максимально возможных допусках, что, как известно, немаловажно с точки зрения технологии и стоимости создаваемых устройств.

Автор выражает искреннюю признательность чл.-корр. АН СССР К. Б. Карандееву за большой интерес к работе, а также д-ру техн. наук М. П. Цапенко и канд. техн. наук Б. В. Карпюку, чьи замечания способствовали улучшению настоящей статьи.



## ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Измерительные информационные системы и автоматика. Вестник АН СССР, 1961, № 10.
2. М. П. Цапенко, Ф. Б. Гриневич, Б. М. Пушной, А. К. Романов, Б. С. Синицын. Измерение и кибернетика.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды III конференции, 1961 г.), т. I. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
3. К. Б. Карандеев. Методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1952.
4. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. Киев, Гостехиздат УССР, 1953.
5. А. Д. Нестеренко. Основы расчета электроизмерительных схем уравнивания. Изд. 1. Киев, Изд-во АН УССР, 1953; Изд. 2, 1960.
6. Курс электрических измерений, т. I. Под ред. В. Т. Прыткова, А. В. Талицкого. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
7. Л. Ф. Куликовский, А. М. Мелик-Шахназаров. Компенсаторы переменного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
8. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
9. В. О. Арутюнов. Фазопостоянные измерительные цепи переменного тока и их применение. М., Стандартгиз, 1963.
10. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
11. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
12. М. П. Цапенко. Многомостовая измерительная схема переменного тока. Измерительная техника, 1956, № 6.
13. М. П. Цапенко. Автоматические измерительные компенсаторы с декадными магазинами сопротивлений. Приборостроение, 1957, № 1.
14. Г. А. Штамбергер. Измерительные цепи уравнивания переменного тока. ИВУЗ, Приборостроение, 1964, т. VII, № 4.
15. V. Hague. Alternating Current Bridge Methods, 5-th edition (revised). London. Pitman, 1959.
16. J. Kögner. Messbrücken und Kompensatoren, Bd. 1. München und Berlin. Verl. R. Oldenbourg, 1935.
17. G. F. Laws. Electrical Measurements, 2-d edition. McGraw-Hill, 1938.
18. В. И. Кротова. Потенциометры. Л., ВНИИМ, 1940.
19. L. Hartshorn. Radio-Frequency Measurements by Bridge and Resonance Methods. J. Wiley, 1940.
20. Н. Н. Соловьев. Основы измерительной техники проводной связи, ч. 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.
21. К. М. Соболевский, Ю. А. Шакола. Защита мостов переменного тока. Киев, Изд-во АН УССР, 1957.
22. Р. С. Кравцов. Вычислительные схемы уравнивания с дискретной обработкой переменных.— Вопросы электронной измерительной техники, № 2 (Научные записки Львовск. политех. ин-та, вып. 78). Львов, 1961.
23. О. Хорна. Тензометрические мосты. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
24. Л. Ф. Куликовский, Б. Я. Лихтциндер. Уравнивание измеряемой векторной величины в приборах сравнения. Измерительная техника, 1963, № 5.
25. В. Ю. Кнеллер, Л. Н. Соколов. Мостовые преобразователи сопротивления, емкости и индуктивности в частоту. Измерительная техника, 1963, № 6.
26. Э. С. Лившиц. Новейшие мосты переменного тока повышенной точности. Измерительная техника, 1963, № 4.
27. А. Е. Троп, В. М. Школьник. О некоторых способах уравнивания входных мостов тензометрических усилителей на несущей частоте. ИВУЗ, Горный журнал, 1963, № 2.
28. Ш. Хамитов. К вопросу об измерении обводненности нефти на промышленных объектах электрическими методами. Изв. АН Уз.ССР, серия техн. наук, 1963, № 5.
29. И. Н. Кротков. Методы и аппаратура для точных измерений основных характеристик диэлектриков в диапазоне частот радиовещания. Измерительная техника, 1964, № 4.
30. Э. С. Лившиц. Методы измерения коэффициента добротности (или активного сопротивления) катушек индуктивности при звуковых частотах. Измерительная техника, 1964, № 5.
31. М. М. Фетисов. Метод преобразования параметров электрических цепей в изменение частоты. Измерительная техника, 1964, № 1.
32. А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский. Мосты переменного тока с индуктивно связанными плечевыми элементами. Автометрия, 1965, № 1.

33. O. Heaviside. On the Best Arrangement of Wheatstone Bridge for Measuring a Given Resistance with a Given Galvanometer and Battery. Phil. Mag., 1873, p. 114.
