

26. Mihalcea R., Corley C. and Strapparava C. Corpus-based and knowledge-based measures of text semantic similarity, *21st National Conference on Artificial Intelligence*, 2006, pp. 775-780.
27. Turney Peter D. Mining the web for synonyms: Pmi-ir versus lsa on toefl, *12th European Conference on Machine Learning*, 2001, pp. 491-502.
28. Landauer Thomas K., Foltz Peter W. and Laham Darrell. An Introduction to Latent Semantic Analysis. Discourse Processes. Springer-Verlag, 1998, pp. 259-284.
29. Francesc Ll. C. Algoritmos de similitud entre cadenas de texto (php). 2015. Available at: francescllorens.eu/00tokenizer/dst.php.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Финаев.

Бермудес Сото Хосе Грегорио – Южный федеральный университет; e-mail: jbermudesoto@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1; тел.: +79885792533; аспирант.

Bermudez Soto José Gregorio – Southern Federal University; e-mail: jbermudesoto@gmail.com; 1, Engel'sa street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79885792533; postgraduate student.

УДК 621.315:621.317.7:621.391

DOI 10.23683/2311-3103-2017-3-29-42

С.А. Кузин, П.А. Львов, А.А. Львов, М.С. Светлов

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Работа посвящена разработке новых емкостных датчиков абсолютного и избыточного давления, используемых для нужд авиационной и космической техники и удовлетворяющих требованиям программы импортозамещения. Предложена методика повышения точности измерения современных цифровых интеллектуальных емкостных датчиков давления, которая основана на использовании нового формирователя сигналов датчиков, когда чувствительный элемент и опорная емкости включаются в петлю переменного тока, и обработке выходных оцифрованных сигналов по методу максимального правдоподобия. В отличие от известного способа построения формирователя резистивных датчиков на основе петли постоянного тока предложено использовать генератор переменного тока в качестве источника опорного сигнала. Рассмотрена математическая модель системы: чувствительный элемент–формирователь сигнала, показано, как за счет ее усложнения можно снизить требования к используемому источнику переменного тока и операционным усилителям. Задача оценивания неизвестных параметров полученной математической модели сведена к решению линейной системы уравнений с билинейным ограничением на вновь введенные неизвестные параметры, приведены выражения для оценок параметров математической модели датчика, получаемых в результате применения итеративной процедуры. Эти оценки обладают всеми оптимальными свойствами оценок максимального правдоподобия. Обсуждаются достоинства предлагаемой методики, среди которых можно выделить высокие точность измерения и чувствительность датчика, а также более простую конструкцию формирователя сигналов и относительно невысокую себестоимость датчика. Проведен сравнительный анализ достигаемой точности измерения предлагаемой методики и двух классических известных методов измерения с помощью имитационного моделирования. Показано, что точность нового датчика примерно на порядок превосходит точность существующих аналогов, производимых в настоящее время.

Интеллектуальный цифровой датчик; емкостной датчик давления; петля переменного тока; формирователь сигналов; оптимальное оценивание; метод максимального правдоподобия.

S.A. Kuzin, P.A. L'vov, A.A. L'vov, M.S. Svetlov

ACCURACY IMPROVEMENT IN THE CAPACITANCE PRESSURE SENSORS FOR AEROSPACE ENGINEERING

The paper describes new capacitance sensors of absolute and excess pressure used in aeronautical and space engineering and satisfying the requirements of the import substitution program. The method of measurement accuracy improvement of modern digital smart capacitance pressure sensors based on the use of the new signal conditioner when the measuring transducer and reference capacitance are included in the alternative current loop circuit and digital sampled signal processing by the maximum likelihood approach. Unlike the conventional technique of signal conditioner construction for resistor sensors, which uses the constant current loop circuit, it is proposed to apply the alternative current oscillator as the reference signal source. The mathematical model of the system consisting of sensitive transducer and signal conditioner is considered. It is shown how one can avoid meeting the rigid requirements to the current source as well as used operational amplifiers due to model meshing. The estimation problem of unknown parameters of the mathematical model obtained is reduced by variable substitution to the solution of linear equation set with bilinear contingencies on the new variables. The expressions for sensor mathematical model unknown parameters estimators based on the iteration procedure are given. The obtained estimates have all optimal features of maximum likelihood estimators. The paper discusses the advantages of the proposed method, among which are the high measurement accuracy and sensitivity of the sensor, as well as a simpler design of signal conditioner and a relatively low cost of the whole sensor. The comparative analysis of the achievable measuring accuracy of the suggested method and two known classic methods using the computer simulation is presented. It is shown that the accuracy of the new sensor by approximately one order exceeds the accuracy of existing analogues currently produced.

Digital smart sensor; capacitance pressure sensor; alternative current loop circuit; signal conditioner; optimal estimation; maximum likelihood method.

Введение. Современная концепция развития авиационной техники требует приоритетного решения проблем повышения эффективности автоматизированных цифровых систем управления, реализации качественного мониторинга состояния авиационных систем и агрегатов. Это существенно зависит от точности и надежности источников первичной информации, в том числе датчиков давления составляющих до 80% всех датчиков, входящих в комплектацию авиационных объектов, обладающих неизменностью метрологических характеристик в течение всего срока их службы, имеющих высокую устойчивость к внешним воздействиям. Глубокая интеграция бортового электронного оборудования и бортовых вычислительных средств, необходимость повышения ресурса авиационной техники, снижения эксплуатационных затрат требует использования датчиков давления с цифровым выходом.

Согласно оценкам, ежегодный прирост продаж датчиков давления составляет в среднем 18 % в год. Исходя из программы развития гражданской авиации, прогнозов закупок авиационной техники к 2020 г. общая потребность авиационной промышленности в датчиках давления по основным сегментам составит около 80 тыс. шт.

