

В. С. Мелентьев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, vs_mel@mail.ru,

В. И. Батищев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, vib@list.ru,

Е. А. Сусова, аспирант, katu_xa@mail.ru,

Самарский государственный технический университет, Самара

Повышение точности измерения параметров емкостных датчиков*

Предложен метод и устройство для отдельного определения емкости, сопротивления изоляции и соединительных проводников датчика. Приведены результаты анализа погрешности измерения емкости датчика. Полученные результаты позволяют выбирать оптимальное значение интервала времени между измерениями и значение сопротивления образцового резистора измерительной цепи в соответствии с требованиями по точности и времени измерения.

Ключевые слова: емкостной датчик, переходный процесс, мгновенные значения, сопротивление проводника, сопротивление изоляции, квантование, погрешность

Введение

В технологических процессах, где необходим непрерывный быстродействующий контроль свойств или состояний веществ [1], разбраковка продукции по свойствам или геометрическим размерам, все более широкое применение находят емкостные датчики (ЕД) [2–4].

Методы измерения емкости датчиков с помощью мостовых схем достаточно хорошо изучены [5], и их совершенствование сводится, в основном, к модернизации способов автоматического уравнивания моста [1, 4]. Однако реализация такого подхода к измерению емкости существенно увеличивает время измерения.

При измерении параметров ЕД учет их многоэлементной схемы замещения позволяет определять значения информативных параметров датчика независимо от неинформативных, что значительно повышает точность измерения емкости.

Однако в большинстве работ, посвященных построению измерительных преобразователей (ИП) параметров ЕД [6, 7], основное внимание уделяется уменьшению погрешностей самих ИП, а не увеличению точности определения параметров датчиков.

К достаточно новому направлению можно отнести методы определения параметров многокомпонентных двухполюсников, использующие подачу на измерительную цепь (ИЦ) импульсов n -й степени с n -кратным дифференцированием сигналов на входе и выходе ИП [8]. Однако такие методы чрезвычайно трудно реализовать на практике.

В настоящее время все большее распространение находят методы определения параметров ЕД

по отдельным мгновенным значениям переходного процесса в измерительной цепи при подключении к ней напряжения постоянного тока. В данных методах время измерения не зависит от постоянной времени ИЦ τ , а определяется, в основном, временем измерения мгновенных значений переходного процесса и реализации алгоритма обработки измеренных значений. Кроме того, на быстродействие устройств, реализующих методы, накладывает ограничение то, как связаны между собой момент начала измерения мгновенного значения переходного процесса и момент подключения напряжения к измерительной цепи [9].

Методы измерения параметров датчиков по мгновенным значениям нескольких переходных процессов обеспечивают дальнейшее сокращение времени измерения [10]. Для этого формируют два переходных процесса на средних точках двух измерительных цепей или на известном и неизвестном элементах ИЦ.

Одним из элементов, оказывающих влияние на точность измерения, является эквивалентное активное сопротивление, обусловленное потерями в изолирующем диэлектрике и сквозными токами утечки. Это приводит к отклонению используемой модели от реального переходного процесса, что неизбежно вызывает дополнительную погрешность определения информативного параметра датчика.

В работах [11, 12] авторами предложены методы отдельного определения неизвестного сопротивления изоляции и емкости датчика. Однако они не дают возможности измерять другой неинформативный элемент — сопротивление соединительных проводников, с помощью которых датчик подключают к ИЦ.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-08-00252 А).

Разработанные методы определения емкости и сопротивления соединительных проводников [13, 14], в свою очередь, не позволяют находить сопротивление изоляции ЕД.

В статье рассматривается новый метод, реализация которого обеспечивает возможность раздельного определения емкости, сопротивления изоляции и соединительных проводников.

Метод раздельного определения параметров емкостных датчиков

Метод заключается в том, что на ИЦ, состоящую из последовательно включенных первого образцового резистора с сопротивлением R_0 , ЕД, имеющего первый соединительный проводник с сопротивлением r_1 , емкость C_X , сопротивление изоляции R_{X1} , второй соединительный проводник с сопротивлением r_2 , и второго образцового резистора R_0 , подают напряжение постоянного тока U_0 . Через образцовый интервал времени Δt одновременно измеряют мгновенные значения напряжений на участке цепи, содержащем емкостной датчик и второй образцовый резистор, и на втором образцовом резисторе относительно общего вывода ИЦ. Через образцовый интервал времени Δt повторно измеряют мгновенное значение напряжения на том же участке цепи относительно общего вывода; через такой же интервал времени Δt измеряют мгновенное значение напряжения на этом же участке цепи и определяют неизвестные емкость, сопротивление соединительных проводников и сопротивление изоляции по измеренным значениям.

