

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

УДК 621.3.083.3

А. Л. ГРОХОЛЬСКИЙ, В. И. НИКУЛИН

(Новосибирск)

### О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ

Рассмотрены перспективы применения емкостных датчиков, выполненных, в частности, по трехэлектродной схеме, для исследования различных быстропеременных процессов. Даны некоторые рекомендации по развитию наиболее перспективных типов трехэлектродных датчиков. Кратко охарактеризованы существующие измерительные цепи и выделены самоуравновешиваемые цепи, как наиболее быстродействующие.

В связи с автоматизацией производственных процессов все большее распространение получают первичные преобразователи (датчики), которые позволяют проводить измерения всевозможных неэлектрических величин электрическими методами. Среди этих датчиков значительное место занимают индуктивные датчики различных конструкций. Широкому распространению индуктивных датчиков способствуют надежность, простота их конструкций и возможность использования для них токов промышленной частоты. Значительный вклад в теорию и конструктивное исполнение индуктивных датчиков внесли Е. И. Дмитриев, Ф. Е. Темников, Р. Р. Харченко, Б. С. Сотсков и другие. Однако в последнее время в связи с развитием измерений быстроменяющихся величин при нормальных и специальных условиях работы возникает ряд трудностей в создании точных и надежно работающих индуктивных датчиков.

В то же время емкостные датчики не получили достаточно большого распространения. Возможно, на это повлияло мнение о малой надежности и большой погрешности преобразования, свойственных емкостным датчикам (см., например, [1]). Такое мнение возникло вследствие того, что емкостные датчики, имеющие относительно малые значения емкости, обладают на низких частотах незначительной чувствительностью и большими погрешностями из-за несовершенства измерительных цепей, применяющихся с этими датчиками. Как правило, емкостный датчик включается в резонансный контур в виде двухэлектродного конденсатора, причем емкости соединительных проводов, во много раз превышающие емкость датчика, подключаются параллельно измеряемой емкости и приводят к появлению больших погрешностей из-за их неустойчивости. Некоторое снижение этой погрешности достигается за счет увеличения значения емкости датчика, но надежность всего измерительного устройства при этом уменьшается. Емкостные датчики совместно с

резонансным контуром и другими измерительными цепями обладают низкой стабильностью показаний и из-за всех приведенных выше причин довольно редко применялись в недалеком прошлом.

В настоящее время имеется достаточно большое количество различных типов емкостных датчиков, разработаны основы инженерных методов их анализа и расчета (см., например, [2—4]), однако предубеждение против этих датчиков у некоторых инженерно-технических работников осталось. Поэтому предлагаемая статья посвящается перспективам применения емкостных датчиков, особенно трехэлектродных, и измерительных цепей, позволяющих с очень высокой точностью измерять емкость этих датчиков.

### ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЕМКСТНЫЕ ДАТЧИКИ

Как указывалось, обычно емкостные датчики используются в виде двухэлектродного конденсатора; при этом основная емкость датчика зависит не только от конструктивных параметров конденсатора, но и от близости расположения отдельных предметов, их относительного перемещения и емкости соединительных кабелей или проводов. Поэтому двухэлектродные емкостные датчики используются преимущественно для кратковременных измерений, так как очень трудно получить высокую чувствительность и долговременную стабильность для двухэлектродных систем ввиду относительно высокой и нестабильной емкости соединительных кабелей или проводов. От этого недостатка в значительной мере свободны трехэлектродные емкостные датчики. В общем случае трехэлектродный емкостный датчик может быть выполнен в виде конструкции (рис. 1, а), которую можно характеризовать также

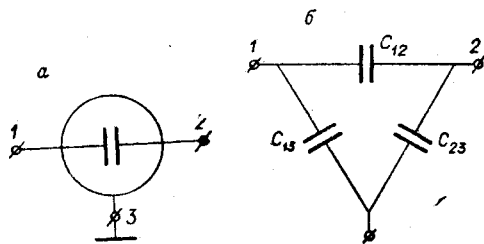


Рис. 1.

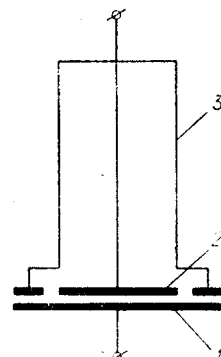


Рис. 2.

упрощенной эквивалентной схемой (см. рис. 1, б). Прямая емкость датчика  $C_{12}$  образуется между электродами, подключенными к выводам 1 и 2, благодаря которым конденсатор подключается к измерительной цепи, с помощью коаксиальных кабелей или экранированных проводов. В трехэлектродном датчике значение прямой емкости остается вполне определенной величиной и не зависит от частичных емкостей  $C_{13}$  и  $C_{23}$ , которые часто превосходят значение  $C_{12}$  во много раз. Это объясняется тем, что токи, протекающие через емкости  $C_{13}$  и  $C_{23}$ , не влияют на состояние настройки специальной измерительной цепи, а вызывают лишь дополнительные нагрузки для генератора, питающего измерительную цепь, и для индикатора. Основные требования, которым должны отвечать специальные измерительные цепи, для непосредственного измерения прямой емкости (без учета значения частичных емкостей) будут рассмотрены ниже.

В настоящее время получили распространение трехэлектродные емкостные датчики с параллельными электродами, выполненные с защитным (охранным) кольцом (рис. 2). Кроме уже упомянутых положительных свойств трехэлектродных конденсаторов, данный тип конденсатора обладает еще одним также весьма полезным свойством, повышающим точность результатов исследования. Дело в том, что защитный электрод 3, который обычно подключается к особой точке измерительной цепи, во время настройки измерительной цепи находится под тем же потенциалом, что и защищаемый электрод 2. Это способствует установлению равномерного электрического поля между электродами 1 и 2, благодаря чему исключается необходимость введения поправок на краевую емкость. Шунтирующая емкость образованная паразитными периметрическими емкостными мер типа КМЕ-4 с номинальными значениями прямой емкости от 0,0001 до 1,0 пф.

Из трехэлектродных конденсаторов довольно легко создать образцовые магазины емкости со строго известными значениями [6].

Прямую емкость трехэлектродного конденсатора можно получить какой угодно малой (вплоть до нулевого значения) путем введения между электродами конденсатора заземленного экрана. Если в середине экрана сделать отверстие, то прямая емкость будет определяться размером отверстия. Изготовив серию экранов с различными отверстиями, можно получить переключаемый конденсатор с очень малым значением емкости [7]. При плавном передвижении экранов с отверстиями можно получить и переменный трехэлектродный конденсатор.

При создании высокоточных переменных емкостных мер встречаются значительные трудности, приводящие к тому, что образцовая мера имеет погрешность в лучшем случае 0,01%, что явно недостаточно для прецизионных приборов. Точность изготовления переменных емкостных мер значительно увеличивается при использовании конденсаторов с перекрестной емкостью, у которых емкость на единицу длины постоянна и не зависит от размеров поперечных сечений электродов. Возможность создания такой конструкции цилиндрического конденсатора с расчетной емкостью была доказана Д. Г. Лэмпардом [8]. Разработанные на этой основе конденсаторы [9, 10] из-за значительных размеров, веса и необходимости помещения электродов в вакуум применялись только в стационарных условиях. Для переносной измерительной аппаратуры был разработан эталонный негерметизированный конденсатор с расчетной емкостью [11]. Точность изготовления такого конденсатора составляет  $5 \cdot 10^{-5} \%$ .

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЕМКСТНЫХ ДАТЧИКОВ

В настоящее время разработано значительное количество типов и модификаций емкостных датчиков, подавляющее большинство которых выполнено по двухэлектродной схеме, что затрудняет их использование и оптимальный выбор для решения той или иной задачи. Поэтому целесообразно провести анализ существующих двухэлектродных датчиков и свести их в отдельные группы, объединенные общими свойствами, а

затем на основе анализа этих групп построить классификацию и для трехэлектродных датчиков.

Обычно в качестве основных классификационных признаков выбирают принцип действия, область применения, вид входной или выходной величины, характерные конструктивные решения и др.

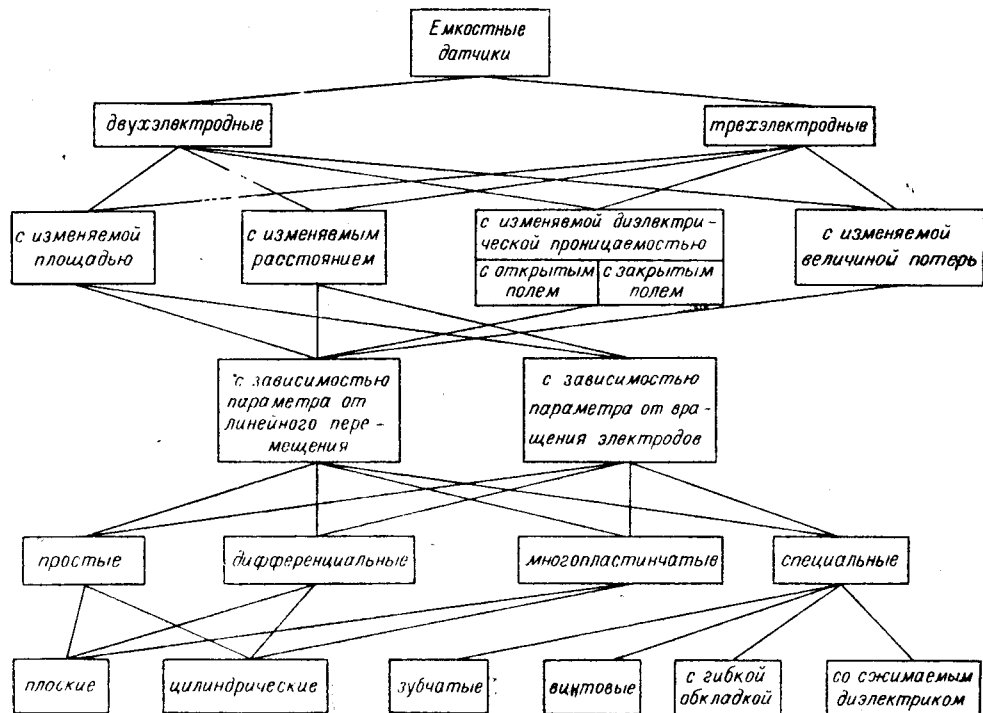
По принципу действия емкостные датчики относятся к параметрической группе датчиков, которая характеризуется тем, что измеряемая или контролируемая физическая величина преобразуется в параметр электрической цепи — емкость.

Измеряемая или контролируемая неэлектрическая величина изменяет емкость датчика путем воздействия на какой-либо параметр, а именно: эффективную площадь электродов, расстояние между электродами и диэлектрическую постоянную веществ, находящихся между электродами. В ряде случаев можно использовать также зависимость потерь в диэлектрике конденсатора от контролируемой неэлектрической величины. Таким образом, одним из классификационных признаков является способ изменения емкости датчика в зависимости от воздействия неэлектрической величины на тот или иной параметр датчика.

Другими классификационными признаками емкостных датчиков являются способ перемещения электродов — линейное или угловое движение, количество электродов и их конфигурация.

На основании перечисленных выше признаков построена классификационная таблица, которая охватывает наиболее распространенные двухэлектродные датчики. Сравнительная оценка основных характеристик датчиков, принадлежащих к различным группам, так же как и расчетные формулы для них, дана в [1—4].

Приведенная классификация пригодна и для трехэлектродных датчиков. Но большинство связей в этой таблице для случая трехэлектродных датчиков остается свободным, так как в настоящее время разра-



ботано незначительное количество их типов. В основном используются простые или дифференциальные датчики с плоскими электродами, поэтому встает задача создания новых весьма перспективных типов трехэлектродных датчиков. Необходимо обратить внимание конструкторов и исследователей на датчики с закрытым электрическим полем (из-за очень малых начальных значений прямой емкости) с различными формами пластин, а также на датчики со специальной формой пластин, в частности, на датчики со сжимаемым диэлектриком, которые найдут широкое применение в биологических и медицинских исследованиях.

Предлагаемая классификационная таблица может принести пользу при создании новых трехэлектродных датчиков.

### **ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ ДАТЧИКОВ**

Емкость датчиков можно измерять с помощью существующих многообразных измерительных цепей, преобразующих емкость датчика или ее изменение в напряжение или ток. Можно выделить следующие основные методы измерения: 1) измерение времени заряда или разряда конденсатора; 2) электрометрические методы, основанные на делении заряда; 3) метод амперметра и вольтметра; 4) сравнение напряжений и токов; 5) резонансные методы, включающие в себя контурные и генераторные способы резонансных измерений; 6) мостовые методы.

Первые два метода не обеспечивают мгновенного и непрерывного преобразования и поэтому не нашли большого распространения.

Метод амперметра и вольтметра для измерения емкости конденсаторов является одним из наиболее ранних, но в настоящее время используется редко.

Сравнение токов или напряжений в измерительной цепи нашло широкое применение в основном для процентных раскалибраторов конденсаторов на допусковые группы по емкости.

Резонансные методы [12] обладают максимальной чувствительностью измерения изменения емкости датчика, но из-за сложности аппаратуры и трудности проведения дистанционных измерений находят довольно ограниченное применение.

Различные модификации мостов переменного тока (четырёхплечие мосты, трансформаторные мосты с тесной индуктивной связью между плечевыми обмотками, многоплечие мосты, полууравновешенные, неуравновешенные и квазиуравновешенные мосты, различные автоматические мосты, мостовые Т-схемы и самоуравновешиваемые мосты) позволяют наиболее точно измерять емкость датчика или ее изменение даже при значительном удалении датчика от измерительной аппаратуры. Все перечисленные выше разновидности мостовых цепей дают возможность проводить измерения для двухэлектродных датчиков. С трехэлектродными датчиками необходимо применять специальные измерительные цепи. Обычные четырехплечие мосты переменного тока не годятся для измерения прямой емкости трехэлектродного конденсатора, так как не имеют дополнительных уравновешивающих реактивных элементов для исключения влияния частичных емкостей. Только четырехплечие мосты со специальной экранировкой и вспомогательной ветвью [13] позволяют непосредственно измерять прямую емкость. Они находят довольно ограниченное применение, так как процесс измерения отличается исключительно большой трудоемкостью. Этих недостатков лишены трансформаторные мосты с тесной индуктивной связью между плечевыми обмотками.

В этих мостах необходимость в дополнительных реактивных элементах при измерении прямых емкостей отпадает. Известно [14], что мосты с индуктивно связанными плечевыми элементами обладают очень малой чувствительностью к паразитным проводимостям, включенным параллельно индуктивным плечам. С помощью моста с тесной индуктивной связью можно измерять емкость трехэлектродного конденсатора в диапазоне от 0,01 до 10000 пф с погрешностью до 0,001% [15] и даже меньшей. На основе моста с тесной индуктивной связью построены и автоматические мосты класса 0,1 [16], однако быстродействие таких мостов невелико (в лучшем случае при слежении время измерения составляет несколько десятых долей секунды).

Весьма перспективным является использование емкостных датчиков для исследований различных быстропеременных физических и химических процессов. Для проведения таких исследований необходима быстродействующая измерительная аппаратура, задача создания которой в настоящее время является весьма актуальной.

Как показали исследования, наиболее приемлемым на сегодня способом быстродействующего дистанционного измерения параметров емкостного датчика является способ, основанный на использовании самоуравновешиваемых (автокомпенсационных) мостов с уравновешивающим операционным усилителем [17, 18]. Совокупность таких качеств, как достаточно высокая точность измерения, быстродействие (время одного измерения 0,001 сек на радиочастотах) и нечувствительность к шунтирующим емкостям и утечкам, делает весьма перспективным применение самоуравновешиваемых цепей для измерения параметров датчиков.

В заключение хотелось бы отметить, что:

- 1) емкостные датчики из-за высокой чувствительности, простоты устройства, малых габаритов, веса и малой инерционности, что особенно важно для исследования быстропеременных процессов, должны найти еще более широкое применение, чем в настоящее время;
- 2) для увеличения точности измерений и устранения влияния шунтирующих емкостей и утечек необходимо широкое внедрение трехэлектродных датчиков, емкость которых может составлять несколько десятых и даже сотых пикофарады;
- 3) существующие измерительные цепи, особенно самоуравновешиваемые, позволяют с высокой точностью и быстродействием проводить измерения при помощи емкостных датчиков различных неэлектрических величин, характеризующих физические и химические процессы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. И. Бовсуновский, Л. В. Свечников. Механизация и автоматизация контрольных операций в машиностроении и приборостроении. М.—Киев, Машгиз, 1961.
2. Д. И. Агейкин, Е. Н. Костина, Н. Н. Кузнецова. Датчики контроля и регулирования. М., «Машиностроение», 1965.
3. В. А. Ацюковский. Емкостные преобразователи перемещений. М.—Л., «Энергия», 1966.
4. Электрические методы автоматического контроля. Под ред. К. Б. Карандеева. М.—Л., «Энергия», 1965.
5. А. Л. Грохольский. Трехконтактные конденсаторы малой емкости.— Измерительная техника, 1958, № 6.
6. А. Л. Грохольский. Магазин малых емкостей. Авторское свидетельство № 169696.— Бюллетень изобретений, 1965, № 7.
7. C. Moon, C. M. Sparks. Standards for Low Values of Direct Capacitance.— NBS J. Research, 1948, v. 41, p. 497.

8. D. G. Lampard. A New Theorem in Electrostatics with Applications to Calculable Standards of Capacitance.— Monograph № 21614 IEE, January, 1957.
9. A. M. Thompson. The Precise Measurement of Small Capacitances.— IRE Trans. on Instrumentation, December 1958.
10. А. Л. Грохольский, В. А. Одинцов. Эталонный конденсатор. Авторское свидетельство № 158346.— Бюллетень изобретений, 1963, № 21.
11. А. Л. Грохольский, Э. Л. Кашеев, Г. С. Федосеев. Эталонный конденсатор с расчетной емкостью. Авторское свидетельство № 171048.— Бюллетень изобретений, 1965, № 10.
12. К. С. Полулях. Электронные резонансные измерительные приборы. Харьков, Изд-во ХГУ, 1961.
13. К. М. Соболевский, Ю. А. Шакола. Защита мостов переменного тока. Киев, Изд-во АН УССР, 1957.
14. А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский. Мосты переменного тока с индуктивно связанными плечевыми элементами.— Автометрия, 1965, № 1.
15. А. Л. Грохольский, Э. Л. Кашеев. О построении прецизионного трансформаторного моста.— Автометрия, 1966, № 1.
16. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
17. Ф. Б. Гриневич, Е. Е. Добров, В. И. Никулин. Об одной автокомпенсационной схеме измерения емкости.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды VI конференции), т. II. Новосибирск, «Наука», 1966.
18. В. И. Никулин, А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский. Быстродействующие измерители составляющих комплексной проводимости.— Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1965.

*Поступила в редакцию  
18 апреля 1966 г.,  
окончательный вариант —  
28 июня 1966 г.*

### A. L. Grokhol'skiy, V. I. Nikulin

#### ON HORIZONS FOR CAPACITIVE PICKUPS

Capacitive pickups application to investigate the fast processes is discussed. Some recommendations on design of promising types of three-electrode pickups are given. Present-day measuring circuits are described briefly. Self-balancing circuits are believed to be the most high-speed.