

УДК 681.518.5:654.9

А.Г. Якунин

Емкостный извещатель на основе переходных процессов в RC-цепях

Описывается принцип работы емкостного извещателя, который изначально разрабатывался для применения в устройствах охранной сигнализации, но может быть также использован в качестве датчика приближения на производствах в системах автоматики для информирования управляющего устройства о приближении к чувствительной поверхности датчика какого-либо объекта, а также для других применений, связанных с измерением электрической емкости. Принцип работы устройства основан на измерении разности токов заряда емкости эталонного конденсатора и емкости, образованной чувствительной поверхностью датчика и внешним объектом. Основным достоинством предлагаемого решения является существенное снижение влияния паразитных токов утечки, возникающих в емкости датчика под воздействием загрязнений и изменения влажности окружающей среды. Кроме того, изменением емкости эталонного конденсатора оптимальное значение рабочей емкости датчика можно варьировать в очень широких пределах – от единиц пикофарад до долей микрофарад. Поэтому при использовании данного датчика его чувствительная поверхность может представлять собой как проводящую поверхность (сетку, пластину и т.д.), площадь которой может варьироваться в пределах от 1 см² до нескольких десятков квадратных метров, так и провод длиной от единиц сантиметров до сотен метров. При этом не требуется применения специальных мер для обеспечения высокой степени изоляции чувствительной поверхности датчика от окружающей среды. Кроме того, датчик не требует применения специальных приспособлений и дополнительных средств для обеспечения высокой степени изоляции его чувствительной поверхности от окружающей среды.

Ключевые слова: датчик приближения, системы охраны предупреждающего типа, емкостный сенсор.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-1-33-38

Емкостные измерительные преобразователи неэлектрических величин в настоящее время широко используются наряду с другими датчиками в самых различных областях науки и техники, в том числе и при автоматизации производственных процессов [1–3]. С помощью емкостных датчиков можно контролировать линейные [4] и угловые [5, 6] перемещения, определять уровень жидкости [7], давление [8], тактильные усилия [9] и другие физические величины. Известно также применение емкостных устройств в качестве датчиков приближения для обеспечения безопасности выполнения работ на производствах [10] и в системах охраны [11, 12] наряду с акустическими, оптическими и радиоволновыми преобразователями [14].

Главными преимуществами емкостных преобразователей являются их простота, малые габариты и энергопотребление, низкая стоимость и технологичность изготовления. Но, несмотря на эти преимущества, емкостные преобразователи находят очень ограниченное применение, особенно в качестве датчиков приближения. Так, их почти не применяют в запыленных и химических производствах, поскольку они изменяют свои характеристики из-за воздействия агрессивных сред и наличия пыли. Непостоянство свойств контролируемой среды приводит к изменению в основном токов паразитных утечек емкости сенсора, что вызывает появление большого числа ложных срабатываний. Так как для подобных применений емкостных сенсоров в качестве диэлектрика измеряемой емкости выступает окружающая среда, а электродами являются окружающие предметы, объекты и поверхности, то решить проблему совершенствованием технологии изготовления самих датчиков, как это предлагается, напри-

мер, в [15], не представляется возможным. Поэтому для таких применений емкостных датчиков обеспечить им необходимые технико-экономические характеристики можно лишь за счет реализации в них иных принципов работы, а значит, иных схематических и технических решений и иных методов выделения из сигналов информационной составляющей. Рассмотрению одного из таких подходов к решению проблемы повышения стабильности работы емкостных преобразователей и посвящена данная работа.

Анализ существующих решений

В настоящее время существует три основных подхода для нахождения значения величины емкости емкостного преобразователя. Самый простейший заключается в измерении напряжения на выходе делителя напряжения, схема которого приведена на рис. 1, а, или близка к ней. В данной схеме генератор G вырабатывает синусоидальное напряжение. Недостатком такого решения является нелинейность зависимости напряжения на выходе от величины емкости. Кроме того, данный вариант наименее устойчив к влиянию шунтирующей емкость преобразователя сопротивления утечки. Поэтому в настоящее время основу большинства емкостных датчиков составляет схема, в которой неизвестная емкость является частото задающим элементом генератора (см. рис. 1, б) и входит в параллельный или последовательный колебательный контур либо в частотно-зависимую цепь положительной обратной связи мультивибратора.