Временные диаграммы, поясняющие метод, приведены на рис. 1.

Если к измерительной цепи подключить источник напряжения постоянного тока U_0 , то переходные процессы на участке цепи, содержащем ЕД и второй образцовый резистор, и на втором образцовом резисторе относительно общего вывода ИЦ будут изменяться в соответствии с выражениями

$$u_1(t) = \frac{U_0}{A} \left\{ R_0 - B \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right\};$$

$$u_2(t) = \frac{U_0}{A} \left\{ R_0 + R_{X2} + B \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right\},$$

где $A = 2R_0 + R_{X2}$; $R_{X2} = r_1 + r_2$; $B = \frac{R_0 R_{X1}}{2R_0 + R_{X1} + R_{X2}}$;

$\tau = \frac{C_X R_{X1} (2R_0 + R_{X2})}{(2R_0 + R_{X2} + R_{X1})}$ — постоянная времени ИЦ.

Переходные процессы, протекающие в ИЦ, имеют шесть параметров: C_X , R_{X1} , R_0 , R_{X2} , U_0 и Δt , два из которых (R_0 и Δt) считаются известными. Поэтому для раздельного определения неизвест-

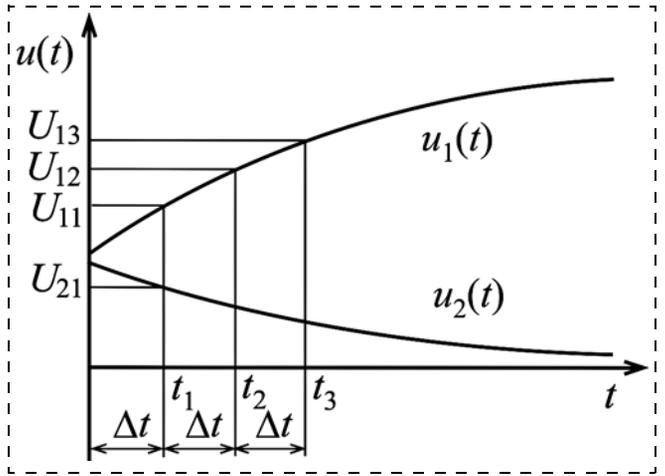


Рис. 1. Временные диаграммы, характеризующие метод измерения

ных параметров необходимо составить систему четырех уравнений:

$$\begin{cases} U_{11} = \frac{U_0}{A} \left\{ R_0 - B \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\}; \\ U_{21} = \frac{U_0}{A} \left\{ R_0 + R_{X2} + B \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right\}; \\ U_{12} = \frac{U_0}{A} \left\{ R_0 - B \left[1 - \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\}; \\ U_{13} = \frac{U_0}{A} \left\{ R_0 - B \left[1 - \exp\left(-\frac{3\Delta t}{\tau}\right) \right] \right\}. \end{cases} \quad (1)$$

За счет использования мгновенных значений напряжений (1) можно определить сопротивление изоляции, сопротивление соединительных проводников и емкость:

$$R_{X1} = \frac{(U_{12} - U_{11})^3 \times}{R_0(U_{13} - U_{12})(U_{11} - U_{21})(2U_{12} - U_{13} - U_{11}) -} \rightarrow \frac{\times (2R_0 + R_{X2})^2}{-(2R_0 + R_{X2})(U_{12} - U_{11})^3}; \quad (2)$$

$$R_{X2} = \frac{R_0[(U_{11} - U_{21})(U_{13} - U_{12}) - 2(U_{12} - U_{11})^2]}{U_{21}(U_{13} - U_{12}) + (U_{12} - U_{11})^2}; \quad (3)$$

$$C_X = - \frac{(2R_0 + R_{X1} + R_{X2})\Delta t}{R_{X1}(2R_0 + R_{X2}) \ln\left(\frac{U_{13} - U_{12}}{U_{12} - U_{11}}\right)}. \quad (4)$$

При определении емкости ЕД в соответствии с выражением (4) используются значения сопротивлений R_{X1} и R_{X2} , полученные согласно соотношениям (2) и (3), что обеспечивает повышение точности измерения C_X .