Создание промышленной технологии производства на базе металлопластиковых модулей давления унифицированных рядов емкостных датчиков абсолютного и избыточного давления с повышенной долговременной стабильностью и точностью в широком диапазоне рабочих температур, является актуальной задачей для построения различных систем перспективных объектов авиационной техники, в том числе для систем регулирования и диагностики перспективных двигателей пятого поколения, разрабатываемых российскими производителями,

В настоящее время в качестве формирователей сигналов датчиков давления, как правило, используются мостовые схемы [1], которые в силу таких существенных недостатков, как временной дрейф выходного сигнала и температурная погрешность, не обладают достаточной точностью, а их высокоточные версии представляют собой чрезвычайно дорогостоящие и громоздкие устройства. Данная проблема анализировалась в работах отечественных [2–4] и зарубежных [5–7] исследователей.

Около двадцати лет назад К.Ф. Андерсоном (K.F. Anderson) была предложена оригинальная схема формирователя сигнала резистивных датчиков, основанная на использовании петли постоянного тока [8]. Идея получила дальнейшее развитие в работах [9–10]. В частности, авторами предложена эффективная методика повышения точности пьезорезистивных датчиков давления [11], основанная на использовании преобразователя «токовая петля» на переменном токе.

В настоящей работе рассматривается использование вторичного преобразователя измерительной информации на основе петли переменного тока для емкостных датчиков давления. Исследуются возможности повышения эффективности функционирования датчиков с одновременным повышением точности измерения и снижением стоимости системы из первичных и вторичных преобразователей в целом.

Целью работы является: повышение точности измерений параметрических емкостных датчиков давления за счет усовершенствования вторичного преобразователя информации, основанного на петле переменного тока, а также компенсация погрешностей измерения с помощью цифровых алгоритмов обработки сигналов с выходов токовой петли.

1. Постановка задачи. Для предотвращения отказов двигателей и систем управления, повышения качества управления путем регулирования параметров, наиболее полно характеризующих процесс, но не поддающихся прямому измерению, в подобных системах все шире стали использоваться интеллектуальные датчики давления [12, 13]. Эти датчики должны иметь погрешность не более 0,25 % от верхнего предела измерения, надежность не менее 300000 часов наработки на отказ в условиях возможного изменения окружающей температуры от –60 до +150 °С, с долговечность более 40000 часов и календарным сроком эксплуатации более 30 лет.

Всем перечисленным требованиям полностью удовлетворяют малогабаритные емкостные датчики давления нового поколения, изготовленные на основе уникальной технологии металлостеклянных спаев. Эти датчики, разработанные в ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева (г. Энгельс, Саратовская обл.), в 1,5–2 раза дешевле зарубежных аналогов, в тоже время, по метрологическим показателям они несколько не уступают и зачастую превосходят их. Кроме того, датчики выдерживают большие вибрационные нагрузки (амплитуда линейного ускорения до 20g включительно), не требуя установки дополнительных амортизационных приспособлений.

Емкостные датчики давления представляют собой конденсаторы относительно малой емкости, конструктивно выполняемые в форме, наиболее приемлемой для осуществления измерений заданной неэлектрической величины.

Для обработки выходных сигналов первичных преобразователей применяются в основном мостовые схемы различного типа, и лишь в редких случаях изменение емкости преобразователя трансформировалась в эквивалентное изменение частоты.

Ставится задача разработать емкостной датчик давления с вторичным преобразователем типа петля переменного тока. Кроме того, требуется создать методику и алгоритмы обработки выходных сигналов преобразователя, основанные на методе максимального правдоподобия (ММП) и позволяющие измерять с повышенной точностью величину емкости и угла потерь датчика давления.

2. Методика исследования

2.1. Описание традиционной конструкции емкостного датчика давления.

Конструктивно датчик выполнен в виде моноблока, состоящего из преобразователя давления и электронного устройства. Основными составляющими преобразователя давления являются: чувствительный элемент (ЧЭ), рабочая емкость, штуцер и гермовывод. Функциональная схема датчика давления представлена на рис. 1 [14, 15].

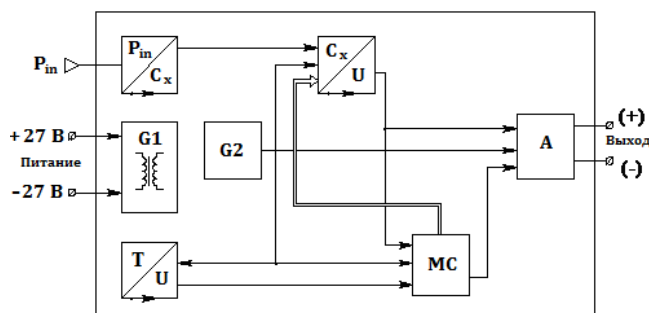


Рис. 1. Функциональная схема емкостного датчика давления:

P_{in}/C_x – преобразователь «входное давление–емкость»; C_x/U – параметрический преобразователь «емкость–напряжение»; T/U – датчик температуры;

$G1$ – вторичный источник питания с трансформаторной развязкой;

$G2$ – источник опорного напряжения; MC – микроконтроллер; A – усилитель

Принцип действия емкостного преобразователя давления (P/C) основан на использовании функциональной зависимости электрической емкости конденсатора от зазора между электродами d : $C_x = C(d)$. Измеряемое давление P_{in} , поступающее в емкостный преобразователь давления (P_{in}/C_x), вызывает изменение его рабочей емкости C_x , оставляя неизменной опорную емкость C_0 . С датчиком давления конструктивно совмещен датчик температуры (T/U), преобразующий температуру корпуса емкостного датчика давления в аналоговый сигнал в виде напряжения постоянного тока. Принцип действия датчика температуры (T/U) основан на использовании функциональной зависимости прямого падения напряжения на диоде от температуры окружающей среды $U_{out} = U(T)$.

Вторичный источник питания служит для преобразования напряжения 27 В постоянного тока в гальванически развязанное напряжение питания датчика. Источник опорного напряжения ($G2$) предназначен для формирования стабильного напряжения, необходимого для питания всех функциональных узлов датчика.