34. С. И. Кирпатовский. К теории чувствительности измерительных устройств.— Научные записки Львовск. политехн. ин-та, серия электротехническая, № 5, 1949.
35. И. Н. Кротков. Чувствительность электрических измерительных цепей. Электричество, 1949, № 10.
36. В. Н. Мильштейн. Общий метод оценки малых изменений в электрических цепях с помощью эквивалентных схем. Электричество, 1950, № 5.
37. М. И. Левин. Вопросы общей теории и расчета электрических измерительных цепей. Автореф. докт. дисс. М., МЭИ, 1951.
38. Б. С. Синицын. О зависимости погрешностей электроизмерительных приборов от их чувствительности.— Научные записки ИМА АН УССР, т. II, вып. 2, 1953.
39. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневич. Основное уравнение согласования параметров электроизмерительных устройств. Докл. АН УССР, 1954, № 1.
40. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневич. Чувствительность и согласование параметров электроизмерительных устройств.— Научные записки ИМА АН УССР, т. V, вып. 4, 1955.
41. В. А. Кочан. К вопросу о чувствительности электроизмерительных мостовых схем.— Труды конференции по электрическим измерениям и приборостроению. Киев, Изд-во АН УССР, 1959.
42. И. Н. Кротков. Методы решения некоторых задач по анализу и синтезу уравновешенных цепей.— Труды конференции по электрическим измерениям и приборостроению. Киев, Изд-во АН УССР, 1959.
43. М. И. Левин. Некоторые вопросы теории мостовых измерительных схем.— Труды конференции по электрическим измерениям и приборостроению. Киев, Изд-во АН УССР, 1959.
44. В. Г. Пустынников. Общий принцип анализа и расчета мостовых схем. ИВУЗ, Электромеханика, 1960, № 12.
45. Техника непрерывно-дискретного преобразования. Под ред. Саскинда. НТОСИ, перевод 14/Б, 1960.
46. К. А. Нетребенко. Цифровые автоматические компенсаторы М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
47. К. Б. Карандеев, К. М. Соболевский. Об однородных схемах компенсаторов. Докл. АН СССР, 1961, т. 141, № 6.
48. К. Б. Карандеев, К. М. Соболевский. О построении каскадных и однородных схем компенсаторов.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды III конференции, 1961 г.), т. I. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
49. В. П. Котельников. Измерительные схемы цифровых вольтметров с параллельными делителями напряжения. Измерительная техника, 1962, № 10.
50. В. П. Котельников, Э. З. Розенсон. Делители напряжения для автоматических цифровых вольтметров. Измерительная техника, 1964, № 7.
51. J. G. Ferguson. Classification of Bridge Methods of Measuring Impedances. Trans. AIEE, 1933, v. 52, p. 861.
52. К. Б. Карандеев. О классификации методов электрических измерений. Электричество, 1949, № 7.
53. И. Н. Кротков. Классификация мостовых схем постоянного и переменного тока.— Труды ВНИИМ, вып. 14(74). М.—Л., Госэнергоиздат, 1953.
54. К. М. Соболевский. К вопросу о классификации мостов переменного тока.— Докл. Львовск. политехн. ин-та, т. II, вып. 2, 1957.
55. Б. И. Швецкий. Раздельное уравновешивание мостов переменного тока. Автореф. канд. дисс. Львов, Львовск. политехн. ин-т, 1951.
56. Ш. Ш. Захидов. Упрощение схемы квазиуравновешенного моста с дифференциальным указателем. Изв. АН Уз. ССР, серия техн. наук, 1963, № 5.
57. К. М. Соболевский. Основы синтеза квазиуравновешенных цепей для раздельного измерения составляющих комплексных величин.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды IV конференции, 1962 г.), т. I. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
58. Г. А. Штамберггер. О раздельном измерении компонент комплексных величин методами уравновешивания. ИВУЗ, Приборостроение, 1963, т. VI, № 3.
59. Г. А. Штамберггер, Э. П. Швецова. Об одном варианте квазикомпенсационной цепи.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды IV конференции, 1962 г.), т. I. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
60. В. I. Обухау, Г. П. Дубовик. Да рашення задачи выбару структуры квазиураунаважанай мастовой схеми на ЭВМ «Минск-1». Весці АН БССР, серія фіз.-техн. навук, 1963, № 4.
61. К. М. Соболевский. О некоторых возможностях построения измерительных цепей уравновешивания.— Электрические методы автоматического контроля (Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 9). Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.

62. H. Poleck. Mechanisiertes Abgleichverfahren für Wechselstrom-Messbrücken bei Verwendung phasenabhängiger Nullindikatoren. Arch. f. Elektrotechnik, 1934, Bd. 28, № 8.
