

(12) МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗАЯВКА, ОПУБЛИКОВАННАЯ В
СООТВЕТСТВИИ С ДОГОВОРом О ПАТЕНТНОЙ КООПЕРАЦИИ (РСТ)

(19) Всемирная Организация
Интеллектуальной Собственности
Международное бюро

(43) Дата международной публикации
17 февраля 2022 (17.02.2022)



(10) Номер международной публикации
WO 2022/035348 A1

(51) Международная патентная классификация:
G05D 13/00 (2006.01) *G06F 17/00* (2019.01)

(21) Номер международной заявки: РСТ/RU2021/000201

(22) Дата международной подачи:
18 мая 2021 (18.05.2021)

(25) Язык подачи: Русский

(26) Язык публикации: Русский

(30) Данные о приоритете:
2020126946 11 августа 2020 (11.08.2020) RU

(72) Изобретатель; и

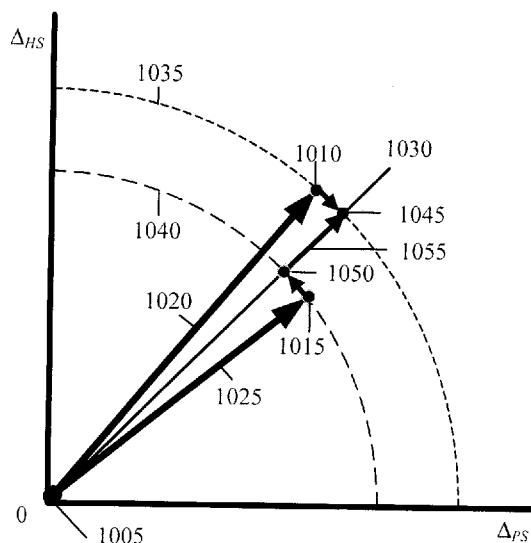
(71) Заявитель: ПОЛОСИН, Виталий Германович
(POLOSIN, Vitaly Germanovich) [RU/RU]; ул. Кубан-
ская 2-я, д. 29 Пенза, 440031, Penza (RU).

(81) Указанные государства (если не указано иначе, для каждого вида национальной охраны): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) Указанные государства (если не указано иначе, для каждого вида региональной охраны): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), евразийский (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), европейский патент (AL, AT, BE, BG, CH, CY,

(54) Title: METHOD AND DEVICES FOR MONITORING THE UNCERTAINTY OF A STOCHASTIC SYSTEM

(54) Название изобретения: СПОСОБ И УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ



Фиг. 10

(57) Abstract: The invention relates to methods for organizing monitoring of a stochastic system and can be used in monitoring systems in power engineering, medicine and metallurgy and in the food industry, the chemical industry and other branches of industry. The technical result consists in optimizing a search for parameters of a symmetrical model of the uncertainty of a stochastic system provided that an estimate of the centre of a density function is obtained. The result is achieved by virtue of the fact that, when organizing monitoring of the uncertainty of a stochastic system for a recorded array of values of an output parameter of the system, parameters of a symmetrical density function model are determined and provision is made for tracking the density function model by comparing uncertainty intervals of the density function model with reference values of uncertainty intervals of a symmetrical target density function of the stochastic system, which makes it possible to monitor and change, in a targeted manner, the form and scale of the symmetrical density function model provided that an estimate of the centre of the output parameter of the system is obtained. The use of a symmetrical density function model for monitoring the uncertainty of a stochastic system provided that an estimate of the centre of an array of an output parameter is obtained makes it possible to ensure that the monitoring of the form and scale of the uncertainty of the output parameter is independent of the position of the estimate of the centre.

(57) Реферат: Изобретение относится к способам организации контроля над стохастической системой и может быть использовано в системах контроля в энергетике, медицине, металлургической, пищевой, химической и других отраслях промышленности. Технический результат заключается в оптимизации поиска параметров симметричной модели неопределенности стохастической системы при условии



WO 2022/035348 A1

CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE,
SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN,
GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Опубликована:

— с отчётом о международном поиске (статья 21.3)

получения оценки центра плотности распределения. Результат достигается за счет того, что при организации контроля неопределенности стохастической системы для зарегистрированного массива значений выходного параметра системы определяю] параметры симметричной модели плотности распределения и обеспечивают отслеживание модели плотности распределения путем сравнения интервалов неопределенностей модели плотности распределения с эталонными значениями интервалов неопределенностей симметричной целевой плотности распределения стохастической системы, что позволяет контролировать и целенаправленно изменять форму и масштаб симметричной модели плотности распределения при условии получения оценки центра выходного параметра системы. Применение симметричной модели плотности распределения для контроля неопределенности стохастической системы при условии получения оценки центра массива выходного параметра позволяет обеспечить независимость контроля формы и масштаба неопределенности выходного параметра от положения оценки центра.

Способ и устройства контроля неопределённости стохастической системы

Предлагаемое изобретение относится к области контроля сложными стохастическими системами, и может быть использовано в энергетике, медицине, пищевой, химической, металлургической и других отраслях промышленности. Целью изобретения является установление контроля сложной стохастической системы при условии оценки центра неопределённости путём отслеживания трека целевой плотности распределения выходного параметра.

Неопределённость объекта является неотъемлемой частью любого измерительного процесса и составляет существенную часть анализа изменчивости сложных систем [1, 2]. Существуют различные технические приложения, в которых при наличии случайных возмущений устанавливается контроль над плотностью распределения выходного параметра системы. Примерами процессов контроля плотности вероятностного распределения являются: контроль размера частиц в химической промышленности [3], контроль и анализ случайных процессов [4]; контроль весового распределения хлопкового волокна по длине [5]; контроль толщины и веса бумаги [6, 7], контроль управления распространением микрочастиц [8, 9], контроль распределения биологических параметров в медицине [10, 11]. Изменчивость состояния сложной системы является основной причиной неопределённости выходных параметров, для контроля которой в промышленных процессах нашли применение системы контроля плотности распределения стохастических распределения [12, 13, 14, 15].

Известен стохастический контроль [14, 16] нелинейных систем при условной оценке центра неопределённости распределения выходного параметра, при котором осуществляют минимизацию разности между треком уловной выходной плотности распределения массива значений, формируемого с использованием встроенного в систему слежения рекурсивного процесса, и треком условной целевой плотности распределения, характерным для оптимального состояния системы. Недостаток контроля состоит в использовании плотности распределений с неизменной формой для аппроксимации массива значений выходного параметра системы. При таком подходе обеспечение слежение трека целевой плотности распределения возможно только при использовании рекурсивного процесса для изменения значений выходной плотности в соответствии с заданным алгоритмом.

Наиболее близким к предполагаемому изобретению является способ контроля и управления динамической системы [17], заключающийся в том, что осуществляется регистрация состояния объекта, формирование массива y_i значений выходного параметра $y(t)$, определение математического ожидания M , среднего квадратического отклонения σ ; формирование базы данных эталонных параметров закона распределения выходного параметра,

проверку состояния объекта принадлежности области оптимального состояния; трансформация закона распределения управляемого параметра за счёт изменения настроек параметра регулятора, корректировку закона распределения и формирование управляющего воздействия.

Как следует из формулы изобретения, в известном способе контроля и управления динамической системой осуществляется определение контрэксцесса и коэффициента энтропии симметричного распределения; определение энтропийно–параметрического критерия области оптимального состояния; минимизация величины энтропийно–параметрического потенциала динамической системы и корректировка реального параметра закона распределения выходного параметра [17].

В качестве недостатков данного способа контроля и управления динамической системой следует отметить:

- ограничение моделей поведения системы только набором симметричных форм распределений выходного параметра;
- отсутствие возможности получения параметров для симметричной модели плотности распределения при условии получения оценки среднего значения, что ограничивает возможность её сравнение с треком симметричной плотности целевого распределения с известными параметрами;
- отсутствие возможности построения контроля форм смесей симметричных и несимметричных моделей неопределённости стохастической системы;
- отсутствие возможности получения интегральных и дифференциальных свойств распределения для организации систем пропорционально-интегрально-дифференциального контроля.

Краткое описание чертежей

На фигуре 1 приведена схема устройства контроля неопределённости стохастической системы путём отслеживания рассогласования плотности распределения выходного параметра.

На фигуре 2 приведена схема процесса, реализующего известный способ контроля и управления динамической системой.

На фигуре 3 приведены модели симметричных плотностей распределения, используемые при контроле целевой плотности распределения:

- а) чертежи моделей простых симметричных плотностей распределений;
- б) пример трека условной плотности параболического распределения.

На фигуре 4 приведены чертежи неопределённостей для плотностей распределений массивов значений выходного параметра:

- а) чертёж неопределённостей для несимметричной плотности гамма распределения;
- б) чертёж неопределённостей для модели плотности симметричной относительно математического ожидания гамма распределения.

На фигуре 5 приведены чертежи неопределённостей для симметричных моделей плотностей распределения при использовании моды в качестве центра распределения;

- а) чертёж неопределённостей для модели плотности симметричной относительно моды гамма распределения;
- б) чертёж неопределённостей для модели плотности симметричной относительно моды смеси распределений Гаусса.

На фигуре 6 приведено пространство форм распределений, основанное на смеси нормального распределения и нормированной аппроксимации четвёртого порядка.

На фигуре 7 приведена схема процесса, реализующего способ контроля неопределённости стохастической системы при условии получения оценки центра плотности распределения.

На фигуре 8 приведена схема процессов, реализующих определение формы симметричной модели плотности распределения.

На фигуре 9 приведён вариант пространства признаков форм распределений для области контроля стохастической системы.

На фигуре 10 приведён чертёж пространства энтропийной и параметрической неопределённостей симметричной модели.

На фигуре 11 приведена схема устройства параметрического контроля неопределённости стохастической системы.

На фигуре 12 приведена схема устройства энтропийно–параметрического контроля неопределённости стохастической системы.

Подробное описание изобретения

Материал подробного описания содержит пояснения вариантов осуществления изобретения со ссылками на чертежи, где аналогичные ссылочные позиции представляют одинаковые или подобные элементы.

На современном этапе развития техники благодаря интенсивному внедрению информационных технологий возможно построение контроля над нелинейными стохастическими системами по изменению плотности распределения выходного параметра относительно целевой плотности распределения [12, 13, 14].

Сущность контроля состояния стохастической системы состоит в обеспечении минимальной разности между симметричной моделью плотности распределения контролируемого параметра на выходе системы и эталонной моделью симметричной целевой плотности распределения. Целью управления является построение управляющего воздействия u для регулировки настроек системы и её параметров, чтобы плотность распределения $\rho(y_k, u)$ последовательности стохастического выходного параметра y_k следовала за эталонной моделью целевой плотности распределения $\rho_0(y)$:

$$\rho(y_k, u) \rightarrow \rho_0(y) \quad (1)$$

Классические схемы контроля неопределённости системы при известной целевой плотности распределения выходного параметра построены на оценке рассогласований математического ожидания, дисперсии или среднего квадратического разброса стохастического выходного параметра системы при условии, что плотности выходного параметра соответствуют нормальные или параболические распределения.

Недостаток классических схем контроля состоит в том, что для стохастических систем характерны асимметричные не Гауссовы плотности распределения. Задача построения контроля неопределённости стохастической системы может быть решена на основе контроля набора статистической информации, характеризующей рассогласование состояния системы относительно заданной целевой плотности распределения. Контроль направлен на обеспечение соответствия интервалов неопределённостей и параметров модели плотности распределения выходного параметра интервалам неопределённостей и параметрам модели целевой плотности распределения стохастической системы.

Наиболее общая схема устройства контроля неопределённости стохастической системы путём отслеживания рассогласования плотностей целевого и реального распределений выходного параметра дана на фигуре 1, где использованы следующие обозначения:

- 105 – стохастическая система;
- 110 – измерительное устройство;
- 115 – запоминающее устройство;
- 120 – устройство формирования плотности распределения выходного параметра;
- 125 – сумматор плотностей распределений выходного параметра;
- 130 – устройство формирования управляющего воздействия;
- 135 – устройство формирования целевой плотности распределения.