Параметрический преобразователь «емкость–напряжение» (C_x/U) преобразует отношение опорной и рабочей емкостей преобразователя давления (P_{in}/C_x) в напряжение постоянного тока U_{out} . Формула преобразования имеет следующий вид $U_{out} = U_{ref} \cdot C_0/C_x$, где U_{ref} – опорное напряжение.

Алгоритм работы параметрического преобразователя (C_x/U) задается периодическим сигналом, сформированным микроконтроллером (MC). Аналоговые сигналы с датчиков давления и температуры преобразуются с помощью встроенного АЦП микроконтроллера в цифровое значение выходного абсолютного давления. Полученное значение корректируется с учетом таблицы поправок, затем преобра-

зуется двенадцатиразрядным АЦП в аналоговый сигнал в виде напряжения постоянного тока. Это напряжение через неинвертирующий усилитель А поступает на выход прибора.

Выходной сигнал датчика – напряжение постоянного тока от 0,50 до 6,25 В, линейно изменяющееся при изменении давления от нижнего предела измерения датчика до верхнего.

Величина измеряемого давления P_{in} , кгс/см², определяется (с учетом погрешности измерения датчика) по формуле

$$P_m = \frac{P_{nom} \cdot (U_{out} - U_0)}{U_{nom} - U_0},$$

где P_{nom} – номинальное давление (верхний предел измерения давления), кгс/см²; U_{out} – выходной сигнал датчика при измеряемом давлении в В; $U_0 = 0,5$ В – выходной сигнал датчика при давлении равном 0 кгс/см²; $U_{nom} = 6,25$ В выходной сигнал датчика при давлении P_{nom} .

Истинное значение выходного сигнала при атмосферном давлении U_a (В), определяется по формуле: $U_a = (U_{nom} - U_0) \cdot P_a / P_{nom} + U_0$. Атмосферное давление P_a , в кгс/см², вычисляют по формуле $P_a = P_d / 735,56$; где: P_d – атмосферное давление в мм рт.ст.; 735,56 – техническая атмосфера в мм рт.ст., приведенная к местному ускорению свободного падения при температуре 0° С.

С целью упрощения конструкции вторичного преобразователя, снижения его стоимости с одновременным повышением чувствительности и точности датчика, обеспечения линейности выходной характеристики предлагается следующая методика измерения давления.

2.2. Методика уточнения измерения емкостей и углов потерь емкостных параметрических датчиков давления. Авторами предложено использовать новую структурную схему формирователя сигнала, аналогичную описанной в [10], которая показана на рис. 2, где измерительный емкостной датчик, включен последовательно в петлю с опорной емкостью C_0 . Сам измерительный датчик представляет собой преобразователь измеряемое давление–емкость, а опорная емкость расположена рядом с измерительной, причем при отсутствии внешнего давления эти две емкости примерно одинаковые. На опорную действуют все факторы внешней среды, что и на измерительную, кроме измеряемого давления. Это позволяет отстроиться от паразитных внешних воздействий (температуры, влажности и т.д.). Петля питается генератором переменного тока постоянной амплитуды.

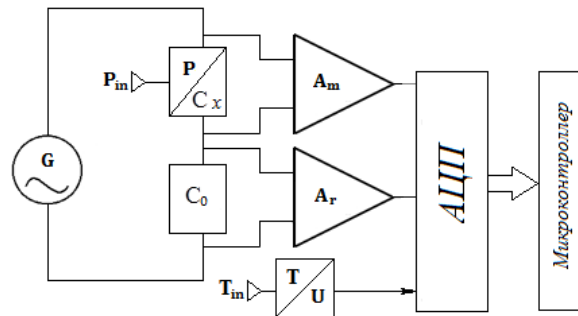


Рис. 2. Структурная схема формирователя сигнала емкостного датчика абсолютного давления: P_{in} – измеряемое давление; T_{in} – температура окружающей среды; P/C_x – преобразователь давление–емкость; C_0 – опорная емкость; A_m , A_r – операционные усилители измерительного и опорного каналов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь с мультиплексором

В предлагаемой схеме сигналы на выходе операционных усилителей не зависят от соединительных проводов, а только от импедансов включенных в петлю элементов [8, 9]. Поэтому задача обработки оцифрованных сигналов с выходов датчиков заключается в оценке величины емкостей C_x и C_0 , которые могут изменяться под воздействием внешних факторов окружающей среды, при этом значение измерительной емкости зависит от приложенного к ней исследуемого давления.

Оценки параметров сигналов на выходе измерительного и опорного каналов токовой петли можно получить из решения системы уравнений, задающих математическую модель рассматриваемого процесса измерения. При возбуждении контура токовой петли генератором переменного тока синусоидальной формы сигналы с обеих емкостей в измерительном (m) и опорном (r) каналах могут быть представлены в следующей форме [14]:

$$u_{pi} = u_p(t_i) = A_p \sin(2\pi f t_{ip} + \varphi_p) + B_p + \xi_{pi}; \quad p = m, r; \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где A и φ – неизвестные амплитуда и фаза исследуемого сигнала; f – частота, задаваемая возбуждающим контур генератором; B – систематическая составляющая сигнала; ξ_i – погрешности измерений, обусловленные шумами электронных компонентов и помехами, действующими на датчик и измерительное устройство; t_{ip} – моменты времени дискретизации отсчетов; N – количество измерений, снимаемых с выхода соответствующего операционного усилителя при проведении одного измерения емкости.

Решив систему (1) относительно неизвестных A и φ , можно получить выражение для комплексного импеданса датчика:

$$Z = R + jX_C = A \cos \varphi + jA \sin \varphi, \quad (2)$$

где реактивная составляющая импеданса $X_C = 1/2\pi f C_x$. При этом емкость измерительного датчика связана измеряемым давлением некоторым соотношением

$$C_x = Q(P, T), \quad (3)$$

где нелинейная функция Q (зависящая от измеряемого давления P и температуры окружающей среды T) определяются при калибровке датчика, предшествующей его эксплуатации [16]. Тогда функция преобразования датчика давления примет вид:

$$P_x = Q^{-1}(C_x) \Big|_{T=T_{in}} = Q^{-1} \left(\frac{1}{2\pi f A \sin \varphi} \right) \Big|_{T=T_{in}}. \quad (4)$$

Из выражений (2)–(4) следует, что для точного измерения давления необходимо с максимальной точностью оценить параметры f , A и φ из системы (1).

Постоянное смещение B возникает после прохождения сигнала через операционный усилитель потому, что необходимо сделать сигнал положительным для последующей его оцифровки в АЦП. Если использовать в схеме прецизионные операционные усилители и генератор тока, то можно считать параметры B и f точно известными. Но такое допущение сделает схему достаточно дорогой в изготовлении. Поэтому предлагается использовать недорогие отечественные операционные усилители и генератор тока, стабильность которых во времени не может быть гарантирована. Но тогда в модели (1) данные параметры нельзя считать точно известными.

Тем не менее, будем полагать, что неизвестные смещение B и частота f могут считаться постоянными в течение одного цикла из N измерений. Кроме этого, предполагается, что флуктуации частоты ν генератора малы по сравнению с некоторой центральной частотой f_0 , которая считается точно известной: $f = f_0 + \nu$, при этом $|\nu| \ll f_0$.

Относительно погрешностей измерений ξ_i предполагается, что они нормально распределены с нулевым математическим ожиданием и неизвестной дисперсией σ^2 .

Неизвестными в системе (1) будут все параметры $A_m, \varphi_m, B_m, A_r, \varphi_r, B_r$ и ν . Поэтому она должна быть решена относительно этих 7 неизвестных параметров. Подобная нелинейная семи параметрическая задача рассматривалась в [17], где был предложен итеративный алгоритм ее решения методом наименьших квадратов (МНК). Но этот алгоритм не учитывает того факта, что нулевое приближение частоты измерений хорошо известно. Поэтому авторы предлагают решение системы (1) методом максимального правдоподобия (ММП). При выполнении условия малости флуктуации частоты ν можно воспользоваться известными из тригонометрии соотношениями для малых углов γ , близких к нулю, $\sin\gamma \approx \gamma$, $\cos\gamma \approx 1$ и представить систему в виде:

$$\begin{aligned} u_{ip} \approx & A_p \cos \varphi_p \sin \psi_{ip} + \nu A_p \cos \varphi_p 2\pi t_{ip} \cos \psi_{ip} + \\ & + A_p \sin \varphi_p \cos \psi_{ip} - \nu A_p \sin \varphi_p 2\pi t_{ip} \sin \psi_{ip} + B_p + \xi_{ip}, \\ & i = \overline{1, N}; p = m, r; \end{aligned} \quad (5)$$

где $\psi_{ip} = 2\pi f_0 t_{ip}$ – нижний индекс p соответствует измерительному или опорному каналам. При этом предполагается, что $t_{im} \neq t_{ir}$, т.е. моменты измерения сигналов в каналах не совпадают.

После замены переменных

$$\begin{cases} q_{1p} = A_p \cos \varphi_p, \\ q_{2p} = A_p \nu \cos \varphi_p, \\ q_{3p} = A_p \sin \varphi_p, \\ q_{4p} = A_p \nu \sin \varphi_p, \\ q_{5p} = B_p, \end{cases} \text{ и } \begin{cases} x_{1ip} = \sin \psi_{ip}, \\ x_{2ip} = 2\pi t_{ip} \cos \psi_{ip}, \\ x_{3ip} = \cos \psi_{ip}, \\ x_{4ip} = -2\pi t_{ip} \sin \psi_{ip}, \\ x_{5ip} = 1; \end{cases} \quad i = \overline{1, N} \quad (6)$$

система (5) становится линейной относительно новых переменных $q_{1m} \dots q_{5m}, q_{1r} \dots q_{5r}$:

$$u_{ip} = \sum_{j=1}^5 q_{jp} x_{jip} + \xi_{ip}, \quad p = m, r; \quad i = \overline{1, N}. \quad (7)$$

Как следует из (7), общее число неизвестных q_{jp} равно 10. Следовательно, должны существовать 3 билинейных уравнений связи для этих переменных, которые легко находятся из (6)

$$q_{1p} q_{4p} = q_{2p} q_{3p}; \quad \nu = q_{2m}/q_{1m} = q_{2r}/q_{1r}; \quad p = m, r. \quad (8)$$

На самом деле можно найти много уравнений связи для переменных q_{jp} , но только 3 из них будут независимыми. В работе выбраны соотношения (8).

В такой постановке задача (6)–(8) совпадает с задачей оценивания параметров модели, описанной в [11]. Она решается по ММП с помощью разложения билинейных ограничений в окрестности точного решения в ряд Тейлора вплоть до линейных членов и использования следующей итерационной процедуры [19]:

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k - \frac{\mathbf{q}_k^T \mathbf{G} \mathbf{q}_k}{2\mathbf{q}_k^T \mathbf{G} (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{G} \mathbf{q}_k} (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{q}_k, \quad (9)$$

где k – номер итерации, а блочные матрицы \mathbf{X} и \mathbf{G} задаются выражениями:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} W_m & 0 \\ 0 & W_r \end{pmatrix}; \quad \mathbf{W}_p = \begin{pmatrix} x_{11p} & x_{21p} & x_{31p} & x_{41p} & x_{51p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{1Np} & x_{2Np} & x_{3Np} & x_{4Np} & x_{5Np} \end{pmatrix}; \quad p=m,r;$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} H & G_{mr} \\ G_{rm} & H \end{pmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{G}_{rm} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots \\ 1 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}; \quad \mathbf{G}_{mr} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}.$$

Все матрицы \mathbf{G}_{ln} имеют одинаковый размер (5×5) и содержат только по два ненулевых элемента, а все остальные элементы равны нулю. Нулевое приближение находится по МНК [20]:

$$\mathbf{q}_0 = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{U}). \quad (10)$$

После нахождения оценок промежуточных переменных q_{jp} из (6) не сложно получить искомые оценки частоты $f = f_0 + v$, амплитуды A и фазы φ , которые необходимо подставить в (4) и получить искомое значение давления.

$$\hat{v} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} \hat{q}_{2m} + \hat{q}_{4m} + \hat{q}_{2r} + \hat{q}_{4r} \\ \hat{q}_{1m} \quad \hat{q}_{3m} \quad \hat{q}_{1r} \quad \hat{q}_{3r} \end{pmatrix}; \quad \hat{A}_p = \sqrt{\hat{q}_{1p}^2 + \hat{q}_{3p}^2}; \quad p=m,r;$$

$$\hat{\varphi}_p = \begin{cases} \varpi, & \hat{q}_{1p} \geq 0, \hat{q}_{3p} \geq 0; \\ \varpi + \pi, & \hat{q}_{1p} < 0; \\ \varpi + 2\pi, & \hat{q}_{1p} > 0, \hat{q}_{3p} < 0, \end{cases} \quad , \quad \varpi = \arctg(\hat{q}_{3p} / \hat{q}_{1p}); \quad 0 \leq \hat{\varphi}_p \leq 2\pi$$

Использование показаний с опорного датчика позволяет существенно снизить паразитное влияние факторов окружающей среды на точность измерения.

2.3 Результаты математического моделирования работы емкостного датчика абсолютного давления. Сравнительный анализ точности предлагаемого метода оценивания параметров сигналов на выходах измерительного и опорного емкостных ЧЭ был проведен с помощью статистического имитационного моделирования. Для этого был разработан специальный комплекс алгоритмического и программного обеспечения в среде Visual Studio 10.

В процессе моделирования сравнивались точности измерения абсолютного давления тремя методами: 1) традиционным, описанным в работе [14]; 2) предложенным Ханделем на основе стандарта IEEE-STD 1057 [18] и 3) предлагаемым авторами этой работы.

Во всех экспериментах сравнивалась точность оценивания, которая характеризовалась дисперсией погрешности, рассчитываемой по 10000 экспериментам

$$\sigma_{est}^2 = \frac{1}{20000} \sum_{i=1}^{10000} \left[(P_m^* - \hat{P}_{im})^2 + (P_r^* - \hat{P}_{ir})^2 \right],$$

в зависимости от отношения сигнал/шум (SNR), задаваемого на входе АЦП как A^2/σ^2 , и измеряемого давления; P^* – истинное значение измеряемого давления.

Характерные результаты моделирования показаны на рис. 3 и 4.

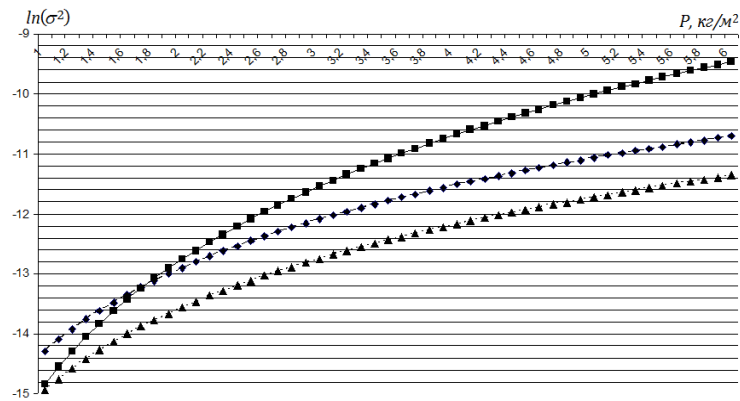


Рис. 3. Зависимости дисперсии погрешности оценивания давления от измеряемого давления

На рис. 3 даны зависимости натурального логарифма дисперсии погрешности измерения давления от самого измеряемого давления. При этом отношение сигнал/шум равно 60 дБ. На рис. 4 – модельные зависимости десятичного логарифма дисперсии погрешности оценивания давления, примерно равного 2,5 кгс/см², от отношения сигнал/шум на выходе операционного усилителя.

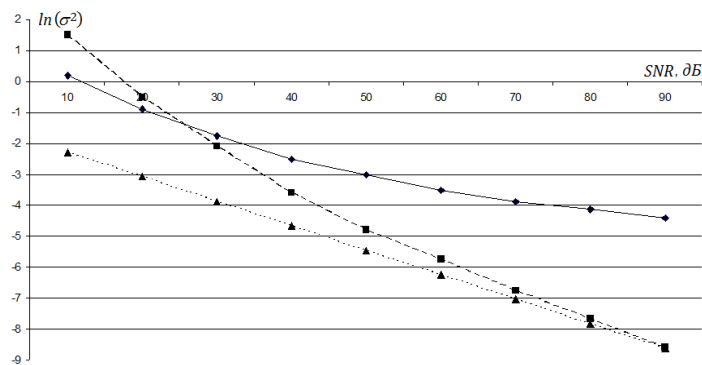


Рис. 4. Зависимости дисперсии погрешности оценивания давления от отношения сигнал/шум

На рисунках сплошные кривые (экспериментальные точки показаны квадратами) соответствуют оцениванию по методике из [14], пунктирные кривые (экспериментальные точки – ромбы) – по методике Ханделя из [18], а точечные линии (экспериментальные точки – треугольники) – по методике, предлагаемой авторами.

Из рисунков видно, что при больших измеряемых давлениях предлагаемый метод измерения дает существенно лучшие результаты, чем методы, описанные в работах [14] и [18]. При больших отношениях SNR точности предлагаемой методики и метода Ханделя сравнимы между собой, но при малых и средних отношениях SNR авторская методика дает лучшие результаты, кроме того, скорость сходимости предложенного алгоритма в 3–4 раза выше скорости сходимости метода из [18]. При этом предлагаемое устройство гораздо точнее традиционного известного метода, хотя несколько уступает ему по скорости измерений.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что предлагаемый вариант датчика абсолютного давления, основанный на использовании формирователя сигнала в виде петли переменного тока с последующей цифровой обработкой сигналов с выходов измерительного и опорного датчиков по ММП, имеет хорошие перспективы применения его в авиационной технике нового поколения.

Кроме того, в работе было проведено имитационное моделирование процесса нахождения оценок погрешности знания частоты питающего тока ν двумя способами: с помощью алгоритма IEEE Std. 1057 [18] и предлагаемым способом (6)–(10) по ММП. Точность оценивания характеризовалась дисперсией погрешности, которая рассчитывалась по 10000 экспериментам $\sigma_{\lambda}^2 = \sum_m (\hat{\nu}_m - \nu^*)^2 / 10000$, где

ν^* – истинное значение отклонения), в зависимости от отношения сигнал/шум, задаваемого как A^2/σ^2 . На рис. 5 показаны зависимости дисперсии погрешностей оценивания от отношения сигнал/шум, выбираемого из ряда 20, 40, 50, 60, 80 (дБ). Видно, что предлагаемый алгоритм дает значительный выигрыш в точности, что хорошо согласуется с теоретическими положениями, о которых упоминалось выше. При этом алгоритм ММП сходился к решению после двух итераций, а IEEE Std. 1057 требовал не менее 5–6 итераций.

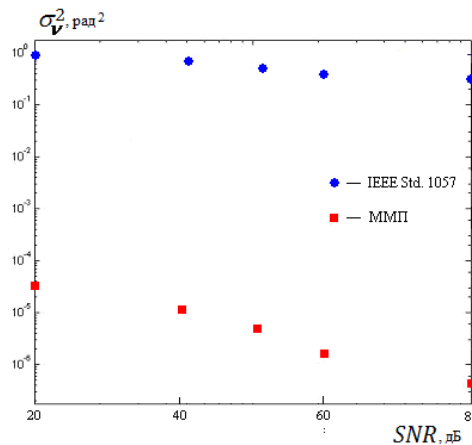


Рис. 5. Зависимости дисперсии погрешности оценивания погрешности знания частоты тока от отношения сигнал/шум

3. Обсуждение полученных результатов. Предлагаемая работа может служить методологической основой для разработки современных цифровых емкостных датчиков давления, применяемых в системах управления и диагностики авиационной техники.

Описанный метод получения оптимальных оценок неизвестных параметров обладает всеми свойствами оценок максимального правдоподобия. Как доказано в [19], сходимость предлагаемого алгоритма очень быстрая (требуется не более четырех шагов). Оценки параметров A , φ и ν из (9), (10) и (6), в отличие от оценок параметров q_{jp} , будут смещенными, поскольку получаются в результате нелинейных преобразований над промежуточными переменными q , но средний квадрат ошибки оценивания получается меньшим, чем без учета ограничения (8). Таким образом, чисто теоретически предлагаемый метод обладает более высокой точностью, чем методы, описанные в [14, 18], при более быстрой сходимости итерационного процесса (9), (10) к решению.

Среди достоинств предлагаемого формирователя сигналов с выходов цифровых емкостных датчиков давления, основанного на петле переменного тока, следует отметить следующие: универсальность формирователя (можно использовать для емкостных, индуктивных и чисто резистивных ЧЭ), высокая точность измерения, высокая чувствительность преобразователя (примерно в 2 раза более высокая, чем у мостовых формирователей [8]). Использование современных микропроцессоров для обработки выходных оцифрованных сигналов и методики градуировки датчиков, описанной в [16], позволяет создавать датчики давления, работающие в диапазоне температур от -60 до $+150$ °С.

Разработанные универсальный вторичный преобразователь параметрических датчиков, основанный на петле переменного тока, и оптимальные цифровые методы обработки измерительной информации с его выходов более, чем на порядок, повышают точность проводимых измерений по сравнению с датчиками, использующими традиционные мостовые формирователи сигнала. Внедрение предлагаемой методики обработки сигналов с выходов формирователя типа «токовая петля» емкостных датчиков давления позволяют улучшить тактико-технические характеристики, как самих датчиков, так и систем, в которых они применяются.

Разработанные вторичный преобразователь сигналов параметрических датчиков давления и принципы построения цифровых формирователей сигнала на его основе, совместно с оптимальными алгоритмами обработки измерительной информации, обеспечивающие повышение точности измерения давления, реализуются в рамках разработки высокоточных датчиков абсолютного и избыточного давлений для диагностики и управления системами перспективных авиационных комплексов (ОАО ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева, г. Энгельс).

Заключение

1. В работе предложен вторичный преобразователь выходного сигнала емкостного чувствительного элемента измерителя абсолютного давления, основанный на петле, питаемой переменным током синусоидальной формы. Применение преобразователя позволяет существенно упростить электронный блок емкостного датчика давления, повысить чувствительность и линейность измерителя.

2. Разработаны оптимальные методы и алгоритмы обработки выходных сигналов датчика давления, основанные на решении получающихся нелинейных систем уравнений по ММП, что позволило повысить точность оценивания неизвестных параметров.

3. С помощью имитационного моделирования показано, что предлагаемый емкостной датчик абсолютного давления обладает большей точностью по сравнению со своими аналогами, в которых реализованы традиционные методы обработки измерительных сигналов. При этом точность оценивания более чем на порядок превышает точность прямого измерения выходного напряжения токовой петли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аш Ж. с соавторами.* Датчики измерительных систем: пер. с франц.: В 2 т. – М.: Мир, 1992. – Т. 1. – 480 с. – Т. 2. – 424 с.
2. *Кнеллер В.Ю.* Преобразование физических величин: специфика, связи с другими процессами, пути решения основных задач // Датчики и системы. – 2007. – № 12. – С. 58-67.
3. *Виноградов М.А.* Программируемые формирователи сигналов мостовых датчиков // Компоненты и технологии. – 2008. – № 4. – С. 44-50.
4. *Тростников Д.А., Жук В.И.* Датчики давления: принципы работы и опыт эксплуатации // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 7-8. – С. 67-69.
5. *Preethichandra D.M., Shida K.* A Simple Interface Circuit to Measure Very Small Capacitance Changes in Capacitive Sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2001. – Vol. 50, No. 6. – P. 1583-1586.

6. Peng K.H., Uang C.M. The Temperature Compensation of the Silicon Piezo-Resistive Pressure Sensor Using the Half-Bridge Technique // Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS III, Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5343. – P. 292-301.
7. Meijer G.C.M., de Jong P.C. A High-Temperature Electronic System for Pressure-Transducers // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2000. – Vol. 49, No. 2. – P. 365-370.
8. Anderson K.F. The New Current Loop: An Instrumentation and Measurement Circuit Topology // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1997. – No. 10. – P. 11-19.
9. Львов А.А., Пыльский В.А. Линейная петлевая схема точной обработки сигналов датчиков // Вестник СГТУ. – 2004. – № 2 (3). – С. 102-113.
10. Gureev V.V., L'vov A.A., Pyl'skiy V.A. Improvement of the Current Loop Circuit for AC and DC Applications Based on Digital Signal Processing // Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technologies Conference, Sorrento, Italy, 2006. – P. 1257-1261.
11. L'vov, A. L'vov P., Konovalov R. Improvement of Piezoresistive Pressure Sensor Accuracy by Means of Current Loop Circuit Using Optimal Digital Signal Processing // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2016 ElConRusNW), St. Peterburg, Russia, 2016. – P. 279-282.
12. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. – М.: Радио и связь, 2006. – 230 с.
13. Поляков А.В., Поляков В.Б., Одицков М.А. Перспективные кварцевые пьезорезонансные датчики давления // Компоненты и технологии. – 2011. – № 1. – С. 18-20.
14. Коновалов Р.С., Львов П.А., Львов А.А. Повышение точности высокотемпературных емкостных датчиков абсолютного давления // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015): сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 2. – Саратов: Изд. дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 136-142.
15. Коновалов Р.С., Львов А.А. Высокотемпературные датчики давления // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»: в 2-х т. Т. 2. – 2014. – С. 48-50.
16. Николаенко А.Ю., Львов А.А., Львов П.А. Компенсация температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»: в 2-х т. Т. 2. – 2014. – С. 57-59.
17. Andersson T., Händel P. IEEE Standard 1057, Cramér–Rao Bound and the Parsimony Principle // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2006. – Vol. 55, No. 1. – P. 44-53.
18. Händel P. Properties of the IEEE-STD-1057 Four-Parameter Sine Wave Fit Algorithm // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – 2000. – Vol. 49, No. 6. – P. 1189-1193.
19. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез в условиях априорной неопределенности и адаптация информационных систем. – М.: Сов. радио, 1977. – 242 с.
20. L'vov A.A., L'vov P.A., Konovalov R.S., Kuzin S.A. The Use of Current Loop Circuit as a Signal Conditioner for High Accuracy Digital Piezoresistive Pressure Sensors // Proceedings of the International scientific and technical conference "Dynamics of system, mechanisms and machines" (Dynamics), Omsk State Technical University, Omsk, Russia, 2016. – P. 315-319.

REFERENCES

1. Ash Zh. s soavtorami. Datchiki izmeritel'nykh sistem: per. s frants [Sensors measuring systems: translated from French: translated from French]. In 2 vol. Moscow: Mir, 1992, Vol. 1, 480 p. Vol. 2, 424 p.
2. Kneller V.Yu. Preobrazovanie fizicheskikh velichin: spetsifika, svyazi s drugimi protsessami, puti resheniya osnovnykh zadach [Conversion of physical quantities: specificity, communication with other processes, solutions to major problems], *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems], 2007, No. 12, pp. 58-67.
3. Vinogradov M.A. Programmiruemye formirovateli signalov mostovykh datchikov [Programmable signal conditioning bridge sensor], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2008, No. 4, pp. 44-50.
4. Trostnikov D.A., Zhuk V.I. Datchiki davleniya: printsipy raboty i opyt ekspluatatsii [Pressure sensors: principles of operation and operating experience], *Energetika i TEK* [Power and energy], 2008, No. 7-8, pp. 67-69.

5. *Preethichandra D.M., Shida K.* A Simple Interface Circuit to Measure Very Small Capacitance Changes in Capacitive Sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, Vol. 50, No. 6, pp. 1583-1586.
6. *Peng K.H., Uang C.M.* The Temperature Compensation of the Silicon Piezo-Resistive Pressure Sensor Using the Half-Bridge Technique, *Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS III, Proceedings of SPIE*, 2004, Vol. 5343, pp. 292-301.
7. *Meijer G.C.M., de Jong P.C.* A High-Temperature Electronic System for Pressure-Transducers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, Vol. 49, No. 2, pp. 365-370.
8. *Anderson K.F.* The New Current Loop: An Instrumentation and Measurement Circuit Topology, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997, No. 10, pp. 11-19.
9. *L'vov A.A., Pyl'skiy V.A.* Lineynaya petlevaya skhema tochnoy obrabotki signalov datchikov [Linear loop diagram of the accurate processing of sensor signals,] *Vestnik SGTU [Vestnik Saratov State Technical University]*, 2004, No. 2 (3), pp. 102-113.
10. *Gureev V.V., L'vov A.A., Pyl'skiy V.A.* Improvement of the Current Loop Circuit for AC and DC Applications Based on Digital Signal Processing, *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technologies Conference, Sorrento, Italy, 2006*, pp. 1257-1261.
11. *L'vov, A. L'vov P., Konovalov R.* Improvement of Piezoresistive Pressure Sensor Accuracy by Means of Current Loop Circuit Using Optimal Digital Signal Processing, *Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2016 EIConRusNW), St. Peterburg, Russia, 2016*, pp. 279-282.
12. *Kotyuk A.F.* Datchiki v sovremennykh izmereniyakh [Sensors in modern measurements]. Moscow: Radio i svyaz', 2006, 230 p.
13. *Polyakov A.V., Polyakov V.B., Odintsov M.A.* Perspektivnye kvartsevye p'ezorezonansnye datchiki davleniya [Prospective piezoresonance quartz pressure sensors], *Komponenty i tekhnologii [Components and technologies]*, 2011, No. 1, pp. 18-20.
14. *Konovalov R.S., L'vov P.A., L'vov A.A.* Povyshenie tochnosti vysokotemperaturnykh emkostnykh datchikov absolutnogo davleniya [Improving the accuracy of high-temperature capacitive absolute pressure sensors], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii (UOPI-2015): sb. tr. IV Mezhdunar. nauch. konf. [Problems of management, processing and transmission of information (WOPI-2015): proceedings of the IV International scientific conference]*; in 2 vol. Vol. 2. Saratov: Izd. dom «Rayt-Ekspo», 2015, pp. 136-142.
15. *Konovalov R.S., L'vov A.A.* Vysokotemperaturnye datchiki davleniya [High temperature pressure sensors], *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» [Proceedings of the International Symposium "Reliability and quality"]*; in 2 vol. Vol. 2, 2014, pp. 48-50.
16. *Nikolaenko A.Yu., L'vov A.A., L'vov P.A.* Kompensatsiya temperaturnoy pogreshnosti intellektual'nykh datchikov davleniya [Compensation of temperature error of intelligent pressure sensors], *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» [Proceedings of the International Symposium "Reliability and quality"]*; in 2 vol. Vol. 2, 2014, pp. 57-59.
17. *Andersson T., Händel P.* IEEE Standard 1057, Cramér–Rao Bound and the Parsimony Principle, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, Vol. 55, No. 1, pp. 44-53.
18. *Händel P.* Properties of the IEEE-STD-1057 Four-Parameter Sine Wave Fit Algorithm, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 2000, Vol. 49, No. 6, pp. 1189-1193.
19. *Repin V.G., Tartakovskiy G.P.* Statisticheskii sintez v usloviyakh apriornoy neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh system [Statistical synthesis under conditions of a priori uncertainty and adaptation of information systems]. Moscow: Sov. radio, 1977, 242 p.
20. *L'vov A.A., L'vov P.A., Konovalov R.S., Kuzin S.A.* The Use of Current Loop Circuit as a Signal Conditioner for High Accuracy Digital Piezoresistive Pressure Sensors, *Proceedings of the International scientific and technical conference "Dynamics of system, mechanisms and machines" (Dynamics), Omsk State Technical University, Omsk, Russia, 2016*, pp. 315-319.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Кузин Сергей Александрович – Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина; e-mail: kuzinsa@mail.ru; 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77; тел.: +79658818914; аспирант.

Львов Алексей Арленович – e-mail: alvova@mail.ru; тел.: +79172015675; д.т.н.; профессор.

Львов Петр Алексеевич – Энгельское опытно-конструкторское бюро им. А.И. Глухарева; e-mail: peter.lvov@gmail.com; 413119, Саратовская область, г. Энгельс – 19, квартал 5, 14, а/я 29; тел.: +79173230567; начальник лаборатории перспективных разработок; к.т.н.

Светлов Михаил Семенович – Институт проблем точной механики и управления РАН; e-mail: svetlovms@yandex.ru; 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, 24; тел.: +79878263745; д.т.н.; в.н.с.

Kuzin Sergey Alexandrovich – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: kuzinsa@mail.ru; 77, Polytechnicheskaya street, Saratov, 410054, Russia; phone: +79658818914; postgraduate student.

L'vov Alexey Arlenovich – e-mail: alvova@mail.ru; phone: +79172015675; dr. of eng. sc.; professor.

L'vov Peter Alexeevich – Engels Experimental Design Bureau «Signal» named after A.I. Glukharev; e-mail: peter.lvov@gmail.com; PO Box 29, 14, District 5, Engels – 19, Saratovskaya oblast, 413119; Russia; phone: +79173230567; Laboratory Head of Promising Designs; cand. of eng. sc.

Svetlov Michael Semenovich – Institute of Precision Mechanics and Control of RAS; e-mail: svetlovms@yandex.ru; 24, Rabochay street, Saratov, 410028, Russia; phone: +79878263745; dr. of eng. sc.; leading scientist.

УДК 004.048

DOI 10.23683/2311-3103-2017-3-42-51

Мааког Амин Касим Ммааког**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

Статья посвящена решению задачи формального представления структуры бизнес-процессов с целью разбиения общей схемы на функциональные блоки. Задача обеспечения гибкости информационных систем, наиболее эффективно решается при модульном построении структуры системы. На основе функционального подхода к описанию сложных программных систем необходимо разработать методику представления программного обеспечения информационной системы в виде совокупности (системы) программных модулей, имеющих максимальную степень типизации по составу используемых функций и по структуре их связей. При этом, необходимо прежде всего решить задачу разработки методики формального построения функционально-модульной информационной модели организационной структуры предприятия, учитывающей количественную оценку степени типизации в ее структурной организации. Построение функционально-модульной информационной модели предприятия позволяет отражать не только связи между структурными подразделениями предприятия и их вес, а также оценивать суть происходящих в организации процессов. Цель функционирования информационной системы может быть задана описанием ее поведения, которое отражается характеристиками общего параметрически инвариантного ограничения на переменных модели системы. Если параметрическое множество упорядочено (например, включает время), то состояния переменных могут ограничиваться не только другими состояниями, но и состояниями выбранного соседства для каждого конкретного значения параметра. Соседство на упорядоченном параметрическом множестве определяется маской, определяемой параметрическим множеством, набором переменных и набором функций сдвига. Для решения задачи предлагается использовать модель основанную графах специального типа, которая может быть преобразована к автоматной модели. Оптимизация декомпозиции основана на введении критерия типизации полученных функциональных модулей. Представленная модель производственной системы позволяет выделить наиболее часто повторяющиеся сценарии (функции) в виде столбцов совпадающих клеток маски, поскольку все сценарии упорядочены в едином пространстве состояний общего сценария производственного процесса. Решение поставлен-