63. W. Geiger. Selbsttätige Abgleichung von complexen Kompensation- und Brückenschaltungen mit phasenabhängigen Nullmotoren. Arch. f. Elektrotechnik, 1935, Bd. 29.
64. W. Geiger. Wechselstrom-Kompensatoren mit selbsttätiger Abgleichung. ATM, 1936, Jahrb. 94—5.
65. J. F. Graham. Automatic a. c. Bridges. Electronics, 1951, № 2.
66. К. Б. Карандеев, Б. И. Швецкий. Устройство для автоматического уравновешивания моста переменного тока. Авторское свидетельство № 100732, 1951.
67. X. В. Силламаа. Автоматические мосты переменного тока для измерения комплексных сопротивлений. Автореф. канд. дисс. Львов, Львовск. политехн. ин-т, 1955.
68. Н. Н. Шумиловский, В. Ю. Кнеллер. Раздельное уравновешивание мостов переменного тока. Измерительная техника, 1958, № 4.
69. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневич. Автоматический мостовой измеритель комплексных сопротивлений. ЦИТЭИ, тема 36, 1959.
70. В. Ю. Кнеллер. Мосты переменного тока с автоматическим уравновешиванием двумя параметрами. Автореф. канд. дисс. М., ИАТ АН СССР, 1959.
71. А. С. Розенкранц. Автоматические мосты и компенсаторы переменного тока. ИВУЗ, Приборостроение, 1959, № 1.
72. К. Б. Карандеев, Л. Я. Мизюк, Г. А. Штамбергер. Автоматический мост для независимого измерения и регистрации активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления. Приборостроение, 1960, № 6.
73. М. А. Гаврилюк. Автоматическое уравновешивание мостов переменного тока. Автореф. канд. дисс. Львов, Львовск. политехн. ин-т, 1964.
74. A. Larsen. An Apparatus for the Measurement of Alternating Currents by the Compensation Method. Electrician, 1911, v. 66.
75. C. Deguisne. Die Kompensationsmethode bei Wechselstrommessungen. Arch. f. Elektrotechnik, 1917, Bd. V, № 10.
76. P. C. Pedersen. A New Alternating Current Potentiometer for Measurements on Telephonic Circuit. The Electrician, 1919.
77. W. Krukowski. Der Wechselstromkompensator. Springer, 1920.
78. D. C. Gall. A New Alternating Current Potentiometer. The Electrician, April 1923.
79. W. Geiger. Ein einfacher Wechselstromkompensator, ETZ, 1924, № 49.
80. A. Campbell. A New Alternating Current Potentiometer of Larsen Type. The Proc. of the Phys. Soc., 1928, v. 41, № 226.
81. А. Д. Нестеренко. Компенсационные аппараты переменного тока.— Сб. науч.-исслед. работ Киевского индустр. ин-та, № 5, 1938.
82. В. О. Арутюнов. Компенсатор (потенциометр) переменного тока. Авторское свидетельство № 97171, 1951.
83. К. Б. Карандеев. Об одной схеме компенсатора переменного тока.— Научные записки ИМА АН УССР, т. II, вып. 2. Киев, Изд-во АН УССР, 1953.
84. Б. В. Мочалов. Анализ некоторых свойств комплексных компенсаторов переменного тока. Автореф. канд. дисс. Львов, Львовск. политехн. ин-т, 1953.
85. J. Szrednicki. O sposobach niezaleznego rownowazenia pojemnosci i wspolczynnika strat w mostkach typu Scheringa. Archiwum Elektrotechniki. 1960, t. IX, s. 703.
86. Н. Е. Тодде. Wechselspannungsmessbrückenordnung für Dehnungsmeßstreifen für induktive und kapazitive Geber. Пат. ФРГ, кл. 42, № 1138239, 1963.
87. Г. Л. Грин. Активные устройства в точных мостовых схемах. Измерительная техника, 1963, № 1.
88. P. V. Feilgett. A Note on the Solution and Synthesis by Inspection of a. c. bridges. Journal Sci. Insts., 1951, v. 28, p. 316.
89. К. Б. Карандеев, В. П. Сигорский. Чувствительность электрических измерительных схем.— Научные записки Львовск. политехн. ин-та, серия электроприборостроительная, 1956, № 1.
90. Б. Н. Дудкевич. Некоторые вопросы исследования чувствительности электроизмерительных цепей переменного тока. Изв. СО АН СССР, серия техн. наук, 1964, № 6.
