

А. Л. ГРОХОЛЬСКИЙ, К. М. СОБОЛЕВСКИЙ
(Новосибирск)

МОСТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫМИ ПЛЕЧЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Охарактеризованы высокие метрологические свойства трансформаторных измерительных мостов и определяющие их достоинства, присущие плечевым элементам с тесной индуктивной связью. Дан краткий исторический обзор работ по трансформаторным измерительным мостам и рассмотрены основные результаты, полученные советскими специалистами. На основе анализа проведенных работ намечена программа необходимых исследований в данной области на ближайшие несколько лет.

В последние десятилетия появилась большая потребность в измерениях параметров электрических цепей и систем, что способствовало развитию мостовых методов измерения. Особое место среди мостовых измерительных цепей занимают мосты с тесной индуктивной связью между элементами (индуктивными катушками), образующими плечи отношения. Как известно, индуктивную связь между двумя катушками (L_n и L_m) называют тесной в том случае, если коэффициент связи k_c , определяемый из соотношения $k_c = \frac{M}{\sqrt{L_n L_m}}$, где M — взаимоиндуктив-

ность катушек, весьма мало отличается от единицы, т. е. когда можно принять $M = \sqrt{L_n L_m}$. Тесная связь между катушками достигается путем их намотки на общий магнитопровод, благодаря чему конструкция плечевых элементов с тесной индуктивной связью во многом напоминает конструкцию трансформаторов. Мосты с такими индуктивно связанными плечевыми элементами (трансформаторные измерительные мосты) ныне представляют собой, пожалуй, наиболее совершенное средство для точного измерения параметров электрических цепей на переменном токе. К настоящему времени разработаны и выпущены самые разнообразные трансформаторные мосты, позволяющие измерять в диапазоне частот от нескольких герц до 1000 Мгц:

активные сопротивления от 0,0001 ом до 1000 Мом с наименьшими погрешностями в 0,01 — 0,001 %;

емкости от 10^{-20} до $1 \cdot 10^{-2}$ ф с достижением исключительно малой погрешности (порядка 0,0001 %);

индуктивности от 10^{-8} до 100 гн с наименьшей погрешностью в 0,01 %.

Высокие метрологические и эксплуатационные свойства трансформаторных измерительных мостов объясняются рядом известных достоинств, присущих плечевым элементам с тесной индуктивной связью.

Одним из основных достоинств трансформаторных плечевых элементов с тесной связью является исключительная устойчивость их плечевых отношений при действии паразитных проводимостей, шунтирующих эти элементы. Указанное свойство позволило в свое время отказаться от применения в мостах вспомогательных цепей (ветвей Вагнера), что привело к ускорению измерительного эксперимента при обеспечении необходимой точности лабораторных и технических измерений, способствовало развитию методов измерения частичных проводимостей (сопротивлений) трехполюсных элементов.

Трансформаторные плечи в мостах могут иметь любые отношения в пределах от 1:1 и, по меньшей мере, до $1:10^6$, соответствующие с исключительно малыми погрешностями отношениям чисел витков в обмотках, образующих плечи. Так, например, отношение 1:10 было получено с погрешностью порядка $1 \cdot 10^{-8}$ [1]. Эта особенность мостов позволила проводить точные измерения путем переключения числа витков в обмотках и настраивать схемы, используя меры с постоянным значением.

Существенным преимуществом рассматриваемых плечевых элементов является высокая температурная и временная стабильность отношений плеч.

Наконец, трансформаторные плечи обладают исключительно широким диапазоном частотной применимости. Так, имеются трансформаторные плечи, одинаково хорошо работающие как при нескольких десятках герц, так и при десятках мегагерц.

