

УДК 621.318.56

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И МАШИНЫ
ИЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СРЕДЫ

В.Л. Дятлов

В в е д е н и е

Около 25 лет назад в ИМ СО АН СССР в связи с разработкой вычислительных сред [1-4] Э.В.Евреинов предложил осуществлять настройку элементов среды на основе электромеханических триконов - группы определенным образом соединенных электромеханических реле. По своим основным электрическим свойствам для этой цели вполне подходили электромеханические реле с изолированными контактами. Они в принципе позволяют достичь высокой скорости распространения сигнала благодаря образованию гальванических линий связи между элементами вычислительной среды. Однако по другим своим свойствам, и прежде всего по уровню сигнала, потребляемой мощности, размерам и по технологии изготовления, существующие электромеханические реле оказались явно несовместимыми с электронными компонентами вычислительных сред. В связи с этим возникла идея создания электромеханических реле из тонких пленок.

Пленочная электромеханика в те годы (начало 60-х годов) находилась в зачаточном состоянии. Не было ни теории, позволяющей с единых позиций рассматривать механические и электрические процессы в тонких пленках, ни методов конструирования пленочных электромеханических устройств, ни многого другого, без

чего невозможно было приступить к выпуску промышленных изделий. Но уже в то время развивалась технология микроэлектроники и было понятно, что эта технология принципиально может быть использована для создания пленочных электромеханических реле.

Таким образом, казалось бы чисто утилитарная цель - построение коммутирующих устройств для вычислительных сред - привела к необходимости создания основ новой научно-технической области, названной пленочной электромеханикой. Это, в свою очередь, вывело на более широкую область приложений. Весьма примечательно, что когда запросы практики вышли на стадию применения больших совокупностей взаимосвязанных пленочных электромеханических элементов, то вновь возникла идея однородной среды, но уже не вычислительной (аналога мозга), а электромеханической (аналог рецепторов и мышц).

В развитии пленочной электромеханики можно выделить три направления исследований.

1. Обоснование выбора электростатического, а не электромагнитного принципа действия устройств и машин пленочной электромеханики. Начало этому обоснованию дали на первый взгляд парадоксальные результаты сопоставления пленочных электромагнитных и электростатических реле [5]. При одних и тех же габаритах, порядка $1 \times 1 \text{ мм}^2$, силы разрыва и прижатия контактов в пленочных электростатических реле оказались на три порядка больше, чем эти же силы в пленочных электромагнитных реле. Тем самым был определен выбор пленочных электростатических реле в качестве коммутаторов полупроводниковых элементов вычислительных сред [4]. Аналогичные выводы были сделаны и в США, где разработка пленочных электростатических реле для коммутации полупроводниковых схем была начата приблизительно на 10 лет позже [6].

В связи с развитием других областей пленочной электромеханики потребовалось значительно более глубокое обоснование

преимуществ электростатического принципа действия, чем только на примере двигателей пленочных электростатических реле. Этому посвящен §1.

2. Создание основ теории, технологии и конструирования отдельных пленочных электростатических устройств и машин малой мощности. В этом направлении исследований в настоящее время получено большое число результатов. В §2 обсуждаются основные из этих результатов и показаны энергетические преимущества емкостных устройств и машин перед электромагнитными.

3. Создание основ теории, технологии и конструирования пленочных электромеханических сред относительно большой мощности, представляющих собой параллельное и (или) последовательное механическое соединение большого числа отдельных пленочных электростатических машин малой мощности. Хотя это направление исследований делает только первые шаги, оно начинает диктовать те рамки, в которых должны проводиться работы по пленочной электромеханике. В настоящей работе проведен обзор первых результатов в этом направлении и изложены основы теории электромеханических сред, как механических систем с большим числом механических свобод (§ 3-5).

§1. Сопоставление индуктивных и классических емкостных устройств и машин

Существуют два основных способа прямого электромеханического преобразования энергии, основанных на механическом изменении в электрической цепи либо индуктивности, либо емкости [7]. Соответственно различают электромеханические электромагнитные (или индуктивные) и электростатические (или емкостные) устройства и машины.

В настоящее время в подавляющем большинстве случаев применяются индуктивные машины и устройства, что приводит к бытующим представлениям об их бесспорным преимуществом перед ем-

костными. Вместе с тем по мере развития теории электромеханических преобразователей энергии [8-10] становится все очевиднее, что по целому ряду свойств емкостные устройства и машины имеют неоспоримые преимущества перед индуктивными.

Одна из основных целей данного параграфа состоит в том, чтобы провести анализ фундаментальных свойств емкостных устройств и машин, вскрыть причины, вследствие которых емкостные электромеханические преобразователи энергии долгое время не находили широкого применения в технике, и показать пути устранения главных недостатков емкостных устройств и машин. В этой связи прежде всего необходимо провести сопоставление основных свойств и особенностей индуктивных и классических емкостных устройств и машин, конструкции которых появились до 60-х годов нашего века [8].

Классические емкостные устройства можно разделить на две группы: с твердыми и гибкими обкладками механических конденсаторов переменной емкости.

В первой группе наиболее известны конденсаторы с механически управляемой емкостью: воздушные настроечные и подстроечные конденсаторы, переменные конденсаторы с твердым диэлектриком [11] и конденсаторы переменной емкости электростатических вольтметров. Известны также электростатические реле с приводом в виде воздушного конденсатора переменной емкости [12], конструкция которого такая же, как и электростатического вольтметра. Во всех этих устройствах подвижные обкладки в виде жестких пластин совершают движение своими плоскостями параллельно плоскостям жестких неподвижных обкладок-пластин, что приводит к изменению емкости. В этих устройствах рабочий зазор между подвижными и неподвижными обкладками-пластинами при движении подвижных обкладок остается постоянной величиной.

Во второй группе классических емкостных устройств с гибкими подвижными обкладками известны: акселерометры с подвижной

обкладкой-маятником в виде консоли или балки [13], электростатические реле с подвижной обкладкой в виде консоли или пленочной ленты [14-18]; световые клапаны с подвижной обкладкой, например, в виде изогнутой по дуге окружности пластины [19]. Во всех этих устройствах толщина рабочего зазора между подвижными и неподвижными обкладками изменяется при изгибе подвижной обкладки.