91. Т. А. Журавлева, К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Применение электронных вычислительных машин для выбора структур квазиуравновешенных мостов, обеспечивающих раздельное измерение компонент комплексных сопротивлений. ИВУЗ, Приборостроение, 1965, т. VIII, № 3.
92. А. М. Волков. Обобщенный анализ уравновешивания мостовых схем переменного тока. Автореф. канд. дисс. Киев, КОЛПИ, 1953.
93. A. C. Seletzky, L. A. Zurcher. Sensitivity of the Four-Arm Bridge. Elec. Eng., 1939, v. 58, p. 723.

94. К. Б. Карандеев, В. П. Сигорский, К. М. Соболевский. Влияние сопротивления в диагонали источника питания на чувствительность моста переменного тока.— Докл. Львовск. политехн. ин-та, т. I, вып. 2. Львов, Изд-во ЛГУ, 1955.
95. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневиц, К. М. Соболевский. О свойствах одной схемы моста со взаимной индуктивностью между двумя соседними плечами.— Докл. Львовск. политехн. ин-та, т. I, вып. 2. Львов, Изд-во ЛГУ, 1955.
96. К. Б. Карандеев, В. П. Сигорский, К. М. Соболевский. Некоторые вопросы теории мостов переменного тока.— Труды конференции по электрическим измерениям и приборостроению. Киев, Изд-во АН УССР, 1959.
97. К. М. Соболевский. Некоторые вопросы защиты мостов переменного тока от влияния паразитных связей. Автореф. канд. дисс. Львов, Львовск. политехн. ин-т, 1956.
98. Ф. Б. Гриневиц, К. Б. Карандеев. Об определении погрешности измерения комплексных сопротивлений. Исследования по методике оценки погрешностей измерений.— Труды Института Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 57 (117). М., Стандартгиз, 1962.
99. G. A. Campbell. The Shielded Balance. The Electrical World and Engineer, 1904, v. 43, p. 647.
100. K. W. Wagner. Zur Messung dielektrischer Verluste mit der Wechselstrombrücke. ETZ, 1911, J. 32, S. 1001.
101. J. G. Ferguson. Shielding in High Frequency Measurements. Bell. Syst. Techn. J., 1929, v. 8, p. 560; Journ. AIEE, 1929, v. 48, p. 517.
102. Th. Walcher. Elektrostatistische Abschirmung von Wechselstrommessbrücken im Tonfrequenzbereich. ATM, 1936, L. 62, S. 106.
103. E. Samal. Erdung in Messschaltungen. ATM, April, 1950; Abschirmung der Messschaltungen. ATM, Mai-Juni, 1950.
104. Ю. А. Шакола. Защита измерительных схем уравнивания от влияния электрических полей. Автореф. канд. дисс. Киев, КОЛПИ, 1955.
105. М. А. Быков. Электрическое экранирование и заземление электроизмерительных схем. Измерительная техника, 1956, № 6.
106. М. И. Левин, Р. М. Демидова. К вопросу о защите компенсационных измерительных цепей переменного тока. НДВШ, Электромеханика, и автоматика, 1959, № 2.
107. Р. М. Демидова-Панферова. Потенциометры для звуковых частот и применение их для измерений параметров электрических цепей. Автореф. канд. дисс. М., МЭИ, 1960.
108. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных электрических схем. М., Изд-во АН СССР, 1951.
109. С. М. Мандельштам. Исследование методами теории информации квантования при измерениях. Автореф. канд. дисс. Л., ЛИАП, 1963.
110. М. Л. Быховский. Основы динамической точности электрических и механических цепей. М., Изд-во АН СССР, 1958.
111. В. И. Сергеев. Основы инструментальной точности электромеханических цепей. М., Изд-во АН СССР, 1963.
112. R. Tomovic. Sensitivity Analysis of Dynamic Systems. Belgrade, Nolit, 1963.
113. В. Н. Мильштейн. Энергетические соотношения в электроизмерительных приборах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
114. Н. Балабанян. Синтез электрических цепей. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
115. D. F. Tuttle. Network Synthesis. New York, J. Wiley & Sons, 1958.
116. О. Л. Бандман. Матричный метод синтеза электронных RC-схем. Автореф. канд. дисс. Новосибирск, СО АН СССР, 1963.
117. Б. В. Карпюк. О синтезе линейных многополюсников. Электричество, 1964, № 2.
118. Б. Н. Панков, К. М. Соболевский. Мост переменного тока с согласованными сопротивлениями в плечах и диагонали источника питания.— Электрические методы автоматического контроля (Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 9). Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.

*Поступила в редакцию  
9 сентября 1964 г.*