Первое упоминание о трансформаторных измерительных мостах (называемых вначале просто дифференциальными трансформаторами) появилось, пожалуй, в 1883 г., когда Д. Розенталь запатентовал устройство моста Уитстона с дифференциальным трансформатором для измерения активных сопротивлений [2]. Позднее, в 1903 г., немецкой фирмой АЭГ было запатентовано устройство с трехобмоточным трансформатором, позволяющее измерять активные сопротивления, индуктивности, емкости, магнитные потоки и энергию электромагнитного поля [3]. Для целей измерения сопротивлений и емкостей в 1909—1912 гг. дифференциальный трансформатор использовался Х. Хаусратом [4]. В период 1913—1924 гг. А. Хундом была опубликована серия статей, посвященных трансформаторным мостам [5, 6]. Развивая идеи А. Хунда, Ф. Траутвейн [7] определил условия оптимальной чувствительности дифференциального трансформатора для случая измерения потерь в диэлектриках. В 30-е годы А. Блюмлейн [8] и Р. Уолш [9] обратили внимание на то, что в трансформаторных мостах при обеспечении тесной связи плеч отношения можно без потери точности отказаться от применения цепей Вагнера. Затем за рубежом появился ряд работ, посвященных различным схемным вариантам и конструктивным разработкам трансформаторных мостов, в частности высокочастотных [10, 11], и мостов с двумя парами тесно связанных плеч отношения [12], а также получению обмоток с сильной связью, образующих большие плечевые отношения [13]. Оригинальные разработки трансформаторных мостов принадлежат фирме Вайн-Керр [14, 15]. Методы создания точных плечевых отношений и определения их погрешностей освещены в [1, 16]. Исследования в этой области отражены также в [17—19] и ряде других публикаций.

Из известных отечественных работ, касающихся трансформаторных мостов, одной из самых ранних является диссертация К. Б. Карандеева «Дифференциальные методы измерения в цепях переменного то-

* Основное содержание этой работы было опубликовано значительно позднее [20].

ка» (1934 г.)*. В это же время Э. В. Зеляхом [21] предложен метод построения схем мостов с использованием двух трехобмоточных трансформаторов, работающих в режиме трансформатора тока и трансформатора напряжения; этот принцип был использован позднее в ряде отечественных разработок [22—24], а также нашел широкое применение в других странах. В 30-е годы был разработан и серийно выпущен первый отечественный мост типа МП для технических измерений емкости, в котором два плеча были составлены из катушек индуктивности, имеющих общий Ш-образный магнитопровод из трансформаторной стали. Несколько позднее появились работы, посвященные расчету и исследованию различных вариантов трансформаторных мостов [25—27].

В послевоенный период появились обобщающие работы [28—32], посвященные развитию теории мостовых методов измерения; они во многом способствовали также анализу и построению трансформаторных мостовых измерительных цепей. За относительно небольшой период времени получены значительные теоретические и экспериментальные результаты, нашедшие широкое применение в науке и технике.

В пятидесятых годах А. Л. Грохольским была доказана применимость трансформаторных мостов для точных метрологических работ. Им был создан мост для измерения малых емкостей в диапазоне от 0,0001 до 1000 $nф$, имеющий предельную чувствительность $5 \cdot 10^{-7} nф$ и обеспечивающий проведение эталонных работ с погрешностью, меньшей 0,001% [33]. В дальнейшем эта работа была использована при создании расчетного конденсатора малой емкости с использованием теоремы Лэмпарда [34].

В результате исследования чувствительности трансформаторных мостов [20, 35, 36] были обнаружены условия получения повышенной чувствительности; впоследствии на этой основе были определены [37] условия работы мостов с сильно выраженным максимумом чувствительности, превосходящим в десятки и сотни раз чувствительность обычных мостовых схем. Было также установлено [35, 38—40], что в трансформаторных мостах можно получить практически постоянную чувствительность в широком диапазоне изменения отношения плеч; такое постоянство имеет большую практическую ценность и используется, в частности, в автоматических контрольно-сортировочных устройствах*.

Применимость трансформаторных мостов для точного измерения малых активных и индуктивных сопротивлений четырехзажимных элементов в широком диапазоне частот была доказана в [41]. Эта работа показала перспективность применения измерителей малых полных сопротивлений для безобмоточных испытаний ферромагнитных материалов [42].

Поиски решения задачи уравнивания трансформаторных мостов по одной составляющей комплексного сопротивления привели к разработке многопредельных квазиуравновешенных мостов как с непосредственным использованием в них остаточного напряжения в измерительной диагонали для суждения о второй составляющей комплексного сопротивления, так и с введением для этой цели в измерительную диагональ соответствующего компенсирующего напряжения. Эти разработки в сочетании с использованием принципов динамической компенсации (развертывающего преобразования) позволили создать ряд автоматических быстродействующих измерительных установок для контроля и сортировки слюдяных конденсаторов по всем основным элек-

* Оставшиеся неопубликованными интересные результаты по анализу чувствительности и выбору оптимальных параметров дифференциального трансформатора были получены в 1950 г. В. А. Петровским.