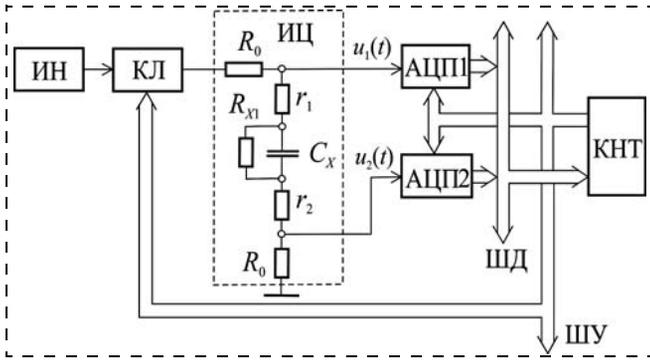


Рис. 2. Схема СИ, реализующего данный метод

Предлагаемый метод можно реализовать с помощью средства измерения (СИ), которое представлено на рис. 2.

В состав СИ входят: источник опорного напряжения постоянного тока ИН; аналоговый ключ КЛ; измерительная цепь ИЦ; два аналого-цифровых преобразователя АЦП1 и АЦП2 и контроллер КНТ с шинами управления ШУ и данных ШД.

Оценка погрешности, обусловленной квантованием мгновенных значений переходных процессов

Для реализации алгоритма раздельного определения параметров ЕД используется преобразование мгновенных значений переходных процессов в код. Применение в цифровых СИ квантования по уровню неизбежно приводит к погрешности, которая оказывает влияние на результат определения параметров.

Для анализа влияния квантования мгновенных значений переходных процессов на погрешность определения емкости можно использовать известную методику [15]. Методика основана на известном положении теории приближенных вычислений, заключающемся в том, что погрешность вычисле-

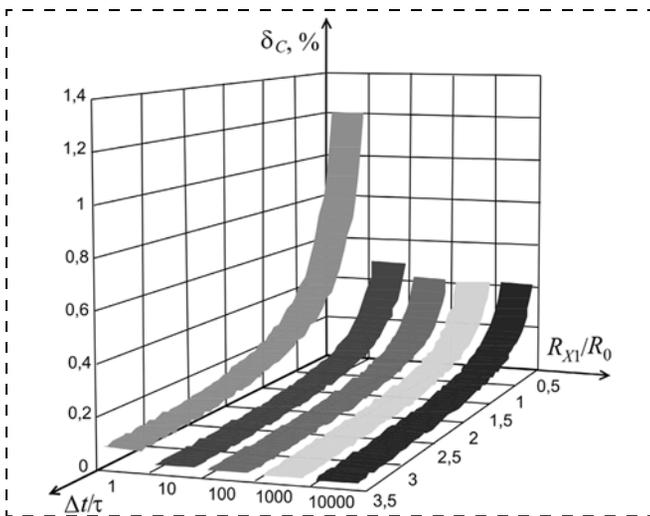


Рис. 3. Графики зависимости погрешности определения емкости от $\frac{\Delta t}{\tau}$ и $\frac{R_{X1}}{R_0}$ при $\frac{R_{X2}}{R_0} = 0,001$

ния функции с приближенно заданными аргументами можно оценить с помощью дифференциала этой функции. Иными словами, погрешность функции — это возможное приращение функции, которое она получит, если аргументам дать приращения, равные их погрешностям. В нашем случае погрешности аргументов соответствуют погрешностям квантования мгновенных значений.

Если считать, что измерение мгновенных значений сигналов U_{11} , U_{12} и U_{13} проводилось с погрешностью преобразования АЦП и абсолютные погрешности измерений равны $\Delta U_{11} = \Delta U_{12} = \Delta U_{13} = \Delta U = U_0/2n$ (где n — число разрядов АЦП), то абсолютная погрешность определения C_X согласно соотношению (4) с учетом погрешности квантования аналого-цифрового преобразователя будет равна

$$\Delta C_X = \left[\left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial C_X}{\partial U_{13}} \right| \right] \Delta U. \quad (5)$$

За счет использования выражений (4) и (5) можно определить предельную относительную погрешность измерения емкости датчика:

$$\delta_C = \frac{\tau \left[1 + \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right] (2R_0 + R_{X1} + R_{X2})(2R_0 + R_{X2})}{\Delta t 2^n R_0 R_{X1} \exp\left(-\frac{2\Delta t}{\tau}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \right]}. \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что погрешность зависит от числа разрядов АЦП, длительности образцового интервала времени Δt , постоянной времени ИЦ τ , сопротивлений образцового резистора R_0 , соединительного проводника R_{X2} и изоляции датчика R_{X1} .

Графики, которые характеризуют зависимость погрешности δ_C от отношения образцового интервала времени Δt к постоянной времени ИЦ τ и отно-

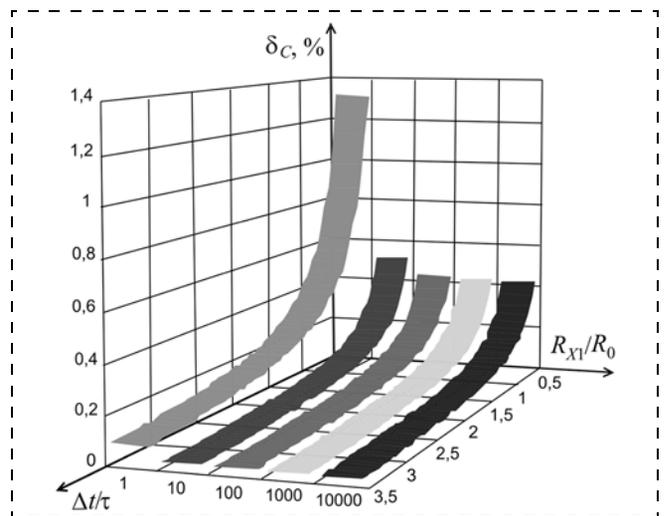


Рис. 4. Графики зависимости погрешности определения емкости от $\frac{\Delta t}{\tau}$ и $\frac{R_{X1}}{R_0}$ при $\frac{R_{X2}}{R_0} = 0,1$

шения сопротивления изоляции датчика R_{X1} к сопротивлению образцового резистора R_0 при $\frac{R_{X2}}{R_0} = 0,001$ и $\frac{R_{X2}}{R_0} = 0,1$, построенные согласно выражению (6),

приведены на рис. 3 и 4 соответственно.

Анализ рис. 3 и 4 показывает, что погрешность существенно зависит от $\frac{\Delta t}{\tau}$ и с увеличением данного отношения уменьшается. Кроме того, δ_C определяется отношением $\frac{R_{X1}}{R_0}$. Однако при $\frac{R_{X1}}{R_0} \geq 100$ погрешность практически не изменяется.

Зависимость погрешности от отношения $\frac{R_{X2}}{R_0}$ незначительна, и при достаточно малых значениях сопротивления соединительных проводников ее можно не принимать во внимание.

Заключение

Разработанный метод и реализующее его СИ обеспечивают возможность раздельного определения емкости, сопротивления изоляции и соединительных проводников.

Проведенная оценка погрешности определения емкости датчика, обусловленной квантованием мгновенных значений переходных процессов показывает зависимость данного вида погрешности, в первую очередь, от соотношения образцового интервала времени Δt и постоянной времени измерительной цепи.

Полученные в работе результаты позволяют выбирать оптимальные значения Δt при известном диапазоне изменения емкости датчика, а также значение сопротивления образцового резистора R_0 в соответствии с требованиями по точности и времени измерения.