Этап 1: регистрация и формирование массива выходного параметра стохастической системы

Согласно схеме на фигуре 1 приложения выходной параметр $y(t)$ контролируемого процесса на выходе стохастической системы 105 измеряется с помощью измерительного устройства 110 через дискретные промежутки времени Δt . Дискретные измеренные значения y_i выходной параметр с выхода измерительного устройства 110 записывается и сохраняются запоминающим устройством 115, где происходит формирование n -мерного векторного массива значений $[Y]$ выходного параметра, полученных во временном промежутке t_n . Векторный массива значений $[Y]$ выходного параметра предназначен для построения гистограммы и оценки вероятности наблюдения p_i регистрируемого результата.

Этап 2: формирование плотностей реального распределения.

На этом этапе устройство 120 формирования плотности распределения выходного параметра

- рассчитывает вероятности нахождения регистрируемых дискретных значений выходного параметра y_j в заданных интервальных границах j -го значения;
- производит обработку рассчитанных вероятностей m -мерного вектора $[Y]$ выходного параметра для определения характеристик полученного массива значений;
- определяет дискретные значений плотности распределения $\rho(y_j, u(t_i))$ для выборки выходного параметра при заданном управляющем параметре $u(t_i)$ в момент времени t_i .

Этап 3: оценка рассогласования плотности распределения выходного параметра.

Для получения рассогласования $e(y_j, t_i)$ реальной плотности распределений относительно целевой плотности распределений выходного параметра используется сумматор 125 с инверсным входом. Формула для расчёта рассогласования $e(y_j, t_i)$ имеет вид:

$$e(y_j, t_i) = \rho_0(y_j) - \rho(y_j, t_i) \quad (2)$$

Дискретных значений $\rho_0(y_j)$ целевой плотности распределения m -мерного вектора $[Y]$ выходного параметра получают от устройства 135 формирования целевой плотности распределения, предназначенного для задания управление над стохастической системой посредством воспроизведения целевой плотности распределения выходного параметра с известными параметрами.

Этап 4: формирование управляющего воздействия.

Из схемы следует, что для построения управляющего воздействия $u(t)$ используют рассогласование $e(y_j, t_i)$ между дискретными значениями плотности распределения $\rho(y_j, t_i)$ значений массива $[Y]$ и целевой плотности распределения $\rho_0(y_j)$ выходного параметра, формируемые блоками 120 и 135, соответственно.

При не гауссовой плотности распределения выходного параметра стохастической системы используются схемы контроля, в которых проводится замена плотности её аппроксимацией с помощью сплайна, по состоянию которого формируется управляющее воздействие $u(t)$ для пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) контролера [14, 16]. Параметр управления стохастической системы задан выражением

$$u(y, t) = K_p \cdot e(y, t) + K_i \cdot \int_0^t e(y, \tau) d\tau + K_d \frac{\partial e(y, t)}{\partial t}. \quad (3)$$

Заявитель отмечает, что при контроле стохастических систем *неприемлема* классическая схема пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования, так как необходимо проводить контроль в пространстве двух параметров: параметр времени t и параметр распределения y . По этой причине при построении контроля над стохастическими системами применяют различные схемы псевдо ПИД контроля [16], в которых для снижения случайности параметра рассогласования $e(y, t)$, выходная плотность распределения аппроксимируется с помощью сплайн функций.

Недостаток использования сплайн функций состоит в следующем. Так как вид сплайна определяет вектор его параметров при условии, что базисный полином не обращается в нуль на ограниченном промежутке, то изменение положения контрольных точек влияет на кривую в ограниченном диапазоне. Поскольку сплайны являются локальными, изменение координат любой из точек меняет форму кривой в локальной области сплайна и зависит от количества контрольных точек, включённых в интервал сплайна. Следовательно, вектор параметров сплайна зависит от качества оценки параметров плотностей распределения. По этой причине для выборочных случайных последовательностей выходного параметра необходимо предварительное *измерение параметров плотностей распределения* для обеспечения заданной точности аппроксимации плотности с помощью сплайнов [14]. Таким образом, для применения контроля неопределённости стохастической системы требуется измерение характеристик для модели функции плотности распределения и высокая точность приближения В-сплайна к результату модели неопределённости.

Известный способ формирования управляющего воздействия состоит в использовании моделей нелинейного авторегрессивного скользящего среднего значения с внесистемными входами (NARMAX) стохастической системы [15]. В этом случае контроль неопределённости стохастических системах с негаусовой плотностью распределения выходного параметра основан на замене реального несимметричного распределения её симметричной относительно оценки центра моделью. В качестве оценки центра распределения принимают мате-

матическое ожидание. При построении симметричных моделей используют нелинейные модели в виде нормального распределения или степенного ряда на ограниченном интервале значений наблюдаемого параметра y . Обычно степенной ряд ограничивается третьим или четвёртым порядком аппроксимации целевой плотности распределения.

Основной недостаток применения степенных аппроксимаций состоит в ограниченности интервала положения значений. При таком подходе получение текущего значения выходного параметра за пределами интервала вызывает качественное изменение формы трека распределения вследствие замены реальной неограниченной плотности распределения ограниченным набором симметричных моделей степенного ряда. По этой причине существующие схемы контроля реализуют рекурсивные методы для определения текущего значения выходного параметра, суть которых состоит в обеспечении целевой симметричной модели распределения за счёт искажения реальной выборки отсчётов перенесением значения внутрь интервала.

Таким образом, недостаток контроля неопределённости стохастической системы, основанного на отслеживании рассогласования плотностей целевого и реального распределений выходного параметра, состоит в ограниченности выбора форм измеряемых моделей неопределённости, применяемых при аппроксимации распределений выходного параметра.

Значительного расширения выбора форм симметричных моделей можно достичь за счёт использования известного способа контроля и управления динамической системой, основанного на минимизации энтропийно–параметрического потенциала симметричного распределения выходного параметра и применения пространства признаков коэффициента энтропии и контрэксцесса.

Схема процесса на фигуре 2 иллюстрирует этапы для известного способа контроля динамической системой заключающегося в том, что осуществляется регистрация состояния объекта на этапе 205; формирование массива значений выходного параметра y_i на этапе 210; определение математического ожидания и среднего квадратического разброса выходного параметра на этапе 215; формирование базы данных эталонных параметров распределений выходного параметра на этапе 220; определение энтропийно–параметрического критерия области оптимального управления на этапе 225; проверка состояния объекта принадлежности области оптимального управления на этапе 230; трансформация закона распределения на этапе 235; определение энтропийно–параметрического потенциала на этапе 240; минимизация величины энтропийно–параметрического потенциала на этапе 245; корректировка распределения выходного параметра на этапе 250; формирование управляющего воздействия на этапе 255; информирование об оптимальности состояния на этапе 260.

В качестве характерных особенностей известного способа контроля динамической системой выделим следующее.

Первая особенность известного способа контроля динамической системой состоит в том, что контроль *ограничен признаками формы* только симметричных распределений, так как известное топологическое пространство контрэксцесса и коэффициента энтропии, разработанное Новицким П.В. [18], не содержит характерных признаков для анализа и контроля несимметричных распределений.

Другая особенность известного способа контроля динамической системой состоит в том, что *минимизация энтропийно-параметрического потенциала направлена на уменьшение неопределённости значений выходного параметра*. Минимизация потенциала предполагает, что для наиболее оптимального состояния системы интервал неопределённости выходного параметра стремится к нулевому пределу. Такой подход не позволяет контролировать масштаб интервала неопределённости при оценке центра плотности распределения выходного параметра стохастической системы, так как неопределённость системы обусловлена непрерывной изменчивостью её внутренней структуры.

Известный способ контроля динамической системы имеет следующие недостатки.

1. Отсутствует контроль асимметрии несимметричной плотности распределения.
2. Отсутствует контроль формы и масштаба неопределённости при получении оценки центра плотности распределения выходного параметра
3. Отсутствует контроль интервалов неопределённости стохастической системы.
4. Отсутствует возможность отслеживания и оптимизации трека условной симметричной модели плотности распределения при условии получения оценки центра выходного параметра по отношению к треку симметричной модели целевой плотности распределения.

Таким образом, известный способ контроля, построенный на основе минимизации интервала неопределённости, *не обеспечивает контроль* интервала неопределённости для симметричной модели плотности распределения путём её целенаправленного изменения к модели целевой плотности распределения при условии оценки центра выходного параметра.

Предлагаемое изобретение направлено на обеспечение контроля неопределённости стохастической системы при получении условной оценки центра плотности смеси симметричных и несимметричных распределений, достигаемое путём минимизации рассогласования интервалов энтропийной и параметрической неопределённостей модели плотности смеси распределений симметричной относительно оценки центра плотности смеси распределений.

Автор предполагаемого изобретения предлагает для смеси симметричного и несимметричного распределения контролировать признак асимметрии и интервалы энтропийной и параметрической неопределённостей *симметричных моделей плотностей распределений, полученных их отображением относительно оценки центра.*

Для одновременного анализа смесей симметричных и несимметричных распределений, формируемых вследствие изменчивой структуры стохастической системы, удобно проводить анализ массива значений выходного параметра при условии получения оценки центра распределения. Примером служат алгоритмы [16], в которых несимметричные распределения контролируемого на выходе системы параметра заменяются симметричными относительно оценки центра нормальными или степенными аппроксимациями распределения.

По мнению автора предполагаемого изобретения, обеспечение контроля неопределённости стохастической системы при условии получения оценки центра плотности распределения выходного параметра позволяет проводить целенаправленное изменение свойств стохастической системы таким образом, чтобы сохранялось соответствие симметричной относительно оценки центра модели выходной плотности распределения и симметричной модели её целевой плотности, характерной для оптимального состояния системы.

П.1. Способ контроля неопределённости стохастической системы, основанный на целенаправленном изменении симметричной модели плотности распределения выходного параметра к симметричной целевой плотности распределения стохастической системы, при котором регистрируют состояние объекта; формируют массив значений выходного параметра y_i ; определяют математического ожидания M и средний квадратический разброс σ выходного параметра; формируют базу данных эталонных параметров распределений выходного параметра; трансформируют закон распределения выходного параметра посредством изменения настроек системы; отличающийся тем, что осуществляют

определение признака асимметрии Sk для несимметричной плотности распределения массива значений выходного параметра системы

$$Sk = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad (4)$$

где μ_3 – третий центральный момент распределения массива значений выходного параметра, определяемый

$$\mu_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - M)^3, \quad (5)$$

где N – число значений в выборке выходного параметра;

проверку допустимости рассогласования асимметрии распределения массива значений области оптимального состояния системы

$$|Sk - Sk_0| \leq \Delta Sk_{\text{крит}}, \quad (6)$$

где Sk_0 – признак асимметрии оптимального распределения стохастической системы;

$\Delta Sk_{\text{крит}}$ – критическое значение разности асимметрий области оптимального состояния;

определение формы симметричной модели выходной плотности распределения стохастической системы *посредством*

– выбора и определения центра y_u несимметричного массива $[Y]$ значений выходного параметра;

– формирования симметричного массива значений $[Z]$ отображением значений несимметричного массива значений $[Y]$ выходного параметра относительно оценки центра;

– определения второго μ_{2S} и четвёртого μ_{4S} центральных моментов симметричного массива значений

$$\mu_{2S} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} (z_i - y_u)^2, \quad (7)$$

$$\mu_{4S} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} (z_i - y_z)^4, \quad (8)$$

– определения контрэксцесса симметричного массива значений выходного параметра

$$\kappa_{HS} = \frac{\mu_{2S}}{\sqrt{\mu_{4S}}}, \quad (9)$$

– определения *интервалов информационной и параметрической неопределённости* симметричного массива значений выходного параметра стохастической системы

$$\Delta_{HS} = \exp(-E(-\ln P_Z(Z))), \quad (10)$$

$$\Delta_{PS} = \sqrt{\mu_{2S}}, \quad (11)$$

– определения коэффициента энтропии симметричного массива значений выходного параметра

$$K_{HS} = \frac{\Delta_{HS}}{\Delta_{PS}}, \quad (12)$$

– определения критерия области контроля признаков формы симметричной целевой плотности распределения

$$\gamma = \left(\left\| \frac{K_{HS} - K_{HS0}}{\frac{\Delta K_{HS}}{\kappa_S - \kappa_{S0}}} \right\| > 1 \right), \quad (13)$$

где $\Delta \kappa_S$, ΔK_{HS} – разбросы признаков контрэксцесса и коэффициента энтропии симметричного массива относительно контрэксцесса κ_{S0} и коэффициента энтропии K_{HS0} симметричной целевой плотности распределения стохастической системы;