трическим параметрам [43, 44]. Разработанные установки, снабженные оригинальными логическими устройствами, начали использоваться для контроля и сортировки выпускаемой массовой продукции, а также для управления некоторыми операциями в производстве радиодеталей. В последнем случае им приданы свойства самонастраивающихся систем.

Применение принципа квазиравновесия к мосту с тесно связанными плечевыми элементами привело к разработке нового способа построения квазиуравновешенных мостов для отдельного измерения составляющих комплексного сопротивления [45], с использованием определенного согласования элементов цепи. На базе этого способа, а также разработанного оригинального фазочувствительного указателя квазиравновесия, обладающего высокой чувствительностью вблизи равновесия, создана, в частности, высокопроизводительная установка повышенной точности для измерения емкости независимо от изменяющегося в широком диапазоне значения тангенса угла потерь.

Развитие теории автоматических мостов с экстремальным регулированием [46, 47] позволило создать ряд автоматических измерительных устройств. Среди них следует отметить автоматические емкостные уровнемеры [48, 49], являющиеся шестиплечевыми уравновешенными трансформаторными мостами, в которых уравновешивание осуществляется путем изменения числа витков в плечевых обмотках при помощи реверсивных двоично-десятичных счетчиков импульсов. Метод уравновешивания моста при помощи изменения числа витков в обмотках позволил также создать трансформаторные мосты с множественным дискретным отношением плеч. Эти мосты чрезвычайно упростили проведение статистических исследований качества выпускаемой продукции [50].

В отличие от предпринимаемых за рубежом попыток решить задачу получения больших плечевых отношений (single coil problem) путем усложнения конструкций плечевых трансформаторов [13, 15] в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР указанная задача решена путем создания трансформаторных мостов с использованием трех и более отношений плеч [51]. Эти трансформаторные мосты могут иметь очень большие плечевые отношения при использовании в них в качестве составных элементов трансформаторов с небольшими плечевыми отношениями. Благодаря наличию в каждом используемом трансформаторе заземленной точки схемы мостов с несколькими отношениями плеч имеют большие преимущества по сравнению со схемами каскадного включения.

С целью повышения точности плечевых отношений отдельных трансформаторов одним из авторов предложен метод получения волновых мультифилярных обмоток с тесной электромагнитной связью, обеспечивающих с помощью одного трансформатора плечевые отношения $1 : 100$ с погрешностью не более $0,001\%$ [52]. Созданы также многообмоточные плечевые узлы с компенсационной обмоткой [53], пригодные для работы на частотах от десятков герц до сотен мегагерц. Подобные обмотки обеспечивают мостовым цепям без переключения трансформатора рабочий диапазон частот, в котором отношение высшей частоты к низшей составляет $10^5 - 10^6$ и даже больше, что достигается высокой симметрией обмоток и сильной электромагнитной связью между всеми обмотками, включая и генераторную (или индикаторную) обмотку.

К рассматриваемым устройствам, по существу, относятся также исследованные М. П. Цапенко многомостовые измерительные цепи [54]; они позволяют благодаря отсутствию кондуктивных связей между плечевыми обмотками в трансформаторных мостах суммировать показания большого числа датчиков, что достигается путем сложения сигнала не-

баланса в индикаторных диагоналях отдельных мостов, находящихся в неуравновешенном режиме. Теоретический анализ режимов работы трансформаторных многомостовых цепей позволил разработать специальную технологию создания соответствующих трансформаторов [55].

Хорошие результаты дало сочетание в мостовой измерительной цепи обычных резистивно-емкостных плеч отношения и плеч с тесной индуктивной связью. На этой основе создана оригинальная мостовая установка высокой точности для измерения емкостей и очень малых углов потерь [56].

Необходимость создания мостовых цепей с рассредоточенными функциональными узлами (в частности, для решения проблемы дистанционности при динамических измерениях), требовавшая повышения устойчивости плечевых отношений, привела авторов к созданию в трансформаторных мостах вспомогательной ветви, аналогичной ветви Вагнера, путем использования трансформаторного вспомогательного узла. Такие цепи оказались еще более устойчивыми, чем обычные трансформаторные мосты. Эксплуатационным достоинством цепей является то, что вспомогательные плечи из трансформаторных обмоток не нуждаются в подстройке при уравнивании основной цепи или же в некоторых случаях уравнивание основной цепи и вспомогательной ветви может успешно вестись одновременно с помощью механически сопряженных переключателей.