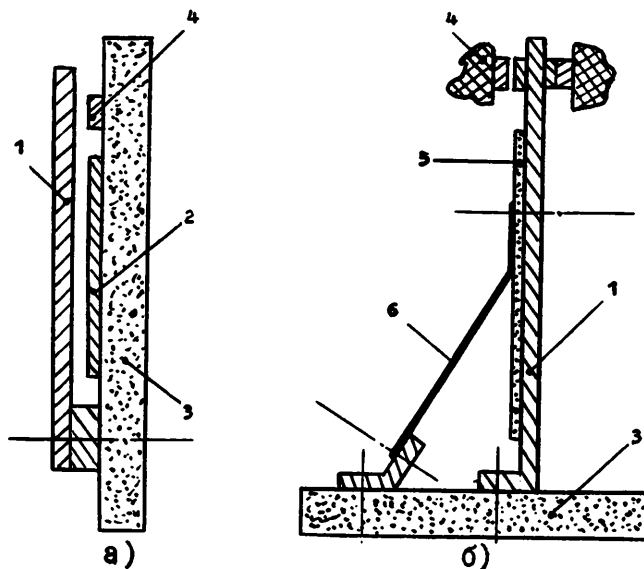


Рис. 1

На рис.1 показано: а) электростатическое реле с подвижной обкладкой в виде консоли [17,18] и б) электростатическое реле в виде пленочной ленты [14-16] (1 - гибкие пластины; 2 - неподвижный электрод, 3 - основание, 4 - неподвижные контакты, 5 - тонкий слой диэлектрика, 6 - гибкая пленочная лента из проводящего ток материала).

Подвижная обкладка-лента 6 при своем движении накатывается на слой диэлектрика 5, покрывающий подвижную обкладку 1. В рассматриваемой конструкции реле, предложенной в 1934 году Л.А.Гончарским [14], электростатический накат впервые использован для получения внешней работы (по перемещению контактов реле).

Можно видеть, что конструкция емкостных реле заметно проще конструкций индуктивных реле [20]. Простота конструкций характерна для всех емкостных устройств и является основой высокой технологичности. В этом состоит большое преимущество емкостных устройств перед индуктивными, в конструкциях которых необходимо использовать сложные в технологическом отношении элементы: магнитопровод и обмотки. Однако прямые опыты с рассмотренными выше классическими емкостными устройствами показали [21], что они не обладают в достаточной мере ни чувствительностью (акселерометры), ни силой тяги (реле), ни скоростью переключения (световые клапаны-оптические затворы). И, что совсем плохо, они работают при управляющих напряжениях порядка 1000 В и выше, что значительно превышает стандартные значения напряжений источников питания, принятые в аппаратуре систем автоматики и вычислительной техники, систем отображения информации и т.д.

Классические емкостные машины, генераторы и двигатели, по классификации Л.С.Полотовского [8], делятся на две группы: с твердым (жестким) и гибким ротором. Твердый ротор выполнялся из диэлектрических и проводящих материалов в виде цилиндров и дисков. Гибкий ротор выполнялся из диэлектрических и проводящих материалов в виде ленты, водяных капель, струй пара или пыльного воздуха, металлических пластинок или шариков.

В наибольшей мере учтены особенности емкостного способа электромеханического преобразования энергии в машинах Уимшера, Теплера, Гольца, Желиве, Феличи с дисковым ротором [8].

Именно эти машины целесообразно прежде всего иметь в виду при сопоставлении емкостных и индуктивных машин.

Основное наиболее известное преимущество емкостных машин с дисковым ротором и статором перед индуктивными, согласно Л.Р.Нейману, П.Л.Калантарову, К.С.Демирчану [9,10], связано с коренным отличием электрических и магнитных явлений - существованием уединенных электрических зарядов и отсутствием таковых у магнитных зарядов. Для создания рабочего электрического поля в рабочем зазоре емкостных устройств и машин достаточно небольшого, определяемого длиной Дебая количества проводящего вещества (на поверхностях дисков) [22]. В то же время для создания рабочего магнитного поля в рабочем зазоре индуктивных устройств и машин необходимо значительное количество ферромагнитного вещества в виде большого по весу и размерам магнитопровода. Магнитопровод индуктивных устройств и машин служит для искусственного создания разноименных магнитных зарядов на границах рабочих зазоров. Именно магнитопровод определяет низкую энергоемкость (отношение работы за рабочий цикл или мощности к массе преобразователя) индуктивных машин, например двигателей, по сравнению с энергоемкостями пневматических и гидравлических преобразователей и энергоемкостью мышц животных (табл.1) [23].

Т а б л и ц а 1

Преобразователи	Энергоемкость, Дж/кг
Индуктивные	1
Пневматические и гидравлические	10
Мышцы высших животных	100

Другое преимущество емкостных машин перед индуктивными связано с принципиальным отличием токопроводов в конструкциях этих машин, соответственно параллельным и последовательным соединениям рабочих элементов токопроводов (обкладок,

витков, обмоток). В индуктивных устройствах и машинах из-за последовательного соединения витков проводящее вещество обмоток должно обладать малой величиной удельного активного сопротивления. В связи с этим в данных устройствах и машинах широко применяется медь, со всеми вытекающими отсюда негативными последствиями экономического характера. Напротив, в емкостных же устройствах и машинах благодаря применению параллельных схем включения величина активного сопротивления материала обкладок, дисков не является фактором, существенно снижающим их технико-экономические характеристики. В конденсаторостроении самое широкое применение нашли менее дефицитные металлы с относительно высоким удельным сопротивлением, например алюминий [11].

Емкостные машины "дуальные" [24] индуктивным машинам, т.е. их теория подобна теории индуктивных машин при замене тока на напряжение, потокосцепления на заряд, индуктивности на емкость. В этой связи, если индуктивный генератор является машиной напряжения, то емкостный генератор является машиной тока, т.е. в электрической схеме они могут быть представлены соответственно в виде источников напряжения и тока. Напротив, в этом же смысле, если индуктивный двигатель является машиной тока, т.е. его момент на валу непосредственно зависит от тока, то емкостный двигатель является машиной напряжения, т.е. его момент на валу непосредственно зависит от напряжения. Это принципиальное отличие индуктивных и емкостных машин таит возможности их эффективного совместного применения. Так, идеальное сочетание имеют две системы генератор-двигатель: емкостный генератор - индуктивный двигатель и индуктивный генератор - емкостной двигатель. В этом смысле плохо согласуется система индуктивный генератор - индуктивный двигатель.

В настоящее время согласование индуктивных генераторов (сети) с индуктивными двигателями по току достигается, например, путем применения между генераторами (сетью) и двигателями искусственных источников тока [25], что позволяет получить вы-

ские параметры регулирования соответствующих приводов. Однако при этом приходится мириться с тем, что масса искусственного источника тока, состоящего из батарей конденсаторов, индуктивных дросселей и полупроводниковых вентилей, в несколько раз превышает массу двигателя (например, в 2-5 раз для двигателей 5-15 кВт [25]).

Коммутация индуктивных машин связана с перенапряжением, а коммутация емкостных машин связана с бросками тока. При применении полупроводниковых коммутаторов перенапряжения представляют большую опасность, чем броски тока. В этой связи в индуктивных машинах для уменьшения перенапряжений применяют батареи демпфирующих конденсаторов [26].

В режиме торможения индуктивные и емкостные двигатели проявляют себя совершенно по-разному. Режим торможения индуктивного двигателя связан с большим дополнительным расходом электрической энергии (нередко недопустимым). Режим торможения емкостного двигателя связан с весьма небольшим расходом электрической энергии (и всегда допустим). В этом режиме емкостные двигатели напоминают пневматические преобразователи для создания регулируемого давления - важнейшей функции устройств современного производства и транспорта (клапаны, захваты роботов, предохранительные стопорные устройства, муфты и тормозные устройства транспортных средств и т.д.).

В современной технике почти 100% электрической энергии вырабатывается индуктивными генераторами и до 70% ее потребляется индуктивными двигателями [25]. Это приводит к большим потерям энергии в электрических сетях и линиях электропередачи, вследствие относительно малых значений $\cos \varphi$ у машин индуктивного характера. Совместное использование индуктивных и емкостных машин открывает возможность повысить $\cos \varphi$ и позволяет уменьшить потери энергии без использования батарей компенсирующих конденсаторов [26].

Классические емкостные машины не нашли сколь-нибудь заметного применения из-за их низкой энергоемкости и высоких рабочих напряжений. Их энергоемкость, по оценке Л.С.Полотовского [8], составляет одну сотую - одну десятую энергоемкости индуктивных машин. Рабочие напряжения для наиболее энергоемких дисковых емкостных машин составляют около 200 кВ, далеко выходящие за пределы стандартных напряжений, принятых в промышленности.

§2. Пленочная электромеханика - определение путей коренного улучшения основных параметров емкостных устройств и машин

Основной недостаток классических емкостных устройств и машин, определяющий их низкие потребительские свойства, связан с малыми величинами достигнутых напряженностей электрических полей в их рабочих зазорах.

В середине 60-х годов появились первые публикации, в которых были описаны емкостные электромеханические устройства, созданные в результате применения ряда групповых приемов технологии микроэлектроники: напыления в вакууме, фотолитографии, селективного изотропного и анизотропного травления, диффузионной сварки и т.д. [27]. К первым таким устройствам следует отнести разработанный в США транзистор с резонирующим затвором - малогабаритный электромеханический фильтр на низкие и средние частоты [28], и разработанное в лаборатории пленочной электромеханики ИМ СО АН СССР для целей коммутации логических элементов вычислительных сред [29] пленочное электростатическое реле [30]. Указанная технология позволила создать большое число таких устройств на подложках из стекла, ситалла, кремния. Оказалось возможным на одной подложке создавать не только электромеханические, но и электронные элементы и схемы таких элементов. Подвижные элементы емкостных устройств выполнялись как из

тонких пленок, так и из участков кремниевой подложки. Главная особенность этой технологии, применительно к созданию емкостных электромеханических устройств, состоит в том, что удалось возможным уменьшить рабочие зазоры между электростатически взаимодействующими частями устройств до единиц микрона. Тем самым толщины рабочих зазоров в емкостных устройствах по сравнению с классическими были уменьшены в 100 - 1000 раз. Главным результатом такого значительного уменьшения толщин зазоров явилось значительное увеличение напряженности рабочего электрического поля. Таким образом, в области емкостных электромеханических устройств и машин был впервые использован размерный физический эффект, состоящий в значительном увеличении пробивных величин напряженности электрического поля при уменьшении толщин пробивных промежутков, хорошо известный уже разработчикам классических емкостных устройств и машин [8]. Увеличение рабочих напряженностей электрических полей ведет к улучшению всех основных параметров емкостных электромеханических устройств: чувствительности, силы тяги, скорости переключения и т.д. Все это достигается при значительном снижении величины рабочих напряжений вплоть до 10 В [31,32] и позволяет непосредственно согласовать по напряжению электромеханические и электронные компоненты таких устройств. С появлением миниатюрных электромеханических устройств возникло новое направление, названное "микромеханикой".

В конце 60-х, начале 70-х годов в лаборатории пленочной электромеханики ИМ СО АН СССР совместно с НПО "Восток" были разработаны экспериментальные и опытные серии [33,34] образцов пленочных электростатических реле универсального назначения, в том числе с изолированными контактами, и матрицы пленочных модуляторов света с загнутыми по окружности пленочными лепестками, движение которых осуществляется электростатическим накатом [35,36]. В США Престоном [31] были разработаны первые матрицы

мембранных модуляторов света для ввода данных в световые вычислительные машины, а Ван-Ралтом [37] - первые матрицы мембранных модуляторов света для проекционного телевизора с большим экраном. Были разработаны также пленочные акселерометры и датчики колебаний [27], мембранные зеркала телескопов с управляемо-подвижной поверхностью зеркала для устранения искажений, порождаемых турбулентностью атмосферы [38]. К концу 70-х - началу 80-х годов аналогичные работы получили большое развитие в США. Они обстоятельно представлены в обзорной статье Петерсена [39]. Одним из важнейших направлений микромеханики становится создание из материала одной и той же кремниевой подложки как самих механических датчиков (например, акселерометров), так и дополняющих эти датчики электронных схем. Применение групповой прецизионной технологии микромеханики впервые позволило получить в законченном виде миниатюрные, высококачественные и одновременно дешевые электромеханические датчики. Подобные работы получают развитие и в СССР [13].

В микромеханике нашли применение конструкции емкостных устройств, подобные конструкции классического электростатического реле с подвижной консолью, и конструкции с электростатическим накатом, подобные конструкции классического электростатического реле с гибкой лентой (см. рис.1).

Электростатический накат в конструкциях емкостных устройств микромеханики впервые был использован в разработке лабораторной пленочной электромеханики ИМ СО АН СССР в пленочных электростатических реле [29,33] и модуляторах света с загнутыми по дуге окружности пленочными лепестками [35,36,40]. Это позволило получить близкую к минимальной величину силы, достаточную для прижатия контактов в реле [29,34,41,42] и относительно большие перемещения лепестков при достаточно малых напряжениях управления в модуляторах света [35,36]. В то же время из разработок лаборатории пленочной электромеханики ИМ СО АН СССР

стало ясно, что для успешного применения электростатического наката требуется проведение отдельного исследования электростатического наката как физического процесса, связанного со значительно большим числом физических и механических факторов, чем процесс движения подвижного электрода в конструкциях с зазором, заполненным только газом. С применением при электростатическом накате слоя твердого диэлектрика связано появление таких дополнительных физических факторов, как адгезия [43], электрические частичные разряды [44-46], релаксация электрических зарядов [47,48], а также значительное увеличение роли неоднородностей гибкой пленки и неподвижного электрода.

Проведенные в лаборатории пленочной электромеханики ИМ СО АН СССР исследования электростатического наката [40,48,49] позволили установить, что этот процесс характеризуют пороговые значения напряжений: начала движения накатом, начала возникновения частичных разрядов, катастрофического пробоя. Напряжение катастрофического пробоя больше напряжения порога частичных разрядов [44-46]. Напряжение порога начала движения накатом может иметь величину, как меньшую, так и большую величины напряжения начала частичных разрядов. Очевидно, при напряжениях выше катастрофического пробоя наката вообще не будет. Было установлено [48], что воспроизводимые результаты получаются только при напряжениях начала движения накатом, меньших напряжения начала частичных разрядов. Поскольку это условие выполнимо только при использовании для электростатического наката достаточно тонких гибких пленок (металлических, толщиной не более 1 мкм, односторонне металлизированных полимерных, толщиной около 10 мкм и меньше), то было установлено, что электростатический накат, как стабильный обратимый процесс, является размерным физическим эффектом, проявляющим себя только при значительном уменьшении толщин гибких подвижных пленок. Этот размерный фи-

зический эффект [50,51] назван "обратимым электростатическим накатом".

Разработчики классических емкостных электромеханических устройств не могли иметь в своем распоряжении пленок с толщами, обеспечивающими условия обратимого электростатического наката. Такие пленки появились лишь с развитием вакуумной технологии напыления в 60-х годах [27-29] и развитием методов получения тонких полимерных пленок из полиэтилентерефталата, поликарбоната, полипропилена в химической промышленности в 70-х годах [26,45]. При применении относительно толстых пленок сильно возрастают напряжения порога начала движения накатом и этот процесс может происходить при напряжениях, превышающих порог возникновения частичных разрядов, т.е. в условиях отсутствия стабильности. В этой связи становится очевидным замечание Б.С.Соцкова [21] о том, что электростатические реле с электростатическим накатом 30-х годов не нашли применения в телефонной аппаратуре из-за большой нестабильности.

При использовании не только тонких подвижных пленок, но и тонких диэлектрических слоев [48,49] эффект электростатического наката соединяется с известным в теории пленочных конденсаторов размерным физическим эффектом значительного увеличения рабочих электростатических полей по мере уменьшения толщин диэлектрических пленок конденсаторов [45]. Соединение двух указанных размерных физических эффектов позволило резко повысить эффективность электростатического наката благодаря увеличению действующих сил при относительно высокой стабильности и малых величинах электрических напряжений. При этом основная особенность электростатического наката - большой ход - позволила эффективно использовать этот процесс для создания не только емкостных устройств микромеханики, но и относительно крупногабаритных емкостных устройств на основе применения тонких полимерных пленок методами обычной сборки. Первые такие относитель-

но крупногабаритные емкостные устройства: индикаторы [36], оптические модуляторы света и затворы [36,52], газовые клапаны [53] - были разработаны в лаборатории пленочной электромеханики ИМ СО АН СССР и в отделе пленочной электромеханики СКТБ СЭиАП СО СССР. Это новое направление в пленочной электромеханике - создание относительно крупногабаритных емкостных электромеханических устройств [50,54-56] - весьма перспективно. Применяемые в этих устройствах двигатели с обратимым электростатическим накатом выполнены из пленок в виде лент или мембран, имеющих значительно большие размеры, чем пленки таких же или подобных двигателей емкостных устройств микромеханики. Эти двигатели со значительно более широкими гибкими пленками представляют собою как бы параллельно соединенные микроскопические двигатели. Благодаря высокой гибкости пленок, используемых при электростатическом накате, удельные энергетические характеристики крупных двигателей оказались такими же, как и у микроскопических двигателей. Таким образом, был сделан первый шаг в сторону создания электромеханической среды - параллельное соединение микродвигателей при сохранении высокой энергетической эффективности.

В табл. 2 приведены величины напряженностей электрических полей и плотностей энергии электрического поля для емкостных машин Трампа, Феличи, Жоливе [8], а также величины электрического поля и плотности его энергии для емкостной машины, рассчитанной П.Л.Капицей [57]. Для каждой емкостной машины даны характеристики газовой среды в рабочих зазорах и толщины этих зазоров, а также величины рабочего напряжения. Там же приведены величины электрического поля и плотности его энергии в пленке из полиэтилентерефталата (ПЭТВ) толщиной 4 мкм при использовании ее для электростатического наката в условиях отсутствия частичных разрядов [49]. В таблице также указаны значения плотности энергии магнитного поля в зазоре индуктивной машины при магнитной индукции, равной 1 Т, и отношения плотностей энер-

гии электрического поля указанных емкостных машин к плотности энергии магнитного поля индуктивных машин.

Т а б л и ц а 2

Параметры	Индук- тивная машина	Машина Трампа	Машина Феличи	Машина Жоливе	Машина Капицы	Электро- статиче- ский на- кат, ПЭТФ
Газовая среда в рабочем зазоре	-	вакуум	водород $3,7 \cdot 10^6$ Па	угле - кислый газ $2,7 \cdot 10^6$ Па	воздух 10^5 Па	воздух 10^5 Па
Электриче- ское поле, В/м	-	10^7	$6,2 \cdot 10^7$	$6,6 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^7$
Плотность энергии поля, Дж/м ³	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^2$	$1,7 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$	45	$3,3 \cdot 10^4$
Толщина ра- бочего за- зора, мм	-	9	3	2	-	$4 \cdot 10^{-3}$
Напряжение, В	-	90.000	200.000	150.000	-	200
Отношение плотностей энергии	-	800	24	19	9000	12

Из данных табл.2 видно, что достигнутые рабочие плотности энергии электрического поля емкостных машин сильно зависят от характеристик изоляционных материалов и толщин рабочих зазоров. Плотность энергии электрического поля в рабочих зазорах емко-
стных машин, заполненных воздухом при его нормальном давлении, в 10^4 раз меньше, при вакууме - в 10^3 раз меньше; заполненных

сжатыми газами - приблизительно в 10 раз меньше плотности энергии магнитного поля в зазорах индуктивных машин. При обратимом электростатическом накате тонких пленок из полиэтилентерефта - лата плотность энергии электрического поля приблизительно равна плотности энергии уникальных емкостных машин с изоляцией в виде сжатых газов, т.е. в 10 раз меньше, чем плотность энергии в зазорах индуктивных машин (и устройств). Но уже при такой плотности энергии в рабочем зазоре можно получить у емкостных устройств и машин с электростатическим накатом более высокую результирующую энергоемкость, чем у индуктивных, благодаря отсутствию аналога магнитопровода.

В классических емкостных машинах используется возможность увеличения энергоемкости и при относительно малой плотности энергии электрического поля за счет увеличения рабочей поверхности этих машин в результате применения многодисковых ротора и статора с рабочим зазором, расположенным радиально, а не аксиально, как у индуктивных машин [8]. (Но эта возможность ограничена, поскольку необходимо выполнить условие устойчивости дисков к изгибу при действии значительных поперечных сил, т.е. необходимо обеспечить достаточно высокую жесткость дисков, что связано с использованием дополнительного количества материала.)

В настоящее время сформулированы конструктивные решения создания энергоемких, относительно мощных и компактных по всем трем измерениям пленочных емкостных машин универсального назначения. В первом из соответствующих авторских свидетельств [58], полученном в лаборатории пленочной электромеханики ИМ СО АН СССР, основной элемент электростатического двигателя с возвратно-поступательным движением представляет собой конденсатор переменной емкости, выполненный в виде многослойного емкостного пакета из металлических и диэлектрических пленок с прослойками газа между ними. В конструкции этого двигателя между со-

седними обкладками емкостного пакета расположены плоские пружины, роль которых выполняют изгибаемые участки обкладок или заполненные газом герметизированные прослойки между соседними обкладками. В двигателе использованы размерный физический эффект значительного увеличения рабочего электрического поля при уменьшении толщины изоляции [51] и принцип увеличения рабочей поверхности емкостных машин. При этом, благодаря использованию фронтального сближения обкладок пакета (вместо продольного перемещения дисков ротора и статора друг относительно друга в классических емкостных машинах), появилась возможность значительно уменьшить толщины обкладок, так как исчезла необходимость выполнения условия устойчивости к изгибу. Тем самым были найдены подходы использования одновременно и в полной мере двух указанных выше основных факторов значительного увеличения энергоемкости емкостных машин.

Таким образом, в пленочной электромеханике появилось новое направление исследований - создание относительно мощных универсальных пленочных емкостных двигателей и генераторов, основным элементом которых является многослойный емкостный пакет с фронтальным сближением обкладок и с плоскими пружинами различного вида [58,59], в том числе и выполненными из диэлектрических и электропроводящих эластичных материалов [60].

В описанных выше многослойных пленочных емкостных пакетах в полной мере использован рассмотренный во введении принцип построения электромеханических сред, состоящий не только в параллельном, но и в последовательном механическом соединении пленочных микроскопических емкостных двигателей. Идея электромеханической среды получила свое завершенное воплощение.

§3. Основные направления развития пленочной электромеханики

В связи с появлением в пленочной электромеханике электро-механических сред, возникла потребность рассматривать теорию пленочных емкостных устройств и машин не только индивидуально-го, но и коллективного действия (рис.2).

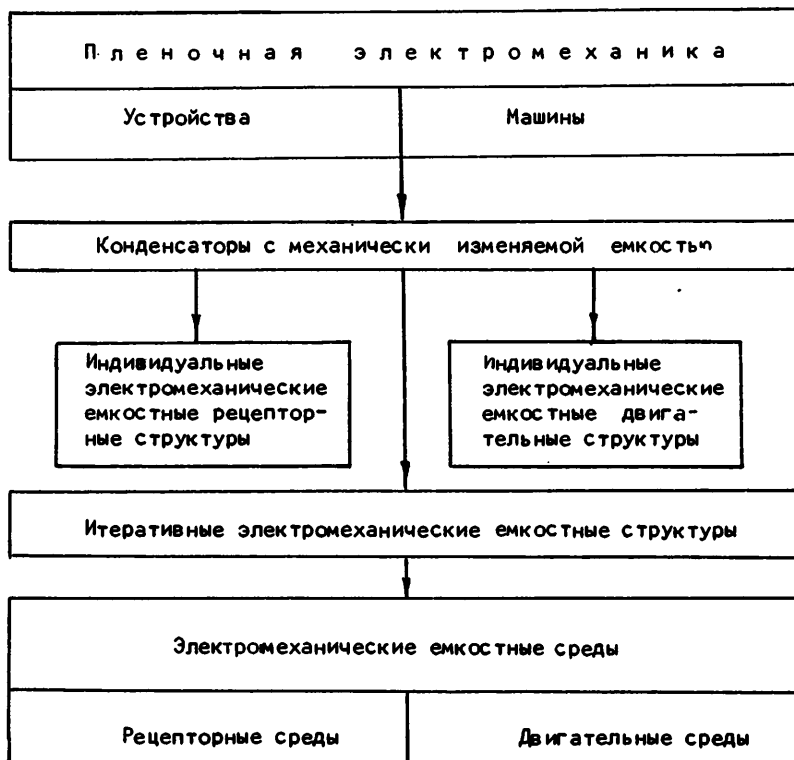


Рис. 2

Во всех устройствах и машинах пленочной электромеханики существенно используются конденсаторы с механически изменяемой емкостью, имеющие ту или иную конструкцию. Поскольку в настоя-

шем рассмотрении представляют интерес лишь общие характеристики конструкций, то для их классификации будет удобен термин "электромеханическая структура". Можно выделить два основных вида электромеханических емкостных структур: индивидуальные и итеративные.

Индивидуальные электромеханические емкостные структуры - это встроенные конденсаторы переменной емкости различных электростатических устройств: акселерометров, модуляторов света, оптических затворов, индикаторов, реле, электромеханических фильтров и т.д. Эти структуры не ориентированы на механическое соединение друг с другом. Все известные классические электростатические устройства и устройства микромеханики построены на основе встроенных индивидуальных структур. Работы лаборатории пленочной электромеханики ИМ СО АН СССР и отдела пленочной электромеханики СКТБ СЭиАП СО АН СССР позволили существенно расширить представления о возможностях использования этих структур.

Можно выделить индивидуальные рецепторные и двигательные структуры. Рецепторные структуры - это встроенные конденсаторы переменной емкости различных датчиков. Двигательные - это встроенные двигатели и генераторы.

Итеративные электромеханические емкостные структуры - это пленочные конденсаторы с механически изменяемой емкостью, специально приспособленные для параллельного и (или) последовательного механического соединения друг с другом и для механического соединения с внешней механической нагрузкой или с внешним приводом.

Электромеханическая емкостная среда - это универсальная емкостная машина или просто конденсатор переменной емкости, созданные в результате параллельного и (или) последовательного механического соединения итеративных электромеханических емкостных структур - элементов электромеханической среды.

В свою очередь, электромеханические среды могут быть использованы как двигатели высокой энергоемкости, например, в качестве компонент привода роботов, так и встроенных двигателей, генераторов, конденсаторов переменной емкости различных устройств, например, чувствительных датчиков. В последнем случае применение электромеханической среды вместо электромеханической индивидуальной структуры может дать значительно больший эффект. Поэтому можно говорить, как и в теории функций животных, о рецепторных и двигательных электромеханических средах.

§4. Физические основы теории электромеханических сред

Если в настоящее время уже созданы основы теории отдельных емкостных устройств и машин пленочной электромеханики как совместная теория тонких пластин и оболочек, эластиков, электрического поля и совокупности специально разработанных математических методов [23,30,40,49-56,60] и стоит вопрос разве что о расширении этой теории, то создание основ теории пленочной электромеханики как теории большой совокупности взаимодействующих элементарных пленочных емкостных машин, т.е. основ теории электромеханических сред, находится еще в стадии становления.