1. **Golnabi H., Sharifian M.** Investigation of water electrical parameters as a function of measurement frequency using cylindrical capacitive sensors // Measurement. 2013. Vol. 46, Iss. 1. P. 305–314.
2. **Azimloo H., Rezazadeh G., Shabani R.** Development of a capacitive angular velocity sensor for the alarm and trip applications // Measurement. 2015. Vol. 63. P. 282–286.
3. **Kim M., Moon W.** A new linear encoder-like capacitive displacement sensor // Measurement. 2006. Vol. 39, Iss. 6. P. 481–489.
4. **Nerino R., Cabiati F., Picotto G. B., Sacconi A.** A surface profile reconstruction method based on multisensor capacitive transducers // Measurement. 1994. Vol. 13, Iss. 1. P. 77–84.
5. **Малиновский В. Н.** Цифровые измерительные мосты. М.: Энергия, 1976.
6. **Kuznetsov E. N., Kuznetsov N. E., Tsypin B. V.** A two-channel transducer for capacitive sensors // Measurement Techniques. 2008. Vol. 51, Iss. 5. P. 513–515.
7. **Arbuzov V. P.** Time division of the channels of the measuring circuits of capacitive and inductive sensors // Measurement Techniques. 2007. Vol. 50, Iss. 7. P. 752–757.
8. **Ivanov V. I., Titov V. S., Petrov A. S.** Converters of the parameters of multicomponent two-terminal networks with a DC short circuit and a break in the circuit between poles // Measurement Techniques. 2014. Vol. 57, Iss. 3. P. 340–346.
9. **Мелентьев В. С.** Новое в измерениях параметров емкостных датчиков по мгновенным значениям переходных процессов // Датчики и системы. 2010. № 2. С. 26–29.
10. **Melent'ev V. S.** Methods for increasing the accuracy of measurements of the parameters of capacitive transducers // Measurement Techniques. 2014. Vol. 57, Iss. 7. P. 800–804.
11. **Мелентьев В. С., Батищев В. И., Смолина А. М., Евстифеева Т. С.** Повышение точности измерения параметров емкостных датчиков перемещения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 6. С. 36–38.
12. **Мелентьев В. С., Батищев В. И., Евстифеева Т. С., Левина К. Д.** Исследование метода и средства измерения параметров емкостных датчиков перемещения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. С. 45–49.
13. **Мелентьев В. С., Смолина А. М., Евстифеева Т. С.** Совершенствование метода измерения параметров емкостных датчиков // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сб. статей Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2013. С. 238–240.
14. **Melent'ev V. S., Gubanov N. G., Latukhova O. A., Smolina A. M.** Improvement of methods of measuring the parameters of two-terminal electric circuits // Measurement Techniques. 2013. Vol. 56, Iss. 6. P. 691–694.
15. **Мелентьев В. С., Латухова О. А., Евстифеева Т. С.** Метод раздельного определения параметров емкостных датчиков по мгновенным значениям переходных процессов // Ползуновский вестник. 2013. № 2. С. 106–108.

Improving the Accuracy of Measurement of Parameters of Capacitive Sensors

V. S. Melentiev, vs_mel@mail.ru, **V. I. Batishchev**, vib@list.ru✉, **E. A. Susova**, ims@samgtu.ru, The Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation

Corresponding author: **Batishchev Vitaliy I.**, D. Sc., Professor, Head of Department, The Samara State Technical Univer, Samara, 443100, Russian Federation, e-mail: vib@list.ru

Received on January 12, 2016

Accepted on January 26, 2016

Briefly considers the current state of the problem of precision measurement of parameters of capacitive sensors and measuring converters for their definition. It is established that at present, a proliferation of methods for the determination of parameters of capacitive sensors on individual instant values of the transition process in the measuring circuit when connected it to a DC voltage. In these methods the time measurement does not depend on the time constant of the measuring circuit, and is determined mainly by the measurement time of the instantaneous values of the signals and the implementation of the algorithm processing the measured values and the duration of the exemplary time interval. One of the problems arising in the implementation of mea-

suring means that use such methods, is the effect of uninformative parameters of the measuring circuit and their instability on the result of the determination of informative parameters. Using the uninformative elements of the equivalent circuit of the sensor allows to determine their influence on informative parameters. A disadvantage of the known methods separate measurement sensors parameters is that they do not allow to define along with the capacity the multiple uninformative parameters. The aim of this work is to study a new method of measurement of parameters of capacitor sensors, which allows to determine the resistance of the connecting conductors that connect the sensor to the measuring circuit, and equivalent resistance due to losses in the insulating dielectric and leakage currents, which allows to increase the accuracy of measurement of capacitance.

Keywords: capacitive sensors, transient, instant values, an error, resistance of connecting conductors, insulation resistance, measuring circuit

Acknowledgements: This work was supported by RFBR, project 16-08-00252 A.

For citation:

Melent'ev V. S., Batishchev V. I., Susova E. A. Improving the Accuracy of Measurement of Parameters of Capacitive Sensors, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 6, pp. 391–395.

DOI: 10.17587/mau.18.391-395

References

1. **Golnabi H., Sharifian M.** Investigation of water electrical parameters as a function of measurement frequency using cylindrical capacitive sensors, *Measurement*, 2013, vol. 46, no. 1, pp. 305–314.
2. **Azimloo H., Rezazadeh G., Shabani R.** Development of a capacitive angular velocity sensor for the alarm and trip applications, *Measurement*, 2015, vol. 63, pp. 282–286.
3. **Kim M., Moon W.** A new linear encoder-like capacitive displacement sensor, *Measurement*, 2006, vol. 39, no. 6, pp. 481–489.
4. **Nerino R., Cabiati F., Picotto G. B., Sacconi A.** A surface profile reconstruction method based on multisensor capacitive transducers, *Measurement*, 1994, vol. 13, no. 1, pp. 77–84.
5. **Malinovskij V. N.** *Cifrovye izmeritel'nye mosty* (Digital measuring bridges), Moscow, Jenergija, 1976 (in Russian).
6. **Kuznetsov E. N., Kuznetsov N. E., Tsylin B. V.** A two-channel transducer for capacitive sensors, *Measurement Techniques*, 2008, vol. 51, no. 5, pp. 513–515.
7. **Arbuzov V. P.** Time division of the channels of the measuring circuits of capacitive and inductive sensors, *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50, no. 7, pp. 752–757.
8. **Ivanov V. I., Titov V. S., Petrov A. S.** Converters of the parameters of multi-component two-terminal networks with a DC short

circuit and a break in the circuit between poles, *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 3, pp. 340–346.

9. **Melent'ev V. S.** *Novoe v izmerenijah parametrov emkostnyh datchikov po mgnovennym znachenijam perehodnyh processov* (New in the measurements of capacitive sensors on instant values of transient processes), *Datchiki i Sistemy*, 2010, no. 2, pp. 26–29 (in Russian).

10. **Melent'ev V. S.** Methods for increasing the accuracy of measurements of the parameters of capacitive transducers, *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 7, pp. 800–804.

11. **Melent'ev V. S., Batishhev V. I., Smolina A. M., Evstifeeva T. S.** *Povyshenie tochnosti izmerenija parametrov emkostnyh datchikov peremeshhenija* (Improving the accuracy of measurement of parameters of the capacitive displacement sensors), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 6, pp. 36–38 (in Russian).

12. **Melent'ev V. S., Batishhev V. I., Evstifeeva T. S., Levina K. D.** *Issledovanie metoda i sredstva izmerenija parametrov emkostnyh datchikov peremeshhenija* (A study of methods and means of measurement of capacitive displacement sensors), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 9, pp. 45–49 (in Russian).

13. **Melent'ev V. S., Smolina A. M., Evstifeeva T. S.** *Sovershenstvovanie metoda izmerenija parametrov emkostnyh datchikov* (Improvement of the method of measurement of parameters of capacitor sensors), *Problemy avtomatizacii i upravlenija v tehniceskikh sistemah: sb. statej Mezhdunar. nauch.-tehn. konf.*, Penza, 2013, pp. 238–240 (in Russian).

14. **Melent'ev V. S., Gubanov N. G., Latukhova O. A., Smolina A. M.** Improvement of methods of measuring the parameters of two-terminal electric circuits, *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 691–694.

15. **Melent'ev V. S., Latuhova O. A., Evstifeeva T. S.** *Metod razdel'nogo opredelenija parametrov emkostnyh datchikov po mgnovennym znachenijam perehodnyh processov*, *Polzunovskij Vestnik*, 2013, no. 2, pp. 106–108 (in Russian).

УДК 681.5.01

DOI: 10.17587/mau.18.395-406

A. В. Моржов, канд. техн. наук, доц., morzhov@mail.ru,

С. В. Моржова, специалист, svetlana-morzhova@mail.ru,

Тулский государственный университет

Синтез релейного гидропривода при задании ограничений на параметрическую чувствительность его характеристик*

Рассматривается синтез релейного автоколебательного объемного силового гидропривода при задании ограничений на параметрическую чувствительность его характеристик к изменению скорости вращения приводящего двигателя гидронасоса. Используется нелинейная математическая модель привода. Синтез сводится к решению задачи конечномерной оптимизации по точности режима слежения.

Ключевые слова: объемный гидропривод, релейная система, кусочно-линейный объект управления, чувствительность, автоколебания, режим слежения, синтез

Введение

Релейные автоматические системы широко используются в различных областях техники. К основным достоинствам таких систем относятся про-

стога конструкции, надежность и низкая стоимость. Они находят применение как в системах управления промышленного назначения, так и в системах управления подвижными объектами.

Действительные значения параметров объекта управления релейной автоколебательной системы (как и вообще любой системы автоматического уп-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-00662).