Приведенные примеры не охватывают полностью всех решенных к настоящему времени вопросов, касающихся теории и построения трансформаторных мостов (см., например, [57—59]). В этой области ведутся интенсивные исследования как у нас, так и за рубежом. И если еще несколько лет тому назад возможности трансформаторных мостов оспаривались, то сегодня установилось полное единодушие в оценке их перспективности.

Анализ всех проведенных работ позволяет наметить ряд вопросов теории и практики трансформаторных мостов, подлежащих решению в ближайшие несколько лет.

Прежде всего нужна дальнейшая разработка теории плечевых обмоток с тесной электромагнитной связью. Объяснение особенностей работы трансформаторных мостов только наличием одной тесной индуктивной связи между обмотками уже недостаточно. Процессы, протекающие в обмотках, много сложнее. Они будут легче вскрыты, если продолжить разработку теории взаимосвязи плечевых обмоток на основе общей теории электромагнитного поля и, в частности, теории линий с распределенными параметрами. Применение последней к описанию процессов в простых бифилярных обмотках уже позволило глубже понять явления в плечевых трансформаторах, их поразительную устойчивость и широкий частотный диапазон. Следует распространить эти положения на мультифилярные системы, какими являются многообмоточные трансформаторные плечи, и создать теорию многообмоточных трансформаторных цепей.

Необходимо продолжать теоретические исследования процессов уравнивания трансформаторных мостов, поскольку эти процессы, имеющие свои специфические особенности (в сравнении с аналогичными процессами в обычных мостах переменного тока), в настоящее время изучены недостаточно.

Применение трансформаторных мостов для создания автоматических измерительных устройств и для определения динамических характеристик исследуемых элементов и систем настоятельно требует проведения теоретических и экспериментальных исследований переходных про-

цессов в трансформаторных мостах и индикаторных устройствах с целью выявления источников погрешности при измерениях характеристик быстро протекающих процессов или ускоренных измерениях параметров контролируемых объектов. Следует продолжить поиск схемных решений, которые позволили бы создавать точные автоматические трансформаторные мосты для измерения индуктивностей и активных сопротивлений с использованием емкостных образцовых мер. Возможно, при этом придется пойти по пути создания гибридных схем, сочетающих свойства трансформаторных мостов с наиболее положительными свойствами обычных мостов.

Ждет рассмотрения вопрос о влиянии параметров ферромагнитного сердечника трансформатора на значение эффективных сопротивлений плечевых обмоток при различных режимах работы — при наличии в момент равновесия магнитного потока в сердечнике и без него. В настоящее время в этом вопросе нет ясности и имеются разноречивые толкования, что затрудняет поиск методов понижения погрешности мостов, работающих в режиме квазиравновесия.

Нет еще теории обмоток трансформаторных плечей со многими отводами для одновременного подключения нескольких полных сопротивлений. Остается нерассмотренным вопрос о выборе оптимальных параметров обмоток при их каскадном включении с целью получения минимальных погрешностей при дробных плечевых отношениях.

Несмотря на имеющиеся достижения, необходимо и впредь совершенствовать методы получения больших плечевых отношений, особенно при повышенных и высоких частотах.

Особо необходимы теоретические и экспериментальные работы по повышению чувствительности трансформаторных мостовых цепей и индикаторов их настройки. Требуется повысить общую чувствительность мостов, по крайней мере, на один-два порядка. Это особенно важно для установок, измеряющих тангенс угла потерь и добротность у исследуемых объектов с малыми потерями. Следует разрабатывать индикаторы настройки цепей, имеющие как очень большие, так и очень малые входные сопротивления, и чувствительные к напряжению или току. В этих индикаторах наряду с обычными методами усиления малых токов и напряжений целесообразно будет использовать новые принципы усиления и индикации малых количеств энергии, выделяющейся в измерительной диагонали мостовой цепи, разработанные в других областях радиоэлектроники. Не исключено, что при этом придется использовать явление сверхпроводимости.

Наконец, настоятельно необходимо создать высокоточные меры индуктивности постоянного и переменного значения для широкого диапазона частот, в том числе с возможно большой добротностью, и переменные частотонезависимые образцовые сопротивления, а также создать методы и устройства для бесконтактного уравнивания трансформаторных мостовых цепей.