Для повышения точности измерения и повышения чувствительности датчика на практике часто применяют не непосредственное измерение частоты, а различные разностные схемы, когда емкость определяют по частоте биений после суммирования час-

тот опорного и измерительного генератора либо по изменению скважности измерительного импульса относительно эталонного. Но во всех вариантах таких решений избавиться от влияния паразитных сопротивлений полностью не удастся. К тому же во всех случаях сохраняется нелинейная связь между измеряемой емкостью и информативным параметром. Исключить влияние паразитного сопротивления можно в измерителях полного импеданса, когда, например, как в представленной на рис. 1, а схеме, измеряется не только амплитуда, но и фаза выходного напряжения. Однако такие решения оказываются существенно более сложными и не получили применения в таких простых устройствах, как датчики приближения.

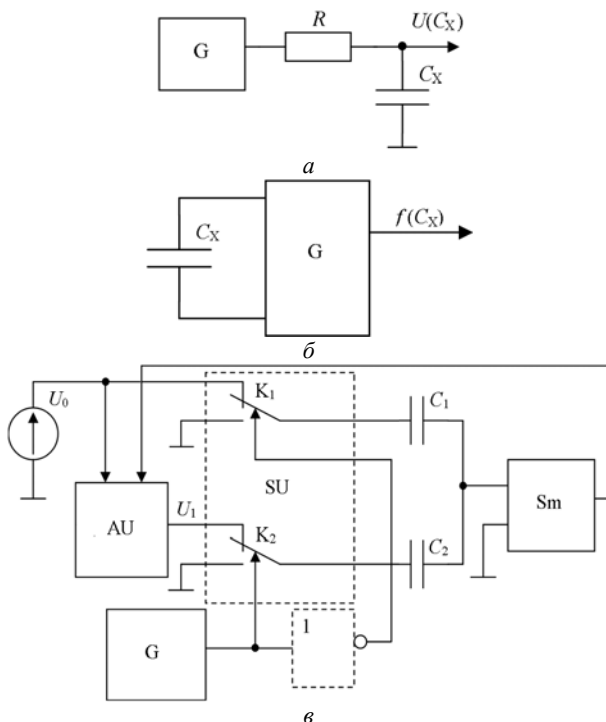


Рис. 1. Варианты схем формирования информационного сигнала в емкостных сенсорах

Поэтому для тех случаев, когда паразитное сопротивление нестабильно, варьируется в широких пределах и определения его значения не требуется, более перспективно применение решений, когда емкость определяется по параметрам переходных процессов, а именно по величине тока заряда конденсатора в начале переходного процесса после подачи на него напряжения. Один из вариантов такого решения показан на рис. 1, в, где Sm – входной преобразователь тока в напряжение, выполняющий также функции суммирования и преобразования, выход которого подключён ко входу управления блока автоматического регулирования AU [16, с. 41–48, 92–95]. В таком устройстве величину емкости определяют по величине напряжения U_1 , которое системой регулировки подбирается так, чтобы минимизировать суммарный ток, поступающий на вход предусилителя. Если напряжение U_1 имеет тот же знак, что и U_0 , управляющее напряжение на ключ K_1 должно пода-

ваться через инвертор, показанный на рисунке пунктирной линией.

Преимуществом данного решения являются линейная зависимость выходного сигнала от величины измеряемой емкости C_2 и его слабая зависимость от токов утечки, протекающих между ее обкладками. Это объясняется тем, что в момент переключения ток заряда емкости имеет максимальное значение и при отсутствии сопротивления соединительных проводников не зависит от величины сопротивления, подключенного параллельно измеряемой емкости, через которое протекают токи утечки.

Однако и в такой схеме полностью избавиться от влияния паразитного сопротивления утечки не удастся, так как его уменьшение затягивает длительность импульса заряда конденсатора и увеличивает его амплитуду. Поэтому с ростом токов утечки измеряемой емкости из-за увеличения, например, влажности среды и загрязнения поверхности, на которой размещаются обкладки измерительного конденсатора, компенсирующее напряжение U_1 будет уменьшаться, что эквивалентно уменьшению измеряемой емкости. Кроме того, в представленной на рис. 1, в схеме измерительный конденсатор не заземлен, что существенно ограничивает возможности применения данной схемы в системах автоматики, так как в них одной из обкладок измерительного конденсатора чаще всего является заземленный объект. Указанных недостатков лишена предложенная в [17] модификация представленной на рис. 1, в схемы, описанная в следующем подразделе и показанная на рис. 2.

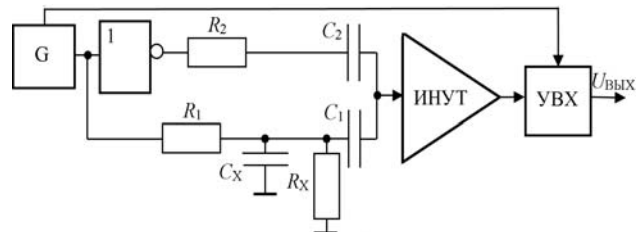


Рис. 2. Структурная схема предложенного решения:
G – генератор прямоугольных импульсов;
ИНУТ – конвертор тока в напряжение (источник напряжения, управляемый током);
УВХ – устройство выборки-хранения

Суть и отличия предлагаемого решения

В представленной на рис. 2 схеме на вход конвертора тока в напряжение через дифференцирующие RC-цепи подаются фронты двух вырабатываемых генератором G противофазных прямоугольных импульсов. В одну из цепей подключен емкостный датчик, имеющий емкость C_x и сопротивление утечек R_x . Для достижения максимальной чувствительности суммарная емкость конденсаторов в обеих цепях должна быть одинаковой. Поскольку соблюсти данное условие для различных вариантов исполнения сенсора проблематично, на практике обычно емкости конденсаторов выбираются примерно равными и в несколько раз превышающими значение емкости C_x . В результате напряжение на выходе преобразователя тока в напряжение ИНУТ

будет равно разности токов перезаряда примерно одинаковых по величине емкости конденсаторов, возникающей из-за подключения к измерительной цепи емкости сенсора. Для фиксации этой разницы на выходе ИНУТ установлена схема выборки-хранения, синхронизируемая генератором импульсов и запускаемая в момент одного из фронтов этих импульсов.

Первым принципиальным отличием предложенного в [17] решения от представленного на рис. 1, является то, что второй вывод измеряемой емкости C_X подключен не ко входу преобразователя тока в напряжение, а заземлен. Это позволило существенно расширить область возможного применения устройства по указанной ранее причине. При этом увеличение величины измеряемой емкости в данной схеме приводит не к увеличению, а к уменьшению тока перезаряда конденсатора C_1 , но линейная связь между емкостью и силой тока перезаряда при этом сохраняется, правда, в достаточно ограниченных пределах.

Второе отличие заключается в том, что на выходе ИНУТ схема выборки-хранения из всего переходного процесса выбирает только очень короткий участок времени, соответствующий моменту начала процесса перезаряда конденсаторов. За счет этого, а также того, что входное сопротивление преобразователя тока в напряжение стремится к нулю, в еще большей степени по сравнению с прототипом удалось подавить влияние паразитного сопротивления измерительного конденсатора на величину выходного сигнала.

Для анализа работы схемы, представленной на рис. 2, была использована модель ее измерительной ячейки, показанная на рис. 3. Перенос в ней одной из обкладок конденсатора C_1 вместо входа преобразователя тока в напряжение на землю вполне правомерен, поскольку у таких преобразователей напряжение на входе практически неизменно и близко к нулю.

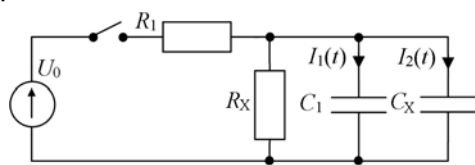


Рис. 3. Эквивалентная схема измерительной ячейки сенсора

Для эквивалентной схемы напряжение на конденсаторах и ток заряда конденсатора C_1 при замыкании ключа будут описываться выражениями

$$U_C(t) = R_X \cdot U_0 \frac{1 - \exp\left(-t \frac{R_1 + R_X}{R_1 \cdot R_X \cdot C}\right)}{R_1 + R_X}; \quad (1)$$

$$I_1(t) = \frac{U_0 \cdot C_1}{R_1 \cdot C} \exp\left(-t \frac{R_1 + R_X}{R_1 \cdot R_X \cdot C}\right), \quad (2)$$

где $C = C_1 + C_X$, а U_0 – амплитуда прямоугольных импульсов напряжения на выходе генератора G.

Чтобы в явном виде оценить влияние емкости C_X и сопротивления утечек R_X на значения описы-

ваемых данными выражениями токов и напряжений в разные моменты времени, рассмотрим соответствующие им функции чувствительности, представляющими собой их производную по C_X :

$$F_U(t) = \frac{U_0 \cdot t}{R_1 \cdot C^2} \exp\left(-t \frac{R_1 + R_X}{R_1 \cdot R_X \cdot C}\right); \quad (3)$$

$$F_I(t) = \frac{U_0 \cdot C_1}{R_1 \cdot C^2} \left(\frac{R_1 + R_X}{R_X \cdot R_1 \cdot C^2} \cdot t - 1\right) \cdot \exp\left(-t \frac{R_1 + R_X}{R_1 \cdot R_X \cdot C}\right). \quad (4)$$

Соответствующие данным выражениям графики, показывающие зависимости от положения во времени значений чувствительностей напряжения и тока к изменению емкости для случая, когда $R_1 = 5$ кОм; $C_1 = 200$ пФ и $U_0 = 10$ В, и для различных значений R_X , представлены на рис. 4.

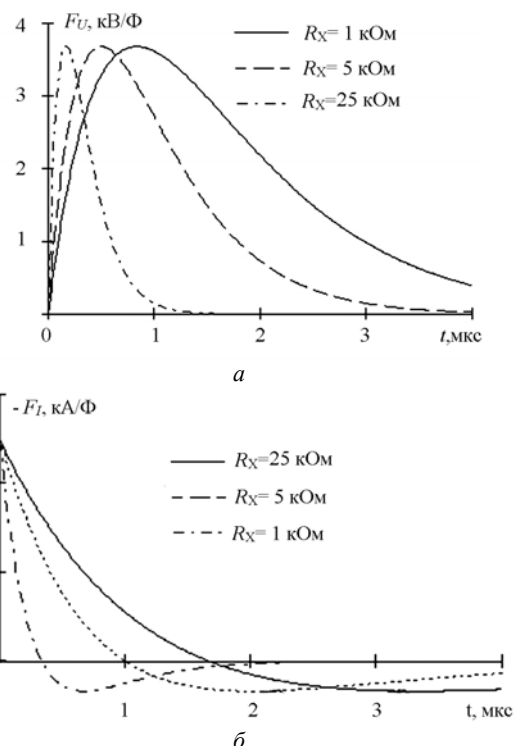


Рис. 4. Зависимости функций чувствительности напряжения на конденсаторах C_1, C_X (а) и тока на входе ИНУТ (б) от времени для различных значений сопротивления утечки R_X

Как видно из выражений (3), (4) для $F_U(t)$ и $F_I(t)$ и из соответствующих им графиков, в обоих случаях значение сопротивления R_X не оказывает влияния на величину максимальной чувствительности. Однако для функции $F_U(t)$ положение пика максимальной чувствительности зависит от величины R_X , что существенно затрудняет возможность использования зависимости $U(t)$ для определения C_X . Если же для нахождения емкости использовать зависимость тока заряда от времени, то, как видно из уравнения (4) и графика на рис. 4, б, избавиться от влияния R_X на результаты измерения можно, если замер тока заряда производить в максимально короткий момент времени от начала переходного процесса. Применительно к реализующей метод измерения C_X схеме,

представленной на рис. 2, этому моменту соответствует перепад напряжения на выходе генератора G. В этот момент величина чувствительности максимальна и равна

$$F_I(t) = -\frac{U_0 \cdot C_X}{R_1 \cdot (C_1 + C_X)^2}. \quad (5)$$

Как следует из данного выражения, величина чувствительности здесь также не постоянна, зависит от соотношения между емкостями конденсаторов C_X и C_1 и принимает максимальное значение при $C_X = C_1$. Нормированный на величину U_0/R_1 и на C_1 вид зависимости $f_I(C_X/C_1) = -R_1 \cdot F_I(0)/U_0$ представлен на рис. 5.

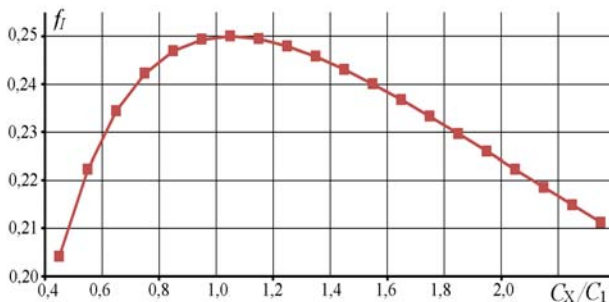


Рис. 5. Зависимость максимума относительной функции чувствительности по току от отношения измеряемой емкости к емкости опорного конденсатора C_1

Как видно из данной зависимости, при отклонении измеряемой емкости от емкости опорного конденсатора более чем в 2 раза чувствительность падает примерно на 20% от ее максимально возможного значения. При этом уменьшение емкости C_X относительно C_1 менее предпочтительно, чем ее увеличение, так как при уменьшении емкости C_X чувствительность падает до нуля гораздо быстрее, чем при ее увеличении. Отсюда следует, что для достижения наилучших результатов необходимо подбирать значения емкостей $C_1 = 0,5 \cdot C_2$ в соответствии с ожидаемым диапазоном изменения величины C_X .

Наряду с необходимостью согласования параметров схемы с величиной измеряемой емкости для достижения высоких эксплуатационных свойств датчика потребовалось решить еще целый ряд проблем, связанных с оптимизацией использованных в нем схемотехнических решений. Для этого была разработана модель датчика, позволяющая учитывать такие факторы, как разброс параметров прямой и компенсирующей RC-цепей R_1 , C_1 и R_2 , C_2 , зависимость этих параметров от температуры, наличие задержки на инвертирующем элементе, конечная длительность фронтов генератора импульсов, неидеальность работы устройства выборки-хранения и преобразователя тока в напряжение. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, пример которых представлен на рис. 6, показал хорошую адекватность разработанной модели.

Разработанная модель была применена для оптимизации параметров схемы емкостного преобразователя при проектировании приборов контроля,

отличающихся как по их функциональному назначению, так и по условиям работы. Такая оптимизация позволила существенно улучшить технические характеристики разрабатываемых устройств. Так, для емкостного датчика приближения удалось добиться порога чувствительности 0,1 пФ в диапазоне изменения емкости датчика от 50 до 500 пФ и чувствительности не менее 100 мВ/пФ. При этом диапазон рабочих температур датчика составлял $-40 \dots +45$ °С, ток потребления датчика при напряжении питания 5 В не превышал 0,35 мА, а диапазон изменения шунтирующего паразитного сопротивления лежал в пределах от 5 кОм до бесконечности.

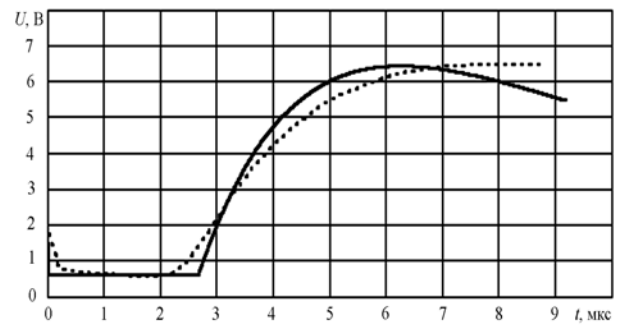


Рис. 6. Временная диаграмма напряжения на выходе преобразователя тока в напряжение.

Пунктир – экспериментальный результат, сплошная линия – результаты математического моделирования в среде MathCAD

Обсуждение результатов

Проведенные исследования и результаты натуральных экспериментов показали, что предложенный емкостный преобразователь позволяет существенно повысить его надежность и чувствительность, а также другие технико-экономические показатели датчиков приближения, построенных на его основе.

Паразитные утечки тока по диэлектрику, на котором закрепляется измерительный электрод преобразователя, не оказывают практически никакого влияния на выходной сигнал, что является несомненным достоинством данного решения. Но поскольку выходной сигнал преобразователя нелинейно зависит от величины измеряемой емкости, данный преобразователь целесообразно применять именно как датчик приближения или иной элемент дискретной автоматики, применяемый в различных производствах.

В частности, его успешно можно применять в сильно запыленных условиях производств, связанных, например, с переработкой зерна [18, 19], а также в технических средствах охранной сигнализации в качестве извещателя предупреждающего действия [14]. В последнем случае для уменьшения числа ложных срабатываний и повышения надежности достоверной идентификации попыток несанкционированного доступа можно использовать алгоритмы, представленные, например, в работах [20, 21], либо аппаратные решения, подобные приведенным в [22, 23].

Кроме того, применение датчика совместно с современными средствами микроконтроллерной техни-

ки типа Arduino или Raspberry позволяет реализовать перспективные методы цифровой обработки сигналов, которые могут значительно увеличить надежность его работы. Применение микроконтроллеров или систем на кристалле позволит также применять такие датчики в системах автоматического управления или неразрушающего контроля, обеспечить возможность автоматической настройки на измеряемую емкость, а также проводить проверку работоспособности датчика и выделять такие нештатные ситуации, как обрыв измерительного электрода или его замыкание на общий провод.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность бывшему аспиранту АлтГТУ В.Б. Авцинову за участие в проведении теоретических и экспериментальных исследований емкостных датчиков приближений, а также за разработку и внедрение аппаратуры, в том числе приборов охранной сигнализации с применением разработанных датчиков.

Литература

1. Dunn W. Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control. – Norwood: Artech House, 2006. – 331 p.
2. Wilson J. Sensor Technology Handbook. – Amsterdam: Elsevier, 2005. – 702 p.
3. Clarence S. Sensors and Actuators: Control System Instrumentation. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 698 p.
4. Picotto G., Pisani M., Sosso A. A multi-electrode plane capacitive sensor for displacement measurements and attitude controls // Meas. Sci. Technol. – 2009. – Vol. 20, № 084011. – P. 1–4. – doi: 10.1088/0957-0233/20/8/084011
5. A Novel Single-Excitation Capacitive Angular Position Sensor Design / B. Hou, B. Zhou, M. Song, Z. Li, R. Zhang // Sensors. – 2016. – Vol. 16 (8). – No. 1196. – P. 1–16. doi:10.3390/s16081196
6. Capacitive Rotary Encoder Based on Quadrature Modulation and Demodulation / D. Zheng, S. Zhang, S. Wang, X. Zhao // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2015. – Vol. 64 (1). – P. 143–153. doi: 10.1109/TIM.2014.2328456
7. Design of capacitive sensor for water level measurement / A. Qurthobi, R. Iskandar, A. Krisnata, Weldzikarvina // J. Phys.: Conf. Ser. – 2016. – Vol. 776, № 012118. – P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/776/1/012118
8. CMOS MEMS capacitive absolute pressure sensor / M. Narducci, L. Yu-Chia, W. Fang, J. Tsai // J. Micromech. Microeng. – 2013. – Vol. 23 (5), № 055007. doi: 10.1088/0960-1317/23/5/055007
9. Real-time measurement of the three-axis contact force distribution using a flexible capacitive polymer tactile sensor / H. Lee, J. Chung, S. Chang, E. Yoon // Micromech. Microeng. – 2011. – Vol. 21 (3), № 035010. – P. 1–9. doi: 10.1088/0960-1317/21/3/035010
10. Båvall L. Capacitive detection of humans for safety in industry – a numerical and experimental investigation / L. Båvall, N. Karlsson // Meas. Sci. Technol. – 1998. – Vol. 9 (3). – P. 505–509. doi: 10.1088/0957-0233/9/3/027
11. Pat. 4 684 931 США, МПК G08B 13/26. Capacitive sensing security system / S. Parks (USA); опубл. 04.08.87. – 10 с. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/97/56/a5/181edafe910e7f/US4684931.pdf>
12. Pat. 4 804 945 США, МПК G08B 13/00; G08B 13/18; G08B 13/26. Door alarm with infrared and capacitive sensors / T. Millet (Канада); опубл. 14.02.1989. – 6 с.
13. Pat. US 7 515 140 B2 США, МПК G01F 3/041. Capacitive sensor / H. Philipp (Великобритания); опубл. 07.04.2009. – 7 с.
14. Suchkova L.I. Detection of affectings on fencing surfaces in systems of protection and life-support of buildings / L.I. Suchkova, A.G. Yakunin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 289, № 012028. – P. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/289/1/012028
15. Weadon T. Ceramic-polymer capacitive sensors for tactile/force awareness in harsh environment robotic applications / T. Weadon, T. Evans, E. Sabolsky // Smart Mater. Struct. – 2013. – Vol. 22 (12), № 125017. doi: 10.1088/0964-1726/22/12/125017
16. Гриневич Ф.Б., Новик А.И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками / Ф.Б. Гриневич, А.И. Новик. – Киев: Наук. Думка, 1987. – 112 с.
17. Пат. 2 168 729 РФ, МПК G01R27/26. Емкостной преобразователь / А.Г. Якунин, В.Б. Авцинов (РФ). – № 2 000 106 270 / 09; заявл. 13.03.00; опубл. 10.06.01. – Бюл. № 16. – 5 с.
18. Nicolaeva B.K. Development of a software and hardware system for monitoring the air cleaning process using a cyclone-separator / B.K. Nicolaeva, V.L. Zlochevskiy, A.P. Borisov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 881(1), № 012023. – P. 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/881/1/012023/pdf
19. Borisov A.P. Software and hardware complex for research and management of the separation process // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2018. – Vol. 289, № 012039. – P. 1–8. doi: 10.1088/1757-899X/289/1/012039
20. Yakunin A.G. Hardware-software and algorithmic provision of multipoint systems for long-term monitoring of dynamic processes / A.G. Yakunin, H.M. Hussein // J. of Physics: Conf. Series. – 2017. – Vol. 881, № 012028. – P. 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/881/1/012028.
21. Hussein H.M. Detection of regularity violations of cyclic processes in a temperature monitoring system using patterns form / H.M. Hussein, A.G. Yakunin // J. of Siberian Federal University Mathematics & Physics. – 2015. – Vol. 8 (2). – P. 157–164.
22. Пат. 2 284 578 РФ, МПК G 08 B 13/26. Емкостный преобразователь для систем охранной сигнализации / А.В. Галков, А.Г. Якунин. – № 2 005 112 405 / 09; заявл. 25.04.05; опубл. 27.09.06. – Бюл. № 27. – 7 с.
23. Пат. 2 297 671 РФ, МПК G 08 B 13/26. Емкостная адаптивная охранная система / А.В. Галков, О.И. Хомутов, А.Г. Якунин. – № 2 005 119 549 / 09; заявл. 23.06.05; опубл. 20.04.07. – Бюл. № 11. – 7 с.

Якунин Алексей Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. информатики и вычислительной техники и информационной безопасности (ИВТ и ИБ) Алтайского государственного технического университета (АлтГТУ)
Ленина пр-т., д. 46, г. Барнаул, Россия, 656038
ORCID 0000-0001-5103-3177
Тел.: +7 (385-2) 29-07-86
Эл. почта: yakunin@agtu.secna.ru

Yakunin A.G.

Alarm capacitive sensor based on transients in RC-circuits

The operation principle of the capacitive sensor, which was originally developed for use in the alarm security systems, is described. But it can also be used as a proximity sensor in production in automation systems to inform the control device or operator of the approach to the sensor sensitive surface. The operation principle of the device is based on measuring the difference in charge currents of the capacitance of the reference capacitor and the capacitance formed by the sensitive sensor surface and the external object as well as for other applications related to the measurement of electrical capacitance. The main advantage of the proposed solution is a significant reduction in the effect of parasitic leakage currents arising in the sensor capacitance under the influence of contaminants and changes in the humidity of the environment. In addition, by changing the capacitance of the reference capacitor, the capacitance of the sensor can be varied in a very wide range, from picofarad units to fractions of microfarads. Hence, when using this sensor, its sensitive surface can be both a conductive surface (grid, plate, etc.) with an area from several square centimeters to tens of square meters, and a wire that length can be varied from a few centimeters to hundreds of meters. And this sensor does not require the use of special means to ensure a high degree of isolation of the sensor's sensitive surface from the environment.

Keywords: proximity sensor, anticipation alarm system, capacitive sensor.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-1-33-38

References

1. Dunn W. *Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control*. Norwood, Artech House Publ., 2006, 331 p.
2. Wilson J. *Sensor Technology Handbook*. Amsterdam, Elsevier Publ., 2005, 702 p.
3. Clarence S. *Sensors and Actuators: Control System Instrumentation*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2007, 698 p.
4. Picotto G, Pisani M, Sosso A. A multi-electrode plane capacitive sensor for displacement measurements and attitude controls *Meas. Sci. Technol.*, 2009, vol. 20, no. 084011, pp. 1–4. doi: 10.1088/0957-0233/20/8/084011
5. Hou B., Zhou B., Song M., Li Z., Zhang R. A Novel Single-Excitation Capacitive Angular Position Sensor Design. *Sensors*, 2016, vol. 16 (8), no. 1196, pp. 1–16. doi: 10.3390/s16081196
6. Zheng D., Zhang S., Wang S., Zhao X. Capacitive Rotary Encoder Based on Quadrature Modulation and Demodulation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2015, vol. 64 (1), pp. 143–153. doi: 10.1109/TIM.2014.2328456
7. Qurthobi A., Iskandar R., Krisnatal A., Weldzikarvina. Design of capacitive sensor for water level measurement. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2016, vol. 776, no. 012118, pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/776/1/012118.
8. Narducci M., Yu-Chia L., Fang W. and Tsai J. CMOS MEMS capacitive absolute pressure sensor. *J. Micromech. Microeng.*, 2013, vol. 23(5), no. 055007. doi: 10.1088/0960-1317/23/5/055007
9. Lee H., Chung J., Chang S. and Yoon E. Real-time measurement of the three-axis contact force distribution using a flexible capacitive polymer tactile sensor. *J. Micromech. Microeng.* 2011, vol. 21(3), no. 035010, pp. 1–9. doi: 10.1088/0960-1317/21/3/035010
10. Båvall L., Karlsson N. Capacitive detection of humans for safety in industry – a numerical and experimental investigation. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, vol. 9 (3), pp. 505–509. doi: 10.1088/0957-0233/9/3/027
11. Parks S. *Capacitive sensing security system*. 1987, Patent USA, no. 4684931.
12. Millet T. *Door alarm with infrared and capacitive sensors*. 1989, Patent USA, no. 4804945.
13. Harald P. Capacitive sensor. 2009, Patent USA no. US 7515140 B2, 7 p.
14. Suchkova L., Yakunin A. Detection of affectings on fensing surfaces in systems of protection and life-support of buildings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 289, no. 012028, pp. 1–7. doi:10.1088/1757-899X/289/1/012028
15. Weadon T., Evans T., Sabolsky E. Ceramic-polymer capacitive sensors for tactile/force awareness in harsh environment robotic applications. *Smart Mater. Struct.*, 2013, vol. 22 (12), no. 125017. doi: 10.1088/0964-1726/22/12/125017
16. Grinevich F.B., Novik A.I. Measuring compensation and bridge devices with capacitive sensors [*Izmeritelnye kompensacionno-mostovye ustrojstva s emkostnymi datchikami.*]. 1987, Kiev, Kiev: nauk. Dumka, 112 p.
17. Yakunin A.G., Avtscinov V. B. Capacitive converter [*Emkostnoj preobrazovatel*]. Patent RF, no. 2168729, 2000.
18. Nicolaeva B.K., Zlochevskiy V.L., Borisov A.P. Development of a software and hardware system for monitoring the air cleaning process using a cyclone-separator *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 881(1), no. 012023, pp. 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/881/1/012023/pdf
19. Borisov A.P. Software and hardware complex for research and management of the separation process *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 289, no. 012039, pp. 1–8. doi: 10.1088/1757-899X/289/1/012039
20. Yakunin A.G., Hussein H.M. Hardware-software and algorithmic provision of multipoint systems for long-term monitoring of dynamic processes *J. of Physics: Conf. Series*, 2017, vol. 881, no. 012028, pp. 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/881/1/012028
21. Hussein H.M., Yakunin A.G. Detection of regularity violations of cyclic processes in a temperature monitoring system using patterns form *J. of Siberian Federal University Mathematics & Physics*, 2015, vol. 8(2), pp. 157–164.
22. Galkov A.V., Yakunin A.G. Capacitive converter for burglar alarm systems [*Emkostnoj preobrazovatel dlya sistem oxrannoj signalizacii*]. Patent RF, no. 2284578, 2006.
23. Galkov A.V., Homutov O.I., Yakunin A.G. Capacitive adaptive security system [*Emkostnaya adaptivnaya ohrannaya sistema*]. Patent RF, no. 2297671, 2007.

Alexey G. Yakunin

Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Informatics, Computer Engineering and Information Security of the Altai State Technical University (AltSTU)
46, Lenin pr., Barnaul, Russia, 656038
ORCID 0000-0001-5103-3177
Phone: +7 (385-2) 29-07-86
Email: yakunin@agtu.secna.ru