Параметры итеративных структур должны удовлетворять ряду условий, ибо в противном случае механическое соединение энергетически эффективных итеративных структур не приведет к получению электромеханической среды с высокой энергетической эффективностью. Выполнение этих условий связано с решением следующих проблем: миниатюризации, устойчивости и выбора частот параметрических колебаний.

4.1. Плотная упаковка. Это геометрические условия плотной упаковки, налагаемые на соотношение размеров и форму итеративных структур, и условие ограничения температуры нагрева среды. Конкретные выражения этих условий совпадают с выражениями таких же условий для элементов вычислительных сред [4]. Конст-

руктивные решения основываются на достаточно подробно рассмотренных в §2 идеях емкостного пакета с плоскими пружинами.

4.2. Механическая устойчивость электромеханической среды.

Итеративные структуры можно рассматривать как пружины, механические характеристики которых в виде зависимостей силы от перемещения зависят также от величины прикладываемого к структурам электрического напряжения. Эти характеристики могут быть как монотонными с положительной дифференциальной жесткостью, так и многозначными с участками отрицательной дифференциальной жесткости, т.е. имеющими области механического опрокидывания [61]. Следовательно, и электромеханические среды, собранные из итеративных структур, можно рассматривать как пружины, механические характеристики которых зависят от электрического напряжения. Но электромеханическая среда является более сложным механическим объектом, чем итеративная структура, так как механические характеристики структур могут отличаться друг от друга, в том числе у некоторых из них могут быть области механического опрокидывания.

Условия механической устойчивости электромеханической среды можно получить, рассматривая следующую механическую модель. Среда представляет собою механическое соединение бесконечно большого числа итеративных структур в трехмерную механическую решетку. В направлении действия внешних сил дифференциальная жесткость всех структур, кроме одной, равна $\beta_1 > 0$. Дифференциальная жесткость выделенной структуры равна β , причем величина этой жесткости может иметь отрицательные значения (опрокидывание). Дифференциальные жесткости, характеризующие смещение боковых структур, равны $\beta_2 > 0$ и $\beta_3 > 0$. Необходимо определить смещение всех характерных точек структур, например, точек в местах механического соединения структур.

Поставленная задача имеет прямое отношение к теории фундаментальных аналитических решений для многомерных решеток [62-

65]. Решение рассматриваемой задачи получено автором [64-65]. Основной результат этого решения состоит в установлении критических значений $\beta_{кр}$ величины β , при которых смещение характерных точек структур приобретает бесконечно большие значения, т.е. среда разрушается. Конкретнее

$$\beta_{кр} = \beta_1 \left(1 - \frac{1}{2B_{0,1}} \right), \quad (1)$$

где

$$B_{0,1} = \int_0^{\infty} e^{-z \left(1 + \frac{\beta_2}{\beta_1} + \frac{\beta_3}{\beta_1} \right) \xi} [I_0(2\xi) - I_1(2\xi)] I_0\left(2 \frac{\beta_2}{\beta_1} \xi\right) I_1\left(2 \frac{\beta_3}{\beta_1} \xi\right) d\xi;$$

I_0, I_1 - функции Бесселя мнимого аргумента порядка 0 и 1.

При $\beta_2 = \beta_3 = 0$ (одномерная среда) $B_{0,1} = 0,5$, т.е. критическое значение $\beta_{кр} = 0$. При $\beta_2 > 0, \beta_3 > 0$ (трехмерная среда) $0 < B_{0,1} < 0,5$, т.е. критическое значение $\beta_{кр}$ приобретает некоторое определенное отрицательное значение. При $\beta_1 \rightarrow +0$ $\beta_{кр} \rightarrow -0$. Как уже было указано, значения дифференциальной жесткости β_i зависят от электрического напряжения и могут приобретать значения, близкие к нулю. В этом случае возникновение опрокидывания даже в одной структуре приведет к разрушению (потере механической устойчивости) всей структуры.

Таким образом, основное условие механической устойчивости электромеханической среды можно сформулировать как отсутствие механического опрокидывания в любой из структур, составляющих

среду. Следует заметить, что в отдельной индивидуальной структуре механическое опрокидывание, как правило, допустимо.

4.3. Выбор частот параметрических колебаний в электро-механической среде. Эти условия рассмотрены для случая цепочки последовательно соединенных итеративных структур с учетом действия упругих и электростатических сил при малых смещениях структур друг относительно друга [23,56]. Рассматриваемые условия вытекают из анализа уравнения Матье [66]. Параметрические колебания в цепочке из M структур при фиксированном положении крайних структур и при малых диссипативных потерях энергии возникают при следующих частотах электрического напряжения, с которыми связаны электростатические силы,

$$f = \frac{2f_0}{j} \sin \frac{\pi i}{2M}, \quad (2)$$

где f_0 - собственная частота колебаний структуры; $i = 1, 2, 3, \dots, M$ - число полувольт колебаний между крайними и неподвижными структурами; $j = 1, 2, 3$ - номер субгармонического колебания.

Из (2) видно, что в рассматриваемой среде можно возбудить параметрические колебания при большом числе значений частот электрического напряжения. При $M \gg 1$ и при $i \ll M$, согласно (2),

$$f \cong \pi \frac{f_0 i}{Mj}, \quad (3)$$

т.е. в среде можно возбудить параметрические колебания при частоте $f \ll f_0$. Кроме того, при этих условиях при одной и той же частоте f можно возбудить параметрические колебания с разными пространственными (i) и временными (j) характеристиками, например, при $i = j$. Но, как известно [66], возможно - сти возбуждения субгармонических колебаний с номерами $j > 1$

ограничены в связи с узкими областями существования этих колебаний в координатах модуляции и диссипативных потерь энергии.

При возбуждении в рассматриваемой электромеханической среде нелинейных параметрических колебаний, т.е. при больших амплитудах колебаний, в ней возникает так называемое электрокинетическое давление, направленное против действия электростатических сил, расширяющее электромеханическую среду. Это давление, подобное давлению расширения твердых тел при их нагревании, может иметь величины, намного большие величин электростатического давления [23,56]. Таким образом, при возбуждении нелинейных колебаний в электромеханической среде открываются возможности создания мускулоподобных двигателей с новым для техники принципом действия.

§5. Общие вопросы теории электромеханических и вычислительных сред

Как известно [1-3,29], основными принципами построения вычислительных сред являются: однородность (создание среды из одинаковых и одинаково соединенных элементов, что позволяет решить проблемы технологичности, эксплуатационной надежности, простоты управления); параллельность (выполнение параллельных вычислительных алгоритмов, что позволяет значительно увеличить производительность) и программная настройка, что позволяет сочетать достоинства универсальных с эффективностью специализированных средств.

Совершенно очевидно распространение двух первых принципов построения вычислительных сред на электромеханические среды. Создание электромеханических сред из одинаковых итеративных структур является единственным способом решения проблемы технологичности и этих сред. Параллельное (и последовательное) соединение итеративных структур является единственным способом создания мощных энергоемких электромеханических сред, поскольку

ку в настоящее время не известны более энергоемкие электрические машины, чем миниатюрные пленочные емкостные машины.

Глубокое единство идей вычислительных и электромеханических сред еще в большей мере проявляется и в том, что к электромеханическим средам также применим и третий принцип (принцип программной настройки). Возможность применения принципа программной настройки к этим средам вытекает из того, что электромеханическая среда состоит из большого числа элементов, каждый из которых может иметь независимое электрическое уравнение. Эффективность применения этого принципа в электромеханических средах видна из того, что, например, в одном и том же двигателе на основе электромеханической среды можно осуществить самые разнообразные, сложные и точные движения. В этом отношении электромеханическая среда является качественно более совершенным элементом разнообразных приводов и чувствительных приборов, чем современные электрические и тем более гидравлические и пневматические преобразователи.

Можно видеть не только единство идей вычислительных и электромеханических сред, но и единство целей создания этих сред как общего средства значительного повышения эффективности систем комплексной автоматизации и механизации работ. Значительное увеличение возможностей управления электромеханическими средами, в том числе при изменении алгоритмов управления, требует применения мощных логических управляющих устройств с перестраиваемой программой управления. Именно такими логическими вычислительными устройствами являются управляющие вычислительные среды.

В заключение автор выражает благодарность д.т.н. Ю.Г. Косареву, впервые обратившему внимание автора на глубокую взаимосвязь проблем вычислительных и электромеханических сред и принявшего самое активное участие в обсуждении содержания работы и д.т.н. А.К. Реброву за ценные замечания.

Л и т е р а т у р а

1. ЕВРЕИНОВ Э.В. О микроструктуре элементарных машин в числительной системы //Вычислительные системы. Вып. 4, - Новосибирск, 1962. - С. 3-16.
2. ЕВРЕИНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. О вычислительных системах высокой производительности //Изв. АН СССР, серия техн. кибернетика. - 1963. - № 4. -С. 3-25.
3. ЕВРЕИНОВ Э.В. Теоретические основы построения вычислительных сред //Вычислительные системы. - Новосибирск, 1965. - Вып. 16. -С. 3-72.
4. ДЯТЛОВ В.Л. Некоторые требования к элементам вычислительных сред //Вычислительные системы. Труды I Всесоюз. конф. по вычислительным системам. -Новосибирск, 1986. -Вып.5. -С.3-40.
5. Его же. Силы магнитостатического взаимодействия магнитных пленок //Вычислительные системы. -Новосибирск, 1971. -Вып. 43. - С. 59-62.
6. PETERSEN K.E. Dynamic Micromechanics on Silicon: Techniques and Divices //IEEE Transations on electron Devices. - 1978. - Vol. ED-25, N 10. - P. 1241-1251.
7. POINCARÉ H. Sur quelques théorèmes généraux relatifs a électrotechnique //L'éclairage électr.-1907. -N 9. -P. 293-305.
8. ПОЛотовский Л.С. Емкостные машины постоянного тока высокого напряжения. -М.-Л.: ГЭИ, 1960. - 154 с.
9. НЕЙМАН Л.Р., КАЛАНТАРОВ П.Л. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. -М.-Л.: Энергия, 1954. - 209 с.
10. НЕЙМАН Л.Р., ДЕМИРЧАН К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 1. - М.-Л.: Энергия, 1966. - 250 с.
11. РЕННЕ В.Т. Электрические конденсаторы: 3-е изд., переработ. -Л.: Энергия, 1966. - 591 с.
12. А.с. 244506 (СССР). Электротехническое реле /Пана -сюк А.М., Жолондиевский Р.И. - Оpubл. в Б.И. 1969, № 18.
13. ЛЕВШИНА Е.С., ПЯТНЫШЕВ Е.Н., ЧЕРНЕНЬКАЯ Л.В. Емкостные датчики для измерения давления и вибрации на основе технологий микроэлектроники //Датчики на основе технологии микроэлектроники. Матер. семинара общества "Знание" РСФСР, Московский дом научно-технич. пропаг. им. Ф.Э.Дзержинского. - М., 1983. -С. 93-97.
14. А.с. 42215 (СССР). Электростатическое реле /Гончарский Л.А. - Заявл. 17 окт. 1934.

15. А.с. 45686 (СССР). Электростатическое реле /Его же.- Заявл. 13 июля 1935.
16. А.с. 52316 (СССР). Электростатическое реле /Его же.-Заявл. 26 апр. 1936.
17. Патент 2927255 (США). Электростатическое реле/Diesel I. 1960.
18. Патент 2942007 (США). Электростатическое реле /Diesel I. 1960.
19. Патент 3553364 (США). Электростатический световой клапан /Lse R. 1971.
20. ВИТЕНБЕРГ М.И. Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи: 3-е изд. -М.: Энергия, 1966. - 705 с.
21. СОЦКОВ Б.С. Основы расчета и проектирования автоматических и телемеханических устройств. -М.: Госэнергоиздат, 1953. - 400 с.
22. КИТТЕЛЬ Ч. Введение в физику твердого тела: 2-е изд., перераб. -М.: ГИФ-МЛ., 1962. - 696 с.
23. ДЯТЛОВ В.Л. Пленочная электромеханика - основа создания универсальных пленочных двигателей с высокой энергоемкостью //Моделирование в пленочной электромеханике. -Новосибирск, 1981. -Вып. 84: Вычислительные системы. -С. 3-32.
24. ГАРДНЕР М.Ф., БЭРНС Дж.Л. Переходные процессы в линейных системах с сосредоточенными постоянными. -М.: ГИТТЛ, 1949. - 306 с.
25. ИЛЬИНСКИЙ Н.Ф. Основы теории, исследование и разработка электроприводов по системе источник тока - двигатель: Автореф. дис. докт. техн. наук: 05.09.03 - М., 1978.
26. ЕРМУРАТСКИЙ В.В., ЕРМУРАТСКИЙ П.В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. -М.: Энергия, 1979. - 219 с.
27. НАТАНСОН Х., ГОЛЬДБЕРГ Я. Тонкие пленки с топологической структурой в полупроводниковых устройствах //Физика тонких пленок. -М., 1978. - Т.8. -С. 331-356.
28. НАТАНСОН Х., НЬЮЭЛЛ В., УИКСТРЕМ Р. Транзистор с резонирующим затвором //Электроника, 1965. -Т. 38, № 19. -С. 3-7.
29. ЕВРЕИНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные универсальные системы высокой производительности. -Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1966. - 308 с.
30. ДЯТЛОВ В.Л., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые результаты исследований пленочных электростатических реле //Вычислительные

системы. Труды I Всесоюз. конф. по вычислительным системам. - Новосибирск, 1968. - Вып. 5. - С. 159-175.

31. ПРЕСТОН. Мембранный световой модулятор и его применение в оптических ЦВМ //Зарубежная радиоэлектроника. - 1970. - № 10. - С. 112-116.

32. ГАЛЛАХЕР Р.Т. Знаковый индикатор с точечно-матричным форматом, выполненный на базе микрорешеток //Электроника.-1983. - № 14. - С. 17-18.

33. ДЯТЛОВ В.Л., ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С., РОГАЛЁВ А.И. Основные параметры пленочных электростатических реле //Вычислительные системы. -Вып. 46. -Новосибирск, 1971. -С. 3-7.

34. ЛИГАЕВА Э.А., НУДЕЛЬМАН А.М., РОГАЛЁВ А.И. Сопротивление контактной цепи пленочных электростатических реле на постоянном токе //Там же. -С. 28-32.

35. ДЯТЛОВ В.Л., КИРИЛОК А.Г., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С., ФАДЕЕВ С.И. Исследование пленочных консольных структур //Техника индукции. - Киев, 1976. - С. 39-46.

36. КОНЯШКИН В.В., ЛУЦЕТ М.К., ПОТАПОВ Б.С. Пленочные емкостные структуры с электростатическим приводом для устройств отображения информации и модуляции света //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1981. -Вып. 84: Вычислительные системы. -С. 54-63.

37. ВАН РАЛЬТ. Новая светоклапанная система для проекции на большой экран //Зарубежная электроника. - 1971. -№12.-С.90-97.

38. OROSSO R., YELLIN M. The membrane mirror an adaptive optical element //J. Opt. Am. - 1977.-Vol. 67, № 3. March. - P. 399-406.

39. ПЕТЕРСЕН К.Э. Кремний как механический материал //ТИИЭР. - 1982. - Т. 70, № 5. -С. 5-49.

40. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Модели пленочных электростатических элементов и стабильность их характеристик //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1975. -Вып. 66: Вычислительные системы. -С. 3-20.

41. КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Переходное сопротивление пленочных контактов при малых контактных усилиях //Вычислительные системы. Вып. 46. - Новосибирск, 1971. -С. 33-36.

42. КОПЫТКОВ Н.Ф., ПОТАПОВ Б.С. Осциллографическое исследование процесса размыкания пленочных контактов. //Там же. -С. 37-41.

43. ДЕРЯГИН Б.В., КРОТОВ Н.А., СНИЛГА В.П. Адгезия твердых тел. -М.: Наука, 1973. - 278 с.

44. СКАНАВИ Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). -М.: ГИФЛ-МЛ, 1958. - 908 с.

45. КУЧИНСКИЙ Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. -Л.: Энергия, 1973. - 174 с.

46. КОЙКОВ С.Н., ЦИКИН А.И. Электрическое старение твердых диэлектриков. -Л.: Энергия, 1968. - 298 с.

47. КОНЯШКИН В.В. Релаксация сил в пленочных емкостных структурах //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1982. -Вып. 95: Вычислительные системы. - С.54-61.

48. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Структуры М-Г-Д-М с подвижными пленками //Там же. -С. 3-23.

49. Их же. Пленочные емкостные структуры с накатом обкладок //Моделирование в пленочной электромеханике. -Новосибирск, 1981. -Вып. 84: Вычислительные системы. -С. 33-53.

50. ДЯТЛОВ В.Л., ФАДЕЕВ С.И. Перспективы развития пленочной электромеханики //Проблемы обработки информации. - Новосибирск, 1983. -Вып. 100: Вычислительные системы. -С. 129-139.

51. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Использование размерных физических эффектов в пленочной электромеханике //Моделирование в пленочной электромеханике. -Новосибирск, 1985. - Вып. 110: Вычислительные системы. -С. 18-34.

52. КОНЯШКИН В.В., ЛУЦЕТ М.К., ПОТАПОВ Б.С. Световой затвор с большой апертурой и модулятор излучения с электростатическим приводом //Там же. -С. 35-46.

53. ЛУКЬЯНОВА Р.Г., ФАДЕЕВ С.И. О численном решении краевой задачи, связанной с электростатическим притяжением мембраны //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1975. -Вып. 66: Вычислительные системы. -С. 61-90.

54. ДЯТЛОВ В.Л., РОГАЛЁВ А.И. Электромеханические пленочные элементы //Вычислительные системы. Вып. 49. - Новосибирск, 1972. - С. 54-63.

55. ДЯТЛОВ В.Л., ФАДЕЕВ С.И. Пленочная электромеханика //Вычислительные системы, вып. 58. Вычислительные системы и проблемы обработки информации. - Новосибирск, 1974. -С. 100-110.

56. ДЯТЛОВ В.Л. Перспективы создания пленочных электростатических двигателей ВПД высокой энергоемкости //Промышленные роботы и их применение в народном хозяйстве (Сбор. докл. Всерос. научно-теорет. семинара, Новосибирск). -1981. -С. 36-41.

57. КАПИЦА П.Л. Эксперимент. Теория. Практика. Статьи выступления: 2-е изд., испр. и доп. -М.: Наука, 1977. - 351 с.

58. А.с. 744877 (СССР). Электростатический двигатель с возвратно-поступательным движением //Дятлов В.Л., Колмого - ров А.Б., Коняшкин В.В. и др. - Оpubл. в Б.И. 1980, № 24.

59. ДЯТЛОВ В.Л., ПЬЯНКОВ Ю.А., ХОРОМЕНКО А.А. Пленочные многослойные емкостные структуры с изменяемой емкостью //Моде - лирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1982. - Вып. 95: Вычислительные системы. -С. 62-65.

60. ДЯТЛОВ В.Л. Теория пьезоэлектрического эффекта в ем - костной структуре из эластика //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1985. - Вып. 110: Вычислитель - ные системы. -С. 3-17.

61. АНДРЕЕВА Л.Е. Упругие элементы приборов. -М.: ГН-Т Изд. машиностроитлит., 1962. - 456 с.

62. ПИННИ Э. Обыкновенные дифференциально-разностные урав - нения. -М.: ИИЛ, 1961. - 248 с.

63. МАРАДУДИН А., МОНТРОЛЛ Э., ВЕЙСС Дж. Динамическая тео - рия кристаллической решетки в гармоническом приближении. -М.: Мир, 1965. - 383 с.

64. ДЯТЛОВ В.Л. Распространение возбуждения от точечного источника в трехмерных периодических решетках //Вычислительные системы, вып. 43. - Новосибирск, 1971. -С. 142-145.

65. ДЯТЛОВ В.Л. Решение линейных дифференциально-разност - ных уравнений для n -мерного пространства целочисленных коор - династ с помощью функции Бейтмена //Там же. - С. 146-154.

66. ХАЯСИ ТАХИРО. Вынужденные колебания в нелинейных сис - темах. -М.: ИИЛ, 1957. - 193 с.

Поступила в ред. изд. отд.

19 января 1987 года