Вот перечень основных вопросов, решение которых, по нашему мнению, будет способствовать совершенствованию трансформаторных мостов и приведет к еще более широкому их использованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. M. Thompson. The precise measurement of small capacitances. IRE Transactions on Instrumentation, 1958, VI — 7, N 3—4.
2. D. Rosenthal. Elektrotechnische Zeitschrift, 1883, 4, S. 147.
3. Patentschrift № 147359, класс 21e, от 11 января 1904 г., заявлено 25 февраля 1903 г.
4. H. Hausrath, Nernst-Festschrift, 1912, S. 176—189.

5. A. Hund, Jahrb. der Elektrotechnik, 1913, S. 199.
6. A. Hund, Electrical World, 1924, v. 84, p. 988.
7. F. Trautwein, Jahrb. der d. Tel. und Telfh., 1921, Bd. 28, S. 261—290.
8. A. D. Blumlein, British Patent N 323037, 1928.
9. R. Walsh. Inductive ratio arms in alternating current bridge circuits. Philosophical Magazine. 7-th series, 1930, v. 10, p. 49.
10. H. L. Kirke. Radio-frequency bridges. Journal IEE, 1945, v. 92, P. III, p. 2.
11. H. T. Wilhelm. Impedance bridges for the megacycle range. Bell Syst. Techn. Journal, 1952, v. 31, p. 999.
12. H. A. Clark, P. B. Vanderlyn. Double-ratio a. c. bridges with inductively-coupled ratio arms. Proc. IEE, 1949, v. 96, P. III, p. 189, 210.
13. C. W. Oatley, J. G. Yates. Bridges with coupled inductive ratio arms as precision instruments for the comparison of laboratory standards of resistance or capacitance. Proc. IEE, 1954, v. 101, P. III, p. 91.
14. R. Calvert. A new technique in bridge measurements. Electronic Engineering, 1948, v. 20, p. 28—29.
15. R. Calvert. The transformer ratio-arm bridge. Instruments and Control Systems, 1961, N 34, p. 102—106.
16. R. D. Cutkosky, J. Q. Shields. The precision measurement of transformer ratios. IRE Transactions on Instrumentation, 1960, VI—9, N 2.
17. C. A. Parry. Design factors in a capacity bridge of high accuracy. Communication Review, 1948, v. 1.
18. F. A. C. Butler. Bridges with inductive ratio arms. Compensation for leakage reactance effects. Electronic Technology, 1960, v. 37, N 8, p. 303—309.
19. W. H. P. Leslie. Choosing transformer ratio-arm bridges. Proc. IEE, 1961, v. 108, P. B, N 41.
20. К. Б. Карандеев. Некоторые вопросы теории дифференциальных трансформаторов.—Научные записки Львовск. политехн. ин-та, серия электротехн., 1949, вып. 5, № 2.
21. Э. В. Зелях. Авторское свидетельство № 42208 от 4 мая 1934 г.
22. Я. Л. Альтерман, Г. В. Демьянченко, С. А. Красик. Мост типа МПС-150 для измерения полных сопротивлений. Вестник связи, 1953, № 2.
23. С. А. Красик. Мост для измерения полных сопротивлений (проводимостей) в диапазоне частот до 300 кГц.—Труды конференции по электрическим измерениям и приборостроению (Львов, 1956). Киев, Изд-во АН УССР, 1959.
24. С. А. Красик. Комплект приборов для измерения больших значений отношений комплексных напряжений на частотах от 10 до 1000 кГц.—Труды конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений (Новосибирск, 1959). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
25. И. И. Закрегер. Автоматическое измерение малых механических перемещений индуктивным методом. Автоматика и телемеханика, 1938, № 2.
26. В. Н. Мильштейн. Основы электрического расчета индуктивных измерителей малых перемещений. Автоматика и телемеханика, 1940, № 2.
27. Е. И. Дмитриев. Измерение малых перемещений индуктивным методом. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1945.
28. К. Б. Карандеев. Методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1952.
29. А. Д. Нестеренко. Основы расчета электроизмерительных схем уравнивания. Киев, Изд-во АН УССР, Изд. 1, 1953; Изд. 2, 1960.
30. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. Киев, Гостехиздат УССР, 1953.
31. К. М. Соболевский, Ю. А. Шакола. Защита мостов переменного тока. Киев, Изд-во АН УССР, 1957.
32. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
33. А. Л. Грохольский. Образцовые меры емкости первого разряда. Автореферат диссертации. Л., ВНИИМ, 1955.
34. А. Л. Грохольский, В. А. Одинцов. О повышении точности воспроизведения единицы емкости — фарады. Изв. Сиб. отд. АН СССР, серия техн. наук, 1964, № 2.
35. 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, 1955, т. I, вып. 2.
36. Б. И. Брагин. Анализ мостовой схемы с двумя парами индуктивно связанных плеч для измерения малых емкостей.—Труды Рязанского радиотехн. ин-та, т. I, 1956.
37. Г. В. Гессен. О чувствительности некоторых мостовых цепей с индуктивно связанными плечами.—Труды Института Комитета стандартов, вып. 67 (127). М.—Л., Стандартгиз, 1962.

38. К. М. Соболевский. Некоторые вопросы защиты мостов переменного тока от влияния паразитных связей. Автореферат диссертации. Львов, Львовск. политехн. ин-т, 1956.
39. К. М. Соболевский, Ф. Б. Гриневиц. К вопросу о чувствительности моста с тесной индуктивной связью.—Электрические методы автоматического контроля (Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 5). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
40. К. М. Соболевский. Чувствительность четырехплечего моста при одном способе включения.—Электрические методы автоматического контроля (Труды ИАЭ (Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 5). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
41. А. Л. Грохольский. Измеритель малых активных и реактивных сопротивлений при высоких частотах.—Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды II конференции, Новосибирск, 1960). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
42. А. Л. Грохольский. Измеритель магнитных характеристик материалов. Новые методы и аппаратура для испытаний ферромагнитных материалов.—Труды Института Комитета стандартов, вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
43. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневиц. О построении автоматических мостов для измерения параметров конденсаторов малой емкости.—Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды II конференции, Новосибирск, 1960). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
44. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневиц, В. П. Шульц. О построении автоматических мостовых устройств сортировки слюдяных конденсаторов.—Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды II конференции, Новосибирск, 1960). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
45. К. М. Соболевский, Б. Н. Панков. Способ измерения комплексных сопротивлений. Авторское свидетельство № 160755, 1963.
46. Ф. Б. Гриневиц. Принципы построения автоматических мостов переменного тока с экстремальным регулированием. Измерительная техника, 1960, № 12.
47. Ф. Б. Гриневиц. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
48. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневиц, А. И. Новик. О построении емкостных уровнемеров. Измерительная техника, 1961, № 10.
49. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневиц, А. И. Новик. Емкостной уровнемер. Авторское свидетельство № 146521, 1961.
50. Б. Н. Панков, В. П. Шульц. Устройство для статистического контроля конденсаторов по емкости.—Передовой научно-технический опыт, № 35—63—392/3. М., ГОСИНТИ, 1963.
51. Ф. Б. Гриневиц, Б. Н. Панков, К. М. Соболевский. Мост переменного тока с тесной индуктивной связью. Авторское свидетельство № 167242, 1963.
52. А. Л. Грохольский. Способ изготовления трансформаторов с распределенными параметрами. Авторское свидетельство № 164892, 1962.
53. А. Л. Грохольский. Трансформатор для включения в мостовую схему с индуктивно связанными плечами. Авторское свидетельство № 155854, 1962.
54. М. П. Цапенко. Многомостовые измерительные схемы переменного тока. Измерительная техника, 1956, № 6.
55. М. П. Цапенко. Автоматические измерительные компенсаторы с декадными магазинами сопротивления. Автореферат диссертации. М., МЭИ, 1957.
56. И. Н. Кротков. Методы и аппаратура для точных измерений основных характеристик диэлектриков в диапазоне частот радиовещания. Измерительная техника, 1964, № 4.
57. Ю. П. Зданис. Основные свойства измерительных схем с дифференциальными трансформаторами и сопоставление их с мостовыми схемами.—Труды конференции по электрическим измерениям и приборостроению (Львов, 1956). Киев, Изд-во АН УССР, 1959.
58. О. Г. Малкина. Измерение комплексных сопротивлений методом магнитосвязанных цепей. Измерительная техника, 1959, № 6.
59. О. Г. Малкина. Магнитосвязанные цепи как элементы автоматики и аппаратов. Автореферат диссертации. М., МЭИ, 1963.

*Поступила в редакцию
8 сентября 1964 г.*