– проверки принадлежности положения системы области контроля и если критерий γ равен единице ($\gamma=1$), то проводят трансформацию закона распределения посредством изменения настроек системы;

– определения дистанций между положениями возможных моделей и положением симметричного массива значений выходного параметра

$$\Delta L_j = \left| \frac{K_{HS} - K_{HSj}}{\frac{\Delta K_{HS}}{\kappa_S - \kappa_{Sj}}} \right|, \quad (14)$$

где K_{HSj}^m и κ_{Sj}^m – контрэксцесс и коэффициент энтропии симметричной j -й модели плотности распределения;

– выбора формы симметричной модели плотности распределения из условия минимума дистанции между положениями возможных моделей и положением симметричного массива значений выходного параметра

$$\Delta L_j \rightarrow \min; \quad (15)$$

– определения вектора рассогласования признаков формы симметричной моделей плотности распределений выходного параметра и симметричной целевой плотности распределения стохастической системы

$$[\delta K_{HS} \quad \delta \kappa]^T = [K_{HS}^m - K_{HS0}, \quad \kappa_S^m - \kappa_{S0}]^T, \quad (16)$$

где K_{HS}^m и κ_S^m – коэффициента энтропии и контрэксцесса выбранной симметричной модели плотности распределения;

– формирования управляющего воздействия для коррекции рассогласования признаков формы симметричной модели плотности распределения посредством изменения параметров и настроек системы;

определение интервала энтропийно-параметрической неопределённости симметричного массива значений выходного параметра стохастической системы

$$\Delta_{HPS} = \sqrt{(\Delta_{HS})^2 + (\Delta_{PS})^2}, \quad (17)$$

формирование интервала энтропийно-параметрической неопределённости симметричной модели плотности распределения выходного параметра

$$\Delta_{HPS}^M = \sqrt{\left(\left(K_{HS\lambda}^M \right)^2 + 1 \right) \cdot \mu_{2\lambda}}, \quad (18)$$

определение параметра масштаба симметричной модели плотности распределения выходного параметра из условия минимума разницы интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей симметричного массива значений выходного параметра и симметричной модели распределения выходного параметра

$$\left| \Delta_{HPS}^M - \Delta_{HPS} \right| \rightarrow \min, \quad (19)$$

определение рассогласования интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей симметричной модели плотности распределения выходного параметра Δ_{HPS}^M и симметричной целевой плотности распределения Δ_{HPS}^U

$$\delta \Delta_{HPS} = \left| \Delta_{HPS}^M - \Delta_{HPS}^U \right| \rightarrow \min, \quad (20)$$

минимизацию рассогласования интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей симметричной модели плотности распределения выходного параметра и симметричной модели целевой плотности распределения, коррекция симметричной модели выходной плотности распределения стохастической системы и формирование управляющего воздействия для коррекции рассогласования интервалов неопределённости стохастической системы, сохранение параметров модели и визуализацию модели неопределённости стохастической системы.

П.2. Устройство параметрического контролера неопределённости стохастической системы содержащее блок регистрации значений выходного параметра стохастической системы, выполненный с возможностью измерения, запоминания выходного сигнала; блок формирования массива значений выходного параметра стохастической системы, выполненный с возможностью группирования данных по интервалам; блок определения центральных моментов массива значений [Y] выходного параметра, предназначенного для определения математического ожидания, второго, третьего и четвёртого центральных моментов выходного параметра; блоков определения интервала параметрической неопределённости и параметрических признаков формы – асимметрии и эксцесса – массива значений [Y] выходного параметра стохастической системы, соответственно; блок формирования целевой плотности распределения, выполненной с возможностью получения массива значений в соответствии с ма-

тематической моделью целевой плотности распределения; блок определения центральных моментов целевого распределения выходного параметра, предназначенного для определения математического ожидания и центральных моментов целевой плотности распределения; блок определения интервала параметрической неопределённости и параметрических признаков формы – асимметрии и эксцесса – целевой плотности распределения стохастической системы; блок сумматоров с инверсным входом, содержащего сумматор интервалов параметрических неопределённостей массива значений выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы, сумматоры параметрических признаков формы асимметрии и эксцесса массива значений выходного параметра и целевого распределения стохастической системы; блок настройки пропорциональностей рассогласований, содержащего блоки установления пропорциональности рассогласования интервалов параметрических неопределённостей, рассогласований асимметрии и рассогласования эксцессов массива значений $[Y]$ выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы; блок формирования управляющего воздействия для коррекции рассогласований интервалов неопределённостей стохастической системы.

П.3. Устройство энтропийно–параметрического контролера неопределённости стохастической системы, содержащее блок измерения выходного параметра стохастической системы, выполненный с возможностью запоминания выходного сигнала; блок формирования массива значений выходного параметра, выполненный с возможностью запоминания значений выходного параметра и группирования данных по интервалам; блок определения центральных моментов массива значений $[Y]$ выходного параметра; блок определения асимметрии плотности распределения значений массива $[Y]$; блок формирования симметричного массива $[Z]$ выходного параметра, выполненный с возможностью выбора и определения центра симметрии выходного массива; блок определения центральных моментов и интервалов неопределённостей симметричного массива $[Z]$; блок определения параметров симметричного массива $[Z]$, выполненного с возможностью определения интервала энтропийно–параметрической неопределённости и признаков формы контрэксцесса и коэффициента энтропии симметричного массива $[Z]$ и возможностью проверки принадлежности симметричной модели области контроля; блок формирования воздействия для трансформации распределения выходного параметра стохастической системы; блок выбора формы симметричной модели с известными коэффициентом энтропии и контрэксцесса, выполненного с возможностью определения дистанции между положением возможных моделей и положением симметричного массива $[Z]$; блок формирования целевой плотности симметричного распреде-

ления; блок определения параметров целевой плотности симметричного распределения, выполненного с возможностью определения интервала энтропийно–параметрической неопределённости и признаков формы – контрэксцесса и коэффициента энтропии – целевой плотности симметричного распределения; блок сумматоров с инверсным входом, содержащего сумматор параметрических признаков асимметрии массива значений выходного параметра и его эталонного значения; сумматор интервалов энтропийно–параметрической неопределённости симметричного массива $[Z]$ и целевого плотности симметричного распределений выходного параметра стохастической системы; сумматор коэффициентов энтропий и сумматор контрэксцессов; блок настройки пропорциональностей рассогласований, содержащего блок установления пропорциональностей рассогласований асимметрии массива значений $[Y]$ выходного параметра и его эталонного значения, блоки установления пропорциональностей рассогласования коэффициентов энтропий, рассогласования контрэксцессов и рассогласования интервалов энтропийно–параметрической неопределённости симметричного массива $[Z]$ и целевого плотности симметричного распределений выходного параметра стохастической системы; блок формирования управляющего воздействия для коррекции рассогласования интервалов неопределённости стохастической системы.

Введённые действия обеспечивают контроль состояния неопределённости стохастической системы и целенаправленного изменения симметричной модели плотности распределения выходного параметра при условии получения оценки центра к симметричной целевой плотности распределения системы путём

- проверки наличия *асимметрии* массива значений выходного параметра и её соответствие эталонному значению асимметрии плотности смеси;
- контроля формы и масштаба неопределённости симметричной относительно оценки центра массива значений;
- контроля состояния неопределённости стохастической системы за счёт слежения рассогласования интервалов неопределённости симметричной модели трека плотности распределения относительно интервалов неопределённости симметричной целевой плотности распределения.

Контроль над стохастической системой определяет обратная связь между выходным продуктом контролируемого процесса и настройками регуляторов стохастической системы. Контролируемые свойства процесса стохастической системы характеризуются с помощью массива выходных параметров. Оптимальное состояние стохастической системы задано *целевой* плотностью распределения выходного параметра. Для работы обратной связи осу-

шествуется *измерительный процесс*, состоящий в получении данных, их накоплении и математической обработке для обеспечения *процесса сравнения интервалов энтропийной и параметрической неопределенностей модели плотности смеси распределений выходного параметра и интервалов энтропийной и параметрической неопределенностей целевой плотности распределения*.

Интервал энтропийной и параметрической неопределенности выходного параметра стохастической системы задан в единицах меры выходного параметра стохастической системы и сопоставляется с *мерой физической величины*, заданной моделью целевой плотности распределения выходного параметра. Процесс сравнения выходной физической величины с мерой физической величины относится к процессу измерения. Эффекты, основанные на измерительных процессах, относятся к техническим эффектам.

При проведении контроля выполняется процесс, состоящий в сопоставлении меры неопределённости (т.е. протяжённости разброса параметров) выходного параметра и меры неопределённости, заданной с помощью модели разброса однородного параметра. Установление контроля над стохастической системой посредством контроля неопределённости параметров выходного продукта стохастической системы заключается как в *получении информации о состоянии интервалов неопределённости выходного параметра стохастической системы, так и её использовании для изменения состояния системы посредством регулирования её настроек*. Техническим эффектом является возможность обеспечения стационарного состояния при осуществлении способа контроля неопределённости стохастической системы.

Интервал неопределённости плотности выходного параметра стохастической системы

В современных системах контроля для аппроксимации распределения выходного параметра при условии оценки среднего значения массива используются простые формы симметричных распределений, такие как нормальное и параболическое распределения, степенные симметричные аппроксимации, ограниченные до шестого порядка [16]. Чертежи моделей симметричных плотностей распределений, используемых при контроле целевой плотности распределения в стохастических системах, даны на фигуре 3,а, где обозначено 310 и 315 – нормальное и параболическое распределения, 320, 325 и 330 – нормированные аппроксимации четвёртого, шестого и восьмого порядка. Простые распределения используются в системах контроля слеживания трека плотности распределения для аппроксимации данных при известной оценке центра распределения. Пример трека плотности параболического распределения показан на фигуре 3,б. Из-за ограниченности форм, применяемых в системах, появ-

ляются расхождения между реальными выходными плотностями распределений и моделями целевых плотностей распределений. К примеру, применение для аппроксимации параболического распределения ограничивает интервал положения значений выходной величины $y_i \in [a, b]$ длиной этого интервала.

Применение степенного ряда симметричных распределений, состоящего из второго, четвёртого и шестого порядка, так же имеет ограниченный интервал возможного положения значений выходного параметра, так как каждое из распределений ограничено и при аппроксимации используются модели с сопоставимыми разбросами значений. Неопределённость сложной системы характеризуется неограниченной смесью распределений, обусловленной непрерывным изменением её внутренних процессов и наложением внешних воздействий. Такие распределения значений представляют сложные не симметричные смеси, значения которых выходят за пределы используемых симметричных аппроксимаций. Замена реального распределения ограниченной аппроксимацией решается за счёт применения рекурсивных алгоритмов, суть которых состоит в отображении реальных значений внутри ограниченного интервала. Применение нормального распределения так же ограничено одной формой распределения, которое значительно отличается от несимметричной плотности распределения выходного параметра.

Несмотря на то, что плотности распределения наблюдаемых параметров сложных стохастических систем заданы смесью симметричных и несимметричных распределений, для задания разброса параметра при условии, что получена оценка среднего значения, возможно использование симметричных распределений.

Автор предполагаемого изобретения полагает, что применение процесса симметрирования позволяет контролировать неопределённость состояние стохастической системы путём отслеживания симметричной модели трека плотности распределения, построенной для массива значений выходного параметра системы, относительно трека симметричной целевой плотности распределения.

Свойства симметричного массива

При получении оценки среднего значения интервалы энтропийной и параметрической неопределённости в окрестности центра содержат информацию о внутреннем устройстве системы. Для исследования интервалов неопределённости в окрестности полученной оценки центра используют симметричные модели распределений. Замена выходного массива данных при условии оценки центра симметричной моделью плотности распределения позволяет

использовать интервалы энтропийной и параметрической неопределённости, центрированные относительно оценки центра массива значений выходного параметра.

Особенность положения интервалов неопределённости асимметричного массивов значений выходного параметра иллюстрируют фигура 4, а, где приведён чертёж неопределённостей для несимметричной плотности гамма распределения массива значений выходного параметра. На фигуре 4, а даны следующие обозначения

410 – несимметричная смещённая плотность распределение массива значений выходного параметра;

415 – центр несимметричного массива значений выходного параметра;

420 и 425 – равномерные модели интервалов параметрической и энтропийной неопределённостей для несимметричного распределения значений выходного параметра;

430 и 435 – дистанции интервалов параметрической и энтропийной неопределённости, соответственно.

Так как модель интервала параметрической неопределённости 420 определена среднеквадратическим разбросом значений в массиве выходного параметра, то положение интервала 420 симметрично относительно центра 415, определяемого математическим ожиданием массива значений выходного параметра. Дистанция интервала 430 параметрической неопределённости равна среднему квадратическому разбросу значений в массиве выходного параметра.

Модель интервала энтропийной неопределённости 425 смещённого гамма распределения расположена несимметрично относительно полученной оценки центра распределения, так как характеризует распределение значений относительно границы положения значений несимметричного распределения [19]. Дистанция интервала энтропийной неопределённости 435 откладывается относительно точки смещения несимметричного гамма распределения.

Положение интервалов неопределённостей симметричных относительно оценки центра массива значений иллюстрирует чертёж неопределённостей на фигуре 4, б для модели плотности симметричной относительно математического ожидания гамма распределения. На фигуре 4, б дополнительно использованы обозначения

440 – несимметричное распределение массива значений, полученных при симметричном переносе массива значений выходного параметра относительно оценки центра 415;

445 – симметричная нормированная модель распределения массива значений выходного параметра;

450 – равномерная модель интервала энтропийной неопределённости симметричной нормированной модели распределения массива значений выходного параметра;

455 – дистанция интервала энтропийной неопределённости симметричной нормированной модели распределения массива значений выходного параметра.

Для анализа несимметричного массива значений выходного параметра, иллюстрируемого распределением 410, формируется симметричная нормированная модель распределения массива значений выходного параметра 445. Формирование симметричной модели получено переносом значений y_i массива $[Y]$ выходного параметра относительно оценки центра $y_{ц}$, показанного на фигуре 4 в виде точки 415. В результате переноса получен несимметричный массив Y^* значений y_i^* . Координаты i -х значений массива $[Y^*]$ определены согласно выражению

$$y_i^* = 2y_{ц} - y_i. \quad (21)$$

В результате объединения двух массивов $[Y]$ и $[Y^*]$, для которых i -е значения массивов расположены симметрично относительно оценки центра $y_{ц}$ массива $[Y]$, получен симметричный массив значений $[Z]$

$$[Z] = [Y] \cup [Y^*]. \quad (22)$$

На фигуре 4,б симметричная нормированная модель распределения значений выходного параметра 445 иллюстрирует симметричный массив $[Z]$, для которого многие свойства совпадают со свойствами исходного массива $[Y]$ значений выходного параметра системы. К примеру, если в качестве оценки центра $y_{ц}$ массива $[Y]$ использовано математическое ожидания, то все *чётные* центральные моменты массивов будут равны:

$$\mu_{iN} = \mu_i. \quad (23)$$

При использовании математического ожидания в качестве оценки центра симметрии несимметричный массивы значений $[Y]$ выходного параметра и симметричный массив $[Z]$ имеют одинаковые эксцессы, т.е. одинаковые признаки острровершинности.

Чертежи неопределённости для симметричных моделей плотностей распределения при использовании моды в качестве центра распределения показаны на фигуре 5, где на фигуре 5,а выполнен чертёж неопределённости для модели плотности симметричной относительно моды гамма распределения, на фигуре 5,б дан чертёж неопределённости для модели плотности симметричной относительно моды смеси распределений Гаусса. При использовании моды или медианы в качестве оценки центра 415 чётные робастные моменты несимметричного массива значений выходного параметра будут равны чётным центральным моментам симметричного массива $[Z]$. По этой причине для анализа чётных робастных оценок несимметричного массива $[Y]$ значений выходного параметра можно использовать чётные центральные моменты симметричного массива $[Z]$. Сохранение в симметричном массиве $[Z]$

ряда чётных свойств несимметричного массива значений $[Y]$ выходного параметра стохастической системы использовано для обеспечения контроля над стохастической системой.

Следует отметить, что при использовании математического ожидания M массива $[Y]$ в качестве оценки центра симметрии, модель параметрической неопределённости симметричного массива $[Z]$ совпадает с моделью параметрической неопределённости 420 массива $[Y]$. Дистанции интервалов параметрической неопределённости массивов $[Y]$ и $[Z]$ равны.

Так как информационные свойства выборки симметричного массива $[Z]$ также зависят от распределения значений несимметричного массива $[Y]$, то свойства равномерной модели интервала энтропийной неопределённости 450 допустимо использовать для контроля интервала энтропийной неопределённости несимметричного массива $[Y]$, отображаемого равномерной моделью 425. В частности, энтропийный коэффициент симметричного массива $[Z]$ представляет собой *независимый информационный признак формы* несимметричного распределения $[Y]$. Формула для определения энтропийного коэффициента симметричного массива $[Z]$ задано в виде отношения (9) дистанций 455 и 430 интервалов энтропийной Δ_{HS} и параметрической Δ_{PS} неопределённостей симметричного массива значений $[Z]$.

Важное свойство модели интервала энтропийной неопределённости 450 симметричного массива $[Z]$ является его симметричное положение относительно центра 415 несимметричного массива $[Y]$ значений выходного параметра независимо от выбора в качестве оценки центра математического ожидания, моды, медианы или квантильной оценки. Симметричное положение модели интервала энтропийной неопределённости относительно оценки центра сохраняется при использовании смесей смещённых симметричных и несимметричных распределений для аппроксимации несимметричного массива значений выходного параметра.

Таким образом, использование симметричного массива $[Z]$ позволяет использовать проекцию несимметричного распределения и контролировать его свойства в проекции признаков контрэксцесса κ_S и коэффициента энтропии K_{HS} симметричных распределений.

Для практического применения имеет значение тот факт, что форму симметричной модели плотности распределения, найденную в пространстве признаков контрэксцесса κ_S и коэффициента энтропии K_{HS} симметричных распределений, *допустимо использовать для построения систем контроля несимметричных массивов выходного параметра сложной стохастической системы*, которые могут быть синтезированы на основе смесей простых форм.

Пространство форм смеси симметричных распределений

Реализации процесса получения формы распределения возможна за счёт отображения многообразия форм симметричных моделей распределений и их смеси в пространстве признаков формы распределения: контрэксцесса κ_S и коэффициента энтропии K_{HS} симметрично-

го распределения. Пример пространства форм распределений, основанного на смеси нормального распределения и нормированной аппроксимации четвёртого порядка, показан на фигуре 6, где использованы следующие обозначения:

605 – положение кривой класса экспоненциальных распределений [18, 20];

610 и 615 – точки положения нормального и параболического распределений;

620, 625 и 630 – точки положения нормированных аппроксимаций четвёртого, шестого и восьмого порядка, соответственно;

635 и 640 – симметричные модели несимметричного гамма распределения с параметром формы равным 2, которые получены отображением значений относительно моды и математического ожидания, принятых в качестве центра распределения, соответственно;

645 и 650 – пример симметричных моделей несимметричной смеси нормальных смешанных распределений, полученные относительно моды и математического ожидания, соответственно;

655, 660, 665, 670, 675, 680, 658 и 690 – кривые смесей нормального распределения и нормированной аппроксимации четвёртого порядка при разных соотношениях их среднеквадратических разбросов равных 1,8, 2,2, 2,6, 3, 3,5, 4, 4,5 и 5, соответственно.

Для построений кривых плотности смесей $f_{smes}(y, K)$ распределения на фигуре 6 использовано соотношение вида:

$$f_{smes}(y, K) = K \cdot f_1(y, \sigma_1) + (1 - K) \cdot f_2(y, \sigma_2), \quad (24)$$

где K - коэффициент веса первой составляющей распределения; $f_1(y, \sigma_1)$ и $f_2(y, \sigma_2)$ - плотности первой и второй составляющих распределений; σ_1 и σ_2 - среднеквадратические разбросы значений первой и второй составляющих распределений.

На фигуре 6 использовано нормальное распределение в качестве первой составляющей смеси распределения (24) и нормированная аппроксимация четвёртого порядка в качестве второй составляющей смеси. При построении кривых пространства форм распределений на фигуре 6 варьировался коэффициент веса K составляющих распределений. Кривые построены при различных соотношениях среднеквадратического разброса нормированной аппроксимации четвёртого порядка к среднему квадратическому разбросу нормального распределения.

Из рассмотрения фигуры 6 следует, что формы смесей нормированной аппроксимации четвёртого порядка и нормального распределения покрывают значительную область возможных форм распределения. Полученные смеси могут использоваться в качестве симметричных моделей выходных параметров сложных стохастических систем.

Пространство форм может быть получено на основе смесей распределений, заданных на ограниченном интервале, и распределений, неограниченных на числовой оси: нормально-го распределения, распределения Лапласа, логистического распределения и других. Целевая плотность распределения формируется на основе модели стохастической системы или на основе априорно известной выборки данных. Выбор рабочей диаграммы осуществляется на основе оценки соответствия форм симметричной модели плотности распределения выходного параметра и симметричной модели целевой плотности распределения.

Описание алгоритма изобретения

Схема процесса на фигуре 7 иллюстрирует новые возможности и особенности предлагаемого *способа контроля неопределённости стохастической системы при условии получения оценки центра плотности распределения.*

Для реализации новых возможностей в предполагаемом изобретении проводятся следующие действия, иллюстрируемые в виде этапов процесса контроля на фигуре 7:

- этапа 710 определения асимметрии массива значений выходного параметра;
- этапа 715 проверки допустимости рассогласования асимметрии распределения массива значений области оптимального состояния системы;
- этапа 720 определения формы симметричной модели плотности распределения;
- этапа 725 определения интервала энтропийно-параметрической неопределённости симметричного массива;
- этапа 730 формирования интервала энтропийно-параметрической неопределённости симметричной модели плотности распределения выходного параметра;
- этапа 735 определения параметра масштаба симметричной модели плотности распределения выходного параметра;
- этапа 740 определения рассогласования неопределённостей симметричных моделей плотностей распределения;
- этапа 745 минимизации рассогласования неопределённости симметричной модели и симметричной целевой плотности распределения;
- этапа 750 формирования управляющего воздействия коррекции рассогласования интервалов неопределённостей;
- этапа 755 визуализации неопределённости стохастической системы.

Определения признака асимметрии для несимметричной плотности распределения массива значений выходного параметра системы

Первое отличительно действие, иллюстрируемое этапом 710 процесса на фигуре 7, состоит в определении асимметрии массива значений выходного параметра по формуле (4).

Огромное количество смещённых симметричных и несимметричных смесей распределений имеют асимметричность, характерную для внутренней организации сложного объекта. Изменение асимметричности распределения массива данных обусловлено изменением настроек и параметров стохастической системы. При оптимальном режиме стохастической системы асимметрия системы сохраняется в ограниченном интервале допустимых значений.

Проверка допустимости рассогласования асимметрии распределения массива значений области оптимального состояния системы

Второе отличительное действие, иллюстрируемое этапом 715 процесса на фигуре 7, необходимо для проверки допустимости рассогласования асимметрии распределения массива значений относительно значения асимметрии, характерного для области оптимального состояния. Если асимметрия находится за пределами интервала допустимых значений, то необходимо проведение трансформации закона распределения за счёт изменения настроек системы за счёт регулирования и изменения настраиваемых параметров стохастической системы. Для проверки используется неравенство (6), согласно которому модуль разности асимметрии распределения массива значений выходного параметра и асимметрии распределения оптимального состояния меньше критического значения разности асимметрий $\Delta Sk_{\text{крит}}$, ограничивающего область оптимального состояния системы.

Определение формы симметричной модели выходной плотности распределения стохастической системы

Третье отличительное действие, иллюстрируемое этапом 720 процесса на фигуре 7, состоит в определении формы симметричной модели плотности распределения.

Определение формы симметричной модели сводится к измерению дистанции симметричной модели выходной плотности распределения стохастической системы, заданной положением целевой моделью распределения.

Развёрнутая схема процессов этапа 720, реализующих определение формы симметричной модели плотности распределения дана на фигуре 8, где использованы следующие обозначения:

- этап 810 – выбор и определение центра несимметричного массива [Y] значений выходного параметра;
- этап 815 – формирование симметричного массива [Z];
- этап 820 – определение центральных моментов симметричного массива [Z];
- этап 825 определение контрэксцесса симметричного массива [Z];
- этап 830 – определение интервалов неопределённости симметричного массива [Z];

- этап 835 – определение коэффициента энтропии симметричного массива $[Z]$;
- этап 840 – определение критерия области контроля признаков формы;
- этап 845 – проверка принадлежности положения системы области контроля;
- этап 850 – определение дистанций между положениями возможных моделей и положением симметричного массива;
- этап 855 – выбор формы симметричной модели плотности распределения выходного параметра;
- этап 860 – определение вектора рассогласования признаков формы симметричной модели и целевой плотности;
- этап 865 – формирование управляющего воздействия для коррекции рассогласования признаков формы симметричной модели;
- этап 870 – принятие формы симметричной модели плотности распределения выходного параметра.

Содержание этапа 810 схемы процесса на фигуре 8 состоит в выборе и определении центра несимметричного массива значений $[Y]$ выходного параметра, в качестве которого может быть использованы математическое ожидание, мода, медиана или квантильные оценки центра несимметричного массива значений выходного параметра.

При выполнении этапа 815 схемы процесса на фигуре 8 осуществляется формирование симметричного массива $[Z]$, для чего путём переноса значений y_i массива $[Y]$ выходного параметра формируется массив $[Y^*]$ значений y_i^* таким образом, чтобы значения массивов располагались симметрично относительно оценки центра $y_{ц}$. Положение координат i -х значений массива $[Y^*]$ определяются по выражению (21). Симметричный массив значений $[Z]$ формируется в результате объединения двух массивов $[Y]$ и $[Y^*]$, координаты значений которых расположены симметрично относительно оценки центра $y_{ц}$ массива $[Y]$. Объединение массива выборочных значений выходного параметра $[Y]$ и массива отображённых относительно центра распределения $y_{ц}$ значений задано выражением:

$$[Z] = [Y] \cup (-[Y] + 2y_{ц}) \quad (25)$$

Массив выборочных значений величины $[Z]$ сохраняет многие свойства исходного массива значений $[Y]$. В частности, если в качестве центра распределения $y_{ц}$ принято математическое ожидание массива значений $[Y]$, то массивы значений $[Z]$ и $[Y]$ имеют одинаковые средние квадратические разбросы и контрэксцессы.

На этапе 820 проводится определение центральных моментов симметричного массива $[Z]$ по формулам (7) и (8), которые характеризуют свойства симметричного массива значе-

ний. Так как при выборе в качестве центра моды, медианы или другой оценки центра u_{Π} несимметричного массива $[Y]$ центральные моменты симметричного массива $[Z]$ равны робастным оценкам несимметричного массива $[Y]$, то для получения интервалов неопределённости и признаков форм симметричной модели плотности распределения выходного параметра требуется оценка центральных моментов симметричного массива.

На этапе 825 проводится определение контрэксцесса симметричного массива $[Z]$ значений выходного параметра. Контрэксцес симметричной модели плотности распределения определяется как отношение второго момента к корню квадратному четвёртого момента симметричного распределения, который рассчитывается по формуле (9).

При выполнении этапа 830 проводится определение интервалов неопределённости симметричного массива $[Z]$. Интервалы информационной и параметрической неопределённости представляют собой своеобразные «индикаторы» неопределённости распределений. Для определения интервала информационной неопределённости используется формула (10).

Интервала информационной неопределённости симметричного массива $[Z]$ для значений выходного параметра определяется как потенцирование информационной энтропии содержащейся в симметричном массиве $[Z]$:

$$\Delta_{HS} = \exp(-H(Z)),$$

где $H(Z)$ – информационная энтропия массива выборочных значений $[Z]$, равная математическому ожиданию логарифма вероятности для выборочных значений массива $[Z]$:

$$H(Z) = E(-\ln P_z(Z)).$$

Таким образом, интервал информационной неопределённости представляет меру Шеннона, полученную для массива $[Z]$ в единицах выходного параметра стохастической системы. Определение интервала энтропийной неопределённости Δ_{HS} следует рассматривать как *процесс косвенного измерения интервала неопределённости стохастической системы*.

Интервал параметрической неопределённости строится на основе центральных моментов распределения. В простом случае интервал определяется как корень квадратный от второго центрального момента, рассчитываемый по формуле (11), и представляет собой меру Эвклида для массива значений выходного параметра стохастической системы.

На этапе 835 проводится определение коэффициента энтропии симметричного массива $[Z]$ значений выходного параметра. Для определения коэффициента энтропии симметричной модели плотности распределения используется отношение интервала информационной неопределённости к интервалу параметрической неопределённости, определяемый по формуле (12).

При выполнении этапа 840 определяется критерий области контроля признаков формы. На этапе 840 для признаков формы симметричной целевой плотности распределения устанавливаются границы признаков, в которых допустим контроль системы. Для целевой плотности распределения оптимального состояния системы возможно выделение области работоспособных состояний. Интервалы изменения признаков формы симметричных моделей плотности распределения ограничены и могут быть определены либо путём моделирования объекта с использованием метода Монте-Карло либо посредством накопления статистических данных о стохастической системе и оценке интервалов признаков зоны контроля при условии, что система находится в работоспособном состоянии. При использовании метода Монте-Карло проводится наложение модели дестабилизирующих факторов на модель неопределённости стохастической системы заданной целевой плотностью выходного параметра. В этом случае признаки формы целевой плотности распределения принимают в качестве координат оптимального состояния пространства признаков формы симметричных моделей: контрэксцесса κ_{S0} и коэффициента энтропии K_{HS0} симметричных плотностей распределения. При накоплении статистических данных о работоспособных состояниях системы оптимальные признаки формы оцениваются как средние значения признаков из результатов наблюдения. В качестве интервалов в пространстве признаков формы симметричных моделей используются средние квадратические оценки разброса признаков контрэксцесса $\Delta\kappa_S$ и коэффициента энтропии ΔK_{HS} симметричных моделей относительно признаков контрэксцесса κ_{S0} и коэффициента энтропии K_{HS0} симметричной целевой плотности распределения стохастической системы. Границы области контроля устанавливаются из условия, что внутри границ области, в которых допустим контроль системы, находится 95 % рабочих состояний при различных дестабилизирующих воздействиях. Границы разброса признаков области контроля ограничены интервалами контрэксцесса $[\kappa_{S0} \pm \Delta\kappa_S]$ и коэффициента энтропии $[K_{HS0} \pm \Delta K_{HS}]$ в пространстве признаков формы симметричных моделей плотности распределения. Если положение состояния системы в пространстве признаков форм симметричных моделей задано вектором $[\kappa_S, K_{HS}]^T$, положение оптимального состояния стохастической системы задано вектором признаков целевой плотности распределения $[\kappa_{S0}, K_{HS0}]^T$, то для задания критерия границ удобно использовать отношение разностей координат векторов к их разбросам. Критерий границ пространства задан с помощью нормы вектора в виде

$$\gamma = \left(\left\| \frac{\begin{bmatrix} K_{HS} - K_{HS0} \\ \kappa_S - \kappa_{S0} \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \Delta K_{HS} \\ \Delta \kappa_S \end{bmatrix}} \right\| \geq 1 \right) \quad (26)$$

Из соотношения (26) следует, что при норме вектора большей или равной единице неравенство верно и критерий γ равен единице. В этом случае система находится за пределами области контроля и для её возврата в область контроля необходима трансформация симметричной плотности распределения посредством внешней настройки объекта или перенастройки системы для контроля системы в другой области. Процесс трансформации симметричной плотности распределения иллюстрирует этап 235 схемы процессов на фигуре 8. При значении критерия γ равном нулю система находится в области пространства контролируемого оптимального состояния стохастической системы. Проверка принадлежности положения системы области контроля проводится на этапе 845 схемы процессов определения формы симметричной модели распределения выходного параметра, показанной на фигуре 8.

В качестве примера области контролируемого пространства симметричной целевой плотности распределения при использовании m -нормы на фигуре 9 дан вариант пространства признаков форм распределений для области контроля стохастической системы, где использованы обозначения объектов:

- 905 – положение симметричной целевой плотности распределения;
- 910 – положение симметричного массива значений выходного параметра;
- 915 и 920 – интервалы разбросов контрэксцесса $[K_{S0} \pm \Delta K_S]$ и коэффициента энтропии $[K_{HS0} \pm \Delta K_{HS}]$, соответственно;
- 925 – область контролируемого пространства;
- 930, 935, 940, 945 – кривые смесей нормального распределения и нормированной аппроксимации четвёртого порядка при соотношениях их среднеквадратических разбросов, равными 2,46, 2,53, 2,649, 2,7, соответственно;
- 950 – вектор рассогласования признаков форм.

Пространство на фигуре 9 построено для симметричной целевой плотности распределения, в качестве которой использована симметричная модель несимметричного гамма распределения с параметром формы равным 2. Модель получена относительно среднего значения, принятого в качестве оценки центра. Для задания критерия границ пространства признаков форм распределений для области контроля стохастической системы использована m -норма, при которой выбирается максимальная координата вектора.

Вследствие воздействия влияющих факторов и изменчивости внутренней структуры стохастической системы её положение отличается от заданного положения симметричной целевой плотности распределения. Позиционирование системы в пространстве признаков форм распределений происходит путём замены положения симметричного массива значений

выходного параметра с помощью симметричной модели плотности распределения из условия минимума дистанции между положениями массива и модели распределения.

Для выбора формы симметричной модели плотности распределения выходного параметра на этапе 850 схемы процессов на фигуре 8 проводят определение дистанции ΔL_j между положениями возможных моделей и положением симметричного массива значений выходного параметра по формуле (14).

На этапе 855 схемы процессов на фигуре 8 проводят выбор формы симметричной модели плотности распределения выходного параметра с помощью условия (15), согласно которого дистанция между положением модели плотности распределения и положением симметричного массива имеет минимальное значение. Выбор модели позволяет сопоставить состоянию стохастической системы, характеризуемому массивом значений выходного параметра, форму симметричной модели плотности распределения.

На этапе 860 схемы процессов на фигуре 8 определяют вектор рассогласования признаков формы симметричной модели плотности распределения и симметричной целевой плотности распределения выходного параметра стохастической системы. На фигуре 9 вектор рассогласования признаков форм иллюстрирует объект 950. Вектор рассогласования признаков форм определяет направление коррекции формы симметричной модели плотности распределения в пространстве признаков форм распределений для обеспечения отслеживания трека симметричной целевой плотности распределения.

На следующем этапе 865 проводится формирование управляющего воздействия для коррекции рассогласования признаков формы симметричной модели посредством изменения настроек системы или изменения входных воздействий. Этап 870 схемы на фигуре 8 иллюстрирует процесс принятия формы симметричной модели плотности распределения выходного параметра.

Определение интервала энтропийно-параметрической неопределённости симметричного массива значений выходного параметра стохастической системы

Четвёртое отличительное действие, иллюстрируемое этапом 725 процесса на фигуре 7 состоит в определении интервала энтропийно-параметрической неопределённости симметричного массива значений выходного параметра по формуле (17), равного среднему квадратическому значению суммы интервалов энтропийной и параметрической неопределённости симметричного массива.

Интервал энтропийной и параметрической неопределённости характеризует состояние стохастической системы и измеряется в единицах меры выходного параметра стохастической системы. Определение интервала энтропийно-параметрической неопределённости

соответствует измерению однородной величины, при которой искомое значение физической величины определяется на основе результата прямых измерений отсчётов y_i выходного параметра функционально связанного с искомой величиной.

Масштаб симметричной модели плотности распределения выходного параметра можно найти из сопоставления интервалов неопределённости симметричной модели плотности распределения и симметричного массива значений выходного параметра. Для пояснения процесса определения масштаба симметричной модели на фигуре 10 приведён чертёж пространства энтропийной и параметрической неопределённостей, где использованы обозначения:

1005 – начало координат пространства энтропийной и параметрической неопределённостей;

1010 – точка положения симметричной целевой плотности распределения;

1015 – точка положения симметричного массива значений выходного параметра;

1020 – дистанция энтропийно-параметрической неопределённости симметричной целевой плотности распределения;

1025 – дистанция энтропийно-параметрической неопределённости симметричного массива;

1030 – линия положения симметричных моделей плотности распределения с выбранной формой;

1035 – эквипотенциаль энтропийно-параметрической неопределённости, равная дистанции интервала симметричной целевой плотности распределения;

1040 – эквипотенциаль энтропийно-параметрической неопределённости, равная дистанции интервала симметричного массива значений выходного параметра;

1045 – точка положения симметричной модели выбранной формой с интервалом энтропийно-параметрической неопределённости целевой плотности распределения;

1050 – точка положения симметричной модели выбранной формой с интервалом энтропийно-параметрической неопределённости симметричного массива значений;

1055 – дистанция рассогласование энтропийно-параметрической неопределённости для симметричной модели плотности распределения.

Признаки формы симметричной целевой плотности распределения выходного параметра стохастической системы хранятся в базе эталонных параметров. Положение целевой плотности распределения задано точкой 1010 с координатами Δ_{HS0} и Δ_{PS0} , равными интервалам энтропийной и параметрической неопределённостей, соответственно. Направление ди-

станции 1020 в пространстве интервалов энтропийной и параметрической неопределённости определено коэффициентом энтропии K_{HS0} симметричной целевой плотности распределения выходного параметра, равным тангенсу угла наклона дистанции 1020. Коэффициент энтропии целевой плотности распределения задан отношением

$$K_{HS0} = \frac{\Delta_{HS0}}{\Delta_{PS0}} \quad (27)$$

Точка положения 1015 симметричного массива значений $[Z]$ отображает положение стохастической системы в пространстве интервалов энтропийной и параметрической неопределённости. Координаты точки 1015, равные *интервалам информационной и параметрической неопределённости* симметричного массива значений выходного параметра стохастической системы, определены по формулам (10) и (11), соответственно. Направление дистанции 1025 энтропийно-параметрической неопределённости симметричного массива значений $[Z]$ определено коэффициентом энтропии K_{HS} симметричного массива $[Z]$, рассчитанному по формуле (27). Коэффициент энтропии K_{HS} равен тангенсу угла наклона дистанции 1025.

Для определения масштаба симметричной модели плотности распределения выполняются следующие отличительные действия, иллюстрируемые этапами 730 и 735 процесса на фигуре 7.

Формирование интервала энтропийно-параметрической неопределённости симметричной модели плотности распределения выходного параметра

Этап 730 на фигуре 7 иллюстрирует процесс формирования интервала энтропийно-параметрической неопределённости симметричной модели плотности распределения выходного параметра с использованием выражения

$$\Delta_{HPS}^M = \sqrt{\left(\left(K_{HS\lambda}^M \right)^2 + 1 \right) \cdot \mu_{2\lambda}}, \quad (28)$$

где $K_{HS\lambda}^M$ – коэффициент энтропии симметричной модели плотности распределения, $\mu_{2\lambda}$ – второй центральный момент плотности смеси распределений.

Второй центральный момент плотности смесей $f_{smes}(y, K)$ распределения равен

$$\mu_{2\lambda} = \int_{-\infty}^{\infty} f_{smes}(y, K) \cdot (y - M)^2 dy. \quad (29)$$

Выполнив подстановку (24) плотности смесей $f_{smes}(y, K)$ в выражение для второго центрального момента (29) смеси распределения, и выполнив преобразования, получим, что выражение для второго центрального момента плотности смеси распределения имеет вид

$$\mu_{2\lambda} = K \cdot \mu_{21} + (1-K) \cdot \mu_{22}. \quad (30)$$

Здесь μ_{21} и μ_{22} – вторые центральные моменты первой и второй составляющих плотности распределения смеси, соответственно.

Отношение средних квадратических разбросов для каждой кривой плотности распределений смеси на фигуре 6 задано в виде:

$$s = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \sqrt{\frac{\mu_{22}}{\mu_{21}}}, \quad (31)$$

где σ_1 и σ_2 – среднее квадратические разбросы первой и второй составляющих распределения смеси.

Тогда второй центральный момент $\mu_{2\lambda}$ плотности смесей $f_{smes}(y, K)$ распределения можно выразить с помощью среднего квадратического разброса первой и второй составляющих смесь

$$\begin{aligned} \mu_{2\lambda} &= \left(K(1-s^2) + s^2 \right) \cdot \sigma_1^2, \\ \mu_{2\lambda} &= \left(K \left(\frac{1}{s^2} - 1 \right) + 1 \right) \cdot \sigma_2^2, \end{aligned} \quad (32)$$

Выполнив подстановку (32) второго центрального момента $\mu_{2\lambda}$ плотности смесей $f_{smes}(y, K)$ распределения в выражение (28) получим выражения, связывающие интервал энтропийно-параметрической неопределённости симметричной модели плотности распределения выходного параметра и средний квадратический разброс σ_1 или σ_2 одной из составляющих смеси распределений в виде

$$\begin{aligned} \Delta_{HPN}^M &= \sqrt{\left(\left(K_{HS\lambda}^M \right)^2 + 1 \right) \cdot \left(K \cdot (1-s^2) + s^2 \right) \cdot \sigma_1}, \\ \Delta_{HPN}^M &= \sqrt{\left(\left(K_{HS\lambda}^M \right)^2 + 1 \right) \cdot \left(K \cdot \left(\frac{1}{s^2} - 1 \right) + 1 \right) \cdot \sigma_2}. \end{aligned} \quad (33)$$

Определение параметра масштаба симметричной модели плотности распределения выходного параметра

Этап 735 фигуры 7 состоит в определении параметров масштаба симметричной модели плотности распределения выходного параметра. Выражения для определения параметров масштаба составляющих смеси получим, преобразовав выражения (33) относительно неизвестных средних квадратических разбросов составляющих смеси распределения.

Выражения для средних квадратических разбросов примут вид

$$\sigma_1 = \frac{\Delta_{HPS}^M}{\sqrt{\left((K_{HPS}^M)^2 + 1\right) \cdot (K \cdot (1 - s^2) + s^2)}}, \quad (34)$$

$$\sigma_2 = s \cdot \sigma_1.$$

Для распределения Гаусса параметр масштаба λ_1 в выражении (34) равен среднему квадратическому разбросу σ_1 составляющего смесь распределения. Для других симметричных распределений параметр масштаба λ_1 пропорционален среднему квадратическому разбросу σ_1 . Согласно выражению (34) среднеквадратический разброс σ_1 и, как следствие, параметр масштаба λ_1 , пропорциональны интервалу энтропийно-параметрической неопределённости Δ_{HPS}^M симметричной модели плотности распределения выходного параметра с известными значениями коэффициента энтропии K_{HPS}^M симметричной модели, коэффициента веса K и отношения s средних квадратических разбросов для составляющих смеси (24).

Таким образом, интервал энтропийно-параметрической неопределённости модели определяет её параметр масштаба. При этом интервал энтропийно-параметрической неопределённости качественно отличается от оценки среднего квадратического разброса, так как дополнительно учитывает информационные свойства модели. Так как положение точек симметричного массива значений и симметричной модели распределения выходного параметра отличаются в пространстве интервалов энтропийной и параметрической неопределённости, для определения параметра масштаба симметричной модели плотности распределения выходного параметра используется условие (19) минимума разницы интервалов энтропийно-параметрических неопределённости симметричного массива значений выходного параметра и симметричной модели распределения выходного параметра

Определение рассогласования интервалов энтропийно-параметрических неопределённости симметричных моделей плотности распределения выходного параметра и симметричной целевой плотности распределения

Следующий этап 740 схемы на фигуре 7 иллюстрирует процесс определения рассогласования неопределённости симметричных моделей плотностей распределений, найденных для симметричного массива значений выходного параметра и симметричной целевой плотности распределения стохастической системы.

Вследствие воздействия влияющих факторов положение 1015 стохастической системы в пространстве интервалов энтропийной и параметрической неопределённости отлично от точки положения 1010 целевой плотности распределения. Для позиционирования стохастической системы в пространстве интервалов энтропийной и параметрической неопреде-

лённостей используется симметричная модель плотности распределения выходного параметра, выбираемой из условия минимума в пространстве признаков формы контрэксцесса и коэффициента энтропии симметричных моделей, иллюстрируемого фигурой 6. Следовательно, коэффициент энтропии симметричной модели отличен от коэффициента энтропии как симметричного массива значений $[Z]$, так и симметричной целевой плотности распределения. Линия 1030 на фигуре 10 иллюстрирует возможные положения симметричных моделей плотности распределения с выбранной формой. Положения стохастической системы в пространстве интервалов энтропийной и параметрической неопределённостей задано положением модели 1050 пересечения линии 1030 симметричных моделей и эквипотенциали 1040 энтропийно-параметрической неопределённости симметричного массива значений выходного параметра. Точка положения модели 1050 иллюстрирует проекцию дистанции 1025 на направление линии 1030 моделей с выбранной формой.

Оптимальному состоянию стохастической системы соответствует положения 1010 симметричной целевой плотности распределения, которое в пространстве интервалов энтропийно-параметрической неопределённости отлично от линии 1030 положения симметричных моделей плотности распределения с выбранной формой. Поэтому положение 1010 симметричной целевой плотности распределения заменяется положением модели 1045 пересечения линии 1030 симметричных моделей и эквипотенциали 1035 энтропийно-параметрической неопределённости симметричной целевой плотности распределения. Тогда рассогласованию энтропийно-параметрической неопределённости для симметричной модели плотности распределения соответствует дистанция 1055. Рассогласование интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей симметричной модели плотности распределения выходного параметра Δ_{HPS}^m и симметричной целевой плотности распределения Δ_{HPS}^u определяется по формуле (20).

На фигуре 10 рассогласование интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей симметричных моделей плотности распределения выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы иллюстрирует дистанция 1055 между точками положения 1050 и 1045 интервалов неопределённости симметричных моделей.

Минимизация рассогласования интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей симметричной модели плотностей распределений выходного параметра и симметричной целевой плотности распределения

На этапе 745 схемы процессов фигуры 7 проводят минимизацию рассогласования неопределённостей симметричной модели и симметричной целевой плотности распределения.

Дистанция 1055 соответствует рассогласованию интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей симметричных моделей распределения выходного параметра и целевой плотности распределения, заданных точками положения 1050 и 1045 стохастической системы в пространстве интервалов неопределённостей, соответственно. Пунктирные линии 1040 и 1035 иллюстрируют эквипотенциали, точки которых имеют одинаковые значения равные дистанциям 1025 и 1020 интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей массива значений выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы. Переход симметричной модели плотности распределения из точки положения 1050 в точку положения 1045 при проведении корректировки рассогласования на этапе 250 масштаба неопределённости иллюстрирует минимизацию рассогласования неопределённости стохастической системы. Формирование управляющего воздействия коррекции рассогласования масштабов моделей неопределённостей на этапе 750 схемы процессов на фигуре 7 необходимо для физического изменения регулируемых параметров стохастической системы. Сохранившееся рассогласование после коррекции системы иллюстрируют точки положения 1010 и 1045 симметричной целевой плотности распределения и её модели, уменьшение которого возможно только за счёт коррекции формы симметричной модели плотности распределения выходного параметра стохастической системы. Результат коррекции будет получен при обработке массива значений выходного параметра следующего цикла стохастической системы.

Визуализация модели неопределённости стохастической системы

Заключительный этап 755 схемы процессов на фигуре 7 состоит в визуализации неопределённости стохастической системы для оценки оптимальности её состояния. Из записанного выражения (33) следует, что интервал неопределённости $\Delta_{H/K}^*$ пропорционален среднему квадратическому разбросу составляющей смеси распределения и, следовательно, может быть выражен через параметр масштаба λ этого распределения.

Таким образом, для обеспечения надёжности контроля неопределённости системы при условии, что получена оценка центра смеси распределений выходного параметра, автором изобретения предложено отслеживать модель симметричной относительно центра плотности распределения, которая может быть сравнительно просто восстановлена в пространстве коэффициента энтропии и контрэкссесса с помощью простых функций или их смесей. Благодаря использованию симметричной модели плотности распределения при условии оценки центра массива выходного параметра исключается влияние смещения массива на определение формы и масштаба контролируемой неопределённости стохастической системы. Нали-

чие восстановленной кривой симметричной модели плотности распределения важно для организации систем с использованием пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования.

Аппроксимация сортированного ряда массива значений выходного параметра

Особенности контроля с помощью моментов высокого порядка иллюстрируют аппроксимации сортированных рядов данных, опубликованные ранее заявителем в работах [10, 21]. Для построения аппроксимации сортированного ряда по характеристикам распределения выходного параметра стохастической системы возможно использование формулы статистического ряда, заданной в виде:

$$y_i = Me(Y) + \sigma(Y) \frac{\tau_{1/2} - \tau_i}{\Delta\tau \cdot i!} \left(1 + \sum_{s=1}^k \frac{\mu_s(Y)}{(\mu_2(Y))^s} \cdot \frac{(\tau_{1/2} - \tau_i)^{s-2}}{\Delta\tau^{s-2} \cdot (s-1)!} \right), \quad (35)$$

где $Me(Y)$, $M(Y)$ и $\sigma(Y)$ – медиана, математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение массива значений выборки Y ; $\tau_{1/2}$ – интервал времени, равный половине периода τ_n цикла регистрации; $\Delta\tau$ – варьируемый параметр распределения:

$$\Delta\tau = k \cdot \frac{\tau_n}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

Здесь k – коэффициент вариации, значения которого находятся в пределах от 1 до 3, позволяет изменять наклон аппроксимации в точке положения медианы сортированного ряда.

Если параметр τ нормировать по предельному значению (т.е. $\tau_n=1$) и определить через параметр y , то зависимость $\tau(y)$ имеет смысл распределения значений массива $[Y]$ выходного параметра:

$$\tau(y) = F(y, Me, \sigma, \mu_2, \dots, \mu_s, \dots). \quad (36)$$

Тогда плотность распределения выходного параметра стохастической системы задана в виде плотности распределения значений массива $[Y]$ выходного параметра:

$$\rho(y) = \frac{d\tau(y)}{dy} = f(y, Me, \sigma, \mu_2, \dots, \mu_s, \dots). \quad (37)$$

Из полученного выражение (37) следует, что плотность распределения выходного параметра определена через центральные моменты s -го порядка и, как следствие, может быть контролируема посредством контроля моментов распределения. По этой причине заявитель считает, что выражение (35) может быть использовано для построения устройств псевдо-ПИД-контроля неопределённости стохастической системы при отслеживании трека целевой плотности распределения выходного параметра.

Упрощенная форма аппроксимации сортированного ряда для массива значений выходного параметра стохастической системы

Особенность формулы аппроксимации статистического ряда (35) в том, что моменты распределения содержат свойства производных высокого порядка, что иллюстрируется в ряде работ заявителя [10. 21]. По этой причине моменты распределения могут быть использованы для построения схем пропорционально-интегрально-дифференциального контроля стохастической системы. Если аппроксимация построена при ограничении разложения до центрального момента 4-го порядка, то аппроксимация сортированного ряда значений массива [Y] выходного параметра стохастической системы принимает упрощённую форму [10. 21]:

$$y_i = Me(Y) + \sigma(Y) \left(\frac{\tau_{1/2} - \tau_i}{\Delta\tau \cdot 1!} + Sk(Y) \frac{(\tau_{1/2} - \tau_i)^2}{\Delta\tau^2 \cdot 2!} + Ex(Y) \frac{(\tau_{1/2} - \tau_i)^3}{\Delta\tau^3 \cdot 3!} \right). \quad (38)$$

Здесь $As(Y)$ и $Ex(Y)$ – асимметрия и эксцесс массива [Y] значений выходного параметра.

Как видно из (35) и (38) аппроксимации сортированного ряда строятся относительно вспомогательного параметра τ , характеризующего длительность временного интервала получения выборки данных. При контроле параметрической неопределённости стохастической системы проводится отслеживание разности между контролируемым параметром и оценкой центра распределения. Формально выражение для определения значений аппроксимации сортированного ряда значений массива выходного параметра, смещённого относительно медианы распределения имеет вид:

$$\Delta y_i = y_i - Me(Y) = \sigma(Y) \left(\frac{\tau_{1/2} - \tau_i}{\Delta\tau \cdot 1!} + Sk(Y) \frac{(\tau_{1/2} - \tau_i)^2}{\Delta\tau^2 \cdot 2!} + Ex(Y) \frac{(\tau_{1/2} - \tau_i)^3}{\Delta\tau^3 \cdot 3!} \right). \quad (39)$$

Как видим из выражения (39), неопределённость выходного параметра зависит как от среднего квадратического разброса, так и от параметров асимметрии и эксцесса. Из статистики известно, что асимметрия и эксцесс распределения являются независимыми признаками формы распределения. Средне квадратический разброс представляет собой интегральную характеристику масштабирования разложения (39).

Заявитель использует выражения (35), (38) и (39) для построения псевдо-ПИД-контроля неопределённости стохастической системы при отслеживании трека целевой плотности распределения выходного параметра.

Устройство контроля неопределённости стохастической системы

Поскольку при различных воздействиях на стохастическую систему изменение выходного параметра содержит случайную составляющую, для выявления детерминированных свойств стохастической системы характер изменения выходного параметра оценивается за

промежуток времени сопоставимый с периодическими и переходными процессами в системе. По этой причине для оценки качества регулирования следует проводить сравнение статистических и информационных характеристик распределений выходного параметра, отражающих неопределённость стохастической системы.

В основу структуры устройства параметрического контроля неопределённости стохастической системы положены формулы статистического ряда (35), (38) и (39).

Устройство параметрического контроля неопределённости стохастической системы.

Схема устройства параметрического контроля неопределённости стохастической системы дана на фигуре 11. При построении контроля используется разложение статистического ряда (38). На схеме использованы следующие обозначения:

110 – блок измерения значений выходного параметра стохастической системы, выполненный;

115 – блок формирования массива значений выходного параметра стохастической системы;

135 – блок формирования целевой плотности распределения, выполненной с возможностью получения массива значений в соответствии с математической моделью целевой плотности распределения;

1110 – блок определения центральных моментов массива значений $[Y]$ выходного параметра, предназначенного для определения математического ожидания, второго, третьего и четвёртого центральных моментов выходного параметра;

1115 – блок определения параметров неопределённости массива значений $[Y]$;

1120 – блок определения центральных моментов целевого распределения выходного параметра, предназначенного для определения математического ожидания и центральных моментов целевой плотности распределения;

1125 – блок определения параметров неопределённости целевой плотности распределения;

1130 – блок сумматоров, содержащего сумматор 1135 интервалов параметрических неопределённостей массива значений выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы; сумматоры 1140 и 1145 параметрических признаков формы асимметрии и эксцесса массива значений выходного параметра и целевого распределения стохастической системы;

1150 – блок настройки пропорциональностей рассогласований, содержащего блоки 1155, 1160 и 1165, предназначенные для установления пропорциональности рассогласования

интервалов параметрических неопределённостей, рассогласования асимметрии и рассогласования эксцессов между массивом значений $[Y]$ выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы, соответственно;

1170 – блок формирования управляющего воздействия коррекции рассогласований интервалов неопределённостей стохастической системы.

Дистанция неопределённости стохастической системы задаёт область наиболее вероятных значений выходного параметра. Эксцесс Ex и асимметрия Sk распределения характеризуют отклонение *формы* плотности распределения $p(y,t)$ массива значений $[Y]$ от *целевой плотности* распределения $p_0(y)$ выходного параметра. Действие влияющего фактора изменяет форму распределения и, как следствие, отражается в коэффициентах формы: асимметрии и эксцессе распределения. Особое значение имеет *асимметрия* как наиболее важное свойство плотности распределения выходного параметра, характеризующая несимметричность распределения данных относительно центра. Из аппроксимации сортированного ряда (38) следует, что при анализе формы распределения асимметрия и эксцесс подобны операторам второй и третьей производных по отношению к параметру t , характеризующим состав значений выходного параметра в массиве. Поэтому, при построении устройства псевдо-PID-контроля плотности распределения в качестве пропорционального параметра принимается асимметрия распределения. Тогда эксцесс соответствует дифференциальной характеристики формы распределения. Масштабирование неопределённости происходит при изменении дистанции параметрической неопределённости. Поэтому среднеквадратическое отклонение характеризует интегральный параметр – дистанцию неопределённости выходного параметра. По этой причине для сравнения выходного распределения реального состояния стохастической системы в текущий момент времени с целевым распределением оптимального состояния системы достаточно обеспечить сопоставление коэффициентов формы и масштаба распределения. В технологическом конвейере обработки информации используется следующая последовательность этапов.

Последовательность этапов технологического конвейера обработки информации

Этап 1: регистрация и формирование массива выходного параметра стохастической системы

Согласно схеме на фигуре 11 параметр контролируемого процесса на выходе стохастической системы 105 – выходной параметр $y(t)$ – измеряется с помощью измерительного устройства 110. Блок 115 формирования массива значений выходного параметра стохастической системы регистрирует дискретные значения y_i и формирует массив значений $[Y]$ вы-

ходного параметра, полученных во временном промежутке τ_n , группируя данных по интервалам.

Этап 2: определение характеристик массива значений [Y] выходного параметра.

Плотность распределения выходного параметра определяется с помощью характеристик центральных моментов распределения массива значений [Y]. Блок 1110 предназначен для определения центральных моментов массива значений [Y] выходного параметра. Для определения используется выражение вида:

$$\mu_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - M)^j. \quad (40)$$

Полученные центральных моментов массива значений [Y] используются для определения характеристик среднего квадратического отклонения σ , асимметрии Sk и эксцесса Ex массива значений [Y] выходного параметра стохастической системы. Блок 1115 иллюстрирует процесс определения параметров неопределённости массива значений [Y]: интервала параметрической неопределённости, заданного параметром среднего квадратического разброса σ , и параметрических признаков формы: асимметрии As и эксцесса Ex . Средний квадратический разброс характеризует интервал параметрической неопределённости распределения выходного параметра и определён как корень квадратный второго центрального момента по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\mu_2}, \quad (41)$$

Для определения асимметрии и эксцесса распределения используется формулы

$$Sk = \frac{\mu_3}{\sqrt{\mu_2^3}}, \quad Ex = \frac{\mu_4}{\mu_2^2}. \quad (42)$$

Таким образом, полученные характеристики массива значений [Y] выходного параметра содержат информацию об форме и масштабе распределения.

Этап 3: оценка рассогласования плотности распределения выходного параметра.

Рассогласование плотности распределения выходного параметра оценивается относительно целевой плотности распределения, выборку которого формирует блок 135. Для оценки рассогласования плотностей распределения блок 1120 определяет центральные моменты целевого распределения выходного распределения. Блоки 1125 иллюстрирует определение параметров неопределённости целевой плотности распределения стохастической системы: интервала параметрической неопределённости, заданного параметром среднего квадратического разброса σ_0 , и параметрических признаков формы: асимметрии Sk_0 и эксцесса Ex_0 .

Для сравнения плотностей значений массива $[Y]$ и целевого распределений выходного параметра блок сумматоров 1130 содержит сумматоры с одним инверсным входом, что позволяет получить рассогласование интервалов неопределённости и признаков формы распределения выходного параметра. Сумматоры 1140 и 1145 определяют рассогласование асимметрий δS_k и рассогласование эксцессов δE_x массива значений выходного параметра и целевого распределения стохастической системы. Сумматор 1135 определяет рассогласование дистанций интервалов параметрических неопределённостей $\delta\sigma$ массива значений выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы.

Этап 4: формирование управляющего воздействия.

Оценки рассогласований признаков формы и дистанций интервалов неопределённостей распределения выходного параметра относительно целевой плотности распределения предназначены для формирования управляющего воздействия коррекции неопределённости стохастической системы.

Для настройки устройства параметрического контроля неопределённости стохастической системы в обратную связь системы контроля включен блок 1150 настройки пропорциональностей рассогласований, содержащего блоки настройки пропорциональности с изменяемыми коэффициентами усиления рассогласований параметров неопределённости массива значений $[Y]$ выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы, соответственно. Блоки 1160 и 1165 предназначены для изменения коэффициентов усиления рассогласований пропорциональной и дифференциальной составляющих признаков форм массива значений $[Y]$ выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы. Блок 1160 изменяет коэффициент усиления рассогласования асимметрии. Блок 1165 изменяет коэффициент усиления рассогласования эксцессов. Блок 1155 предназначен для изменения коэффициента усиления рассогласования дистанций параметрических неопределённостей массива $[Y]$ и целевого распределений выходного параметра. Сигналы рассогласований на выходе блоков настройки пропорциональности суммируются и/или используются устройством 1170 для формирования управляющего воздействия $[u]$ коррекции рассогласований интервалов неопределённостей посредством изменения параметров и связей стохастической системы.

Таким образом, схема устройства на фигуре 11 реализует контроль неопределённости стохастической системы путём отслеживания параметрических характеристик формы и масштаба плотности распределений массива $[Y]$ значений выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы. Настройка системы достигается измене-

нием коэффициентов усиления (передачи) блоков изменяет коэффициент усиления рассогласования 1155, 1160 и 1165.

Заявитель отмечает, что несмотря на использование моментов высокого порядка и коэффициентов формы асимметрии и эксцесса для построения схем контроля стохастических систем, устройство параметрического псевдо-ПИД контроля неопределённости стохастической системы, предлагаемого по п.2 изобретения отсутствует в современной литературе.

Устройство энтропийно–параметрического контроля неопределённости стохастической системы

Недостаток контроля неопределённости, построенного на основе статистических рядов (35) и (38) состоит в следующем. Отслеживание только двух признаков формы асимметрии и эксцесса при установлении контроля неопределённости стохастической системы не обеспечивает стабильности определения формы, так как этим параметрам соответствует огромное количество несимметричных распределений и их смесей с различной формой. Увеличение количества параметров ряда так же не дают положительного результата из-за увеличения нестабильности моментов высокого порядка.

Так как на стабильность контроля неопределённости стохастической системы посредством отслеживания трека целевой плотности распределения влияет анализ формы распределения, то уменьшить расхождение между целевым и реальным распределениями выходного параметра возможно за счёт включения в обратную связь устройств анализа формы распределения. Обеспечить контроль неопределённости стохастической системы позволяют информационные характеристики распределения: интервал энтропийной неопределённости как информационной характеристики неопределённости стохастической системы и энтропийный коэффициент распределений как независимый признак формы распределения.

В случае, если распределения выходного параметра стохастической системы представляет наложение симметричных и несимметричных распределений, то форму распределения выходного параметра стохастической системы можно характеризовать коэффициентом асимметрии распределения и симметричной моделью распределения, полученной относительно оценки центра распределения и, как показано в описании заявки, сохраняющей многие свойства несимметричного распределения. По этой причине применение контроля формы симметричного распределения, сформированного при известной оценке центра плотности распределения, позволяет улучшить стабильность контроля за счёт анализа формы в энтропийно-параметрическом пространстве.

На фигуре 12 дана схема устройства энтропийно–параметрического контроля неопределённости стохастической системы. Предлагаемое устройство является реализацией спосо-

ба контроля неопределённости стохастической системы при условной оценке центра плотности распределения. На схеме использованы следующие обозначения:

- 110 – блок измерения значений выходного параметра стохастической системы;
- 115 – блок формирования массива значений выходного параметра;
- 1110 – блок определения центральных моментов массива значений $[Y]$ выходного параметра;
- 1210 – блок определения асимметрии плотности распределения значений массива $[Y]$;
- 1215 – блок формирования симметричного массива $[Z]$ выходного параметра;
- 1220 – блок определения центральных моментов и интервалов неопределённостей симметричного массива $[Z]$;
- 1225 – блок определения параметров симметричного массива $[Z]$;
- 1230 – блок формирования воздействия для трансформации распределения выходного параметра стохастической системы;
- 1235 – блок выбора формы симметричной модели с известными коэффициентом энтропии и контрэксцесса;
- 1240 – блок формирования целевой плотности симметричного распределения;
- 1245 – блок определения параметров целевой плотности симметричного распределения;
- 1250 – блок сумматоров, содержащего сумматор 1145 параметрических признаков (скошенности формы) асимметрии массива значений выходного параметра и его эталонного значения; сумматор 1265 интервалов энтропино–параметрической неопределённости симметричного массива $[Z]$ и целевого плотности симметричного распределений выходного параметра стохастической системы; сумматор контрэксцессов 1260 и сумматор коэффициентов энтропий 1255;
- 1270 – блок настройки пропорциональностей рассогласований, содержащего блок 1165 установления пропорциональностей рассогласований асимметрии массива значений $[Y]$ выходного параметра и его эталонного значения, блоки 1275, 1280 и 1285 установления пропорциональностей рассогласования коэффициентов энтропий, рассогласования контрэксцессов и рассогласования интервалов энтропино–параметрической неопределённости симметричного массива $[Z]$ и целевого плотности симметричного распределений выходного параметра стохастической системы;
- 1290 – блок формирования управляющего воздействия для коррекции рассогласования интервалов неопределённости стохастической системы.

Схема устройства на фигуре 12 представляет собой «технологический» конвейер, реализующий предлагаемый способ энтропийно–параметрического контроля неопределённости стохастической системы. Применение симметричной модели плотности распределения, полученной относительно оценки центра распределения, обеспечивает симметрию дистанций энтропийной и параметрической неопределённости. Как показано выше, симметричные модели плотности распределения сохраняют свойства массива $[Y]$ значений выходного параметра стохастической системы.

Этап 1: регистрация и формирование массива выходного параметра стохастической системы

Согласно схеме на фигуре 12 параметр $y(t)$ контролируемого процесса стохастической системы 105 измеряется с помощью устройства 110. Блок 115 формирования массива значений выходного параметра стохастической системы формирует массив значений $[Y]$ выходного параметра, полученных во временном промежутке τ_n посредством группируя данных по интервалам.

Этап 2: определение характеристик массива значений $[Y]$ выходного параметра.

Схема обратной связи содержит параллельные структуры для контроля асимметрии массива $[Y]$ и обеспечения сравнения масштаба и формы симметричной модели выходной плотности распределения стохастической системы с масштабом и формой её целевой плотности распределения. По этой причине на этапе 2 структурной схемы устройства, реализующий предлагаемый способ контроля неопределённости стохастической системы, содержатся параллельные структуры.

Для контроля асимметрии схема на фигуре 12 содержит блок 1110 определения центральных моментов массива значений $[Y]$ выходного параметра, где происходит определение математического ожидания и центральных моментов 2-го и 3-го порядка для массива $[Y]$ значений выходного параметра. Блок 1210 реализует определение асимметрии Sk плотности распределения значений массива $[Y]$.

Для анализа формы и масштаба используется симметричная модель распределения выходного параметра. Блок 1215 схемы на фигуре 12 формирования симметричного массива $[Z]$ выходного параметра иллюстрирует процесс выбора оценки центра симметрии y_n массива $[Y]$, процесс определения оценки центра и процесс формирования симметричного массива $[Z]$ выходного параметра согласно выражения (18). Блок 1220 схемы на фигуре 12 определения центральных моментов и интервалов неопределённостей симметричного массива $[Z]$ реализует как определения центральных моментов второго и четвёртого порядка по формулам

(7) и (8), так и определение интервала энтропийной и параметрической неопределённости симметричного массива $[Z]$ с использованием формул (10) и (11), соответственно.

Блок 1225 схемы на фигуре 12 определения параметров симметричного массива $[Z]$, реализует определение интервала энтропийно–параметрической неопределённости Δ_{HPS} по формуле (17), признаков формы контрэксцесса κ и коэффициента энтропии K_{HS} симметричного массива $[Z]$ по формулам (9) и (12), соответственно, и критерия проверки γ принадлежности симметричной модели области контроля признаков формы симметричной целевой плотности распределения по формуле (13). Если система выходит из зоны контроля, то критерий проверки γ равен 1. При выходе системы из зоны контроля блок 1230 формирует воздействие для трансформации распределения выходного параметра стохастической системы при выходе признаков формы контрэксцесса κ и коэффициента энтропии K_{HS} за пределы области контроля.

Признаки формы контрэксцесса κ и коэффициента энтропии K_{HS} симметричного массива $[Z]$ используются блок 1235 для выбора формы симметричной модели с известными коэффициентом энтропии и контрэксцесса. Для выбора формы модели распределения блок 1235 определяет дистанции ΔL_j между положением возможных моделей и положением симметричного массива $[Z]$ значений выходного параметра по формуле (14). Выбор формы модели осуществляется так же блоком 1235 на основе условия (15) минимума дистанции между положением возможной модели с номером s и положением симметричного массива $[Z]$ значений выходного параметра. На выходе блока 1235 устанавливаются коэффициент энтропии K_{HS}^M и контрэксцесс κ^M выбранной модели. Блок 1235 позволяет получить номер s симметричной модели, форма которой наиболее приближенной к форме симметричного массива $[Z]$ значений выходного параметра. Номер модели используется для установления связей формирователя 1290.

Этап 3: оценка рассогласования плотности распределения выходного параметра.

Рассогласование симметричной модели плотности распределения выходного параметра оценивается относительно симметричной целевой плотности распределения, для которого блок 1240 формирует массив значений $[Z_0]$.

Блок 1245 иллюстрирует определение параметров неопределённости целевой плотности симметричного распределения стохастической системы: интервала энтропийно–параметрической неопределённости Δ_{HPS0} , и параметрических признаков формы: контрэксцесса κ_0 и коэффициента энтропии K_{HS0} . Интервал энтропийно–параметрической неопреде-

лённости Δ_{HPS0} задан как среднеквадратическое параметров среднего квадратического разброса σ_0 массива $[Z_0]$ и интервалом энтропийной неопределённости Δ_{HS0} .

$$\Delta_{HPS0} = \sqrt{(\Delta_{HS0})^2 + (\sigma_0)^2}. \quad (43)$$

Интервал энтропийной неопределённости определяется потенцированием энтропии, рассчитанной для симметричной целевой плотности симметричного распределения стохастической системы. Формула для расчёта интервал энтропийной неопределённости имеет вид:

$$\Delta_{HS0} = \exp(-E(-\ln P_Z(Z_0))). \quad (44)$$

Контроль рассогласования между симметричной моделью плотности распределения массива $[Z]$ и симметричной целевой плотности распределения, заданного массивом $[Z_0]$ осуществляется с помощью блока сумматоров 1250, в состав которого входят сумматоры с одним инверсным входом. Контроль формы симметричной модели плотности распределения относительно симметричной целевой плотности распределения выходного параметра осуществляется путём определения рассогласования рассогласования коэффициентов энтропий δK_{HS} и контрэксцессов δk сумматорами 1255 и 1260, соответственно. Форма симметричной модели соответствует дифференциальной составляющей контролера. Контроль масштаба симметричной модели плотности распределения осуществляется путём определения рассогласования интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей $\delta \Delta_{HS}$ с помощью сумматора 1265. Масштаб симметричной модели соответствует интегральной составляющей. Осуществление контроля масштаба распределения по рассогласованию интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей симметричной модели выходного параметра и целевой плотности распределения позволяет исключить влияние смещения значений на оценку дистанций интервалов энтропийных и статистических неопределённостей.

Блок сумматоров 1250 содержит так же в своём составе сумматор 1145 для реализации контроля на основе минимизации рассогласования асимметрий δSk массива значений $[Y]$ выходного параметра относительно его оптимального значения. Асимметрия модели иллюстрирует пропорциональную составляющую псевдо-ПИД контроля. Следует отметить, что при контроле рассогласования между симметричной моделью плотности распределения и симметричной целевой плотности распределения при несимметричном распределении массива $[Y]$ выходного параметра стохастической системы достаточно осуществлять проверку допустимости рассогласования асимметрии распределения массива значений области оптимального состояния согласно неравенству (6) и формирования воздействия для трансформа-

ции распределения выходного параметра стохастической системы при выходе асимметрии за пределы критического значения контроля.

Этап 4: формирование управляющего воздействия.

Оценки рассогласований признаков формы и дистанций интервалов неопределённости используются для формирования управляющего воздействия коррекции неопределённости стохастической системы.

Для настройки устройства энтропийно–параметрического контроля неопределённости стохастической системы в обратную связь системы контроля включен блок 1270 настройки пропорциональностей рассогласований, содержащего блоки настройки пропорциональности с изменяемыми коэффициентами усиления рассогласований параметров неопределённости симметричной модели распределения и симметричной целевой плотности распределения выходного параметра. Блок 1165 предназначен для изменения коэффициентов усиления пропорциональной составляющей рассогласований асимметрии плотности распределения значений массива $[Y]$ значений выходного параметра и эталонного значения асимметрии. Блоки 1275 и 1280 предназначены для изменения коэффициентов усиления дифференциальной составляющих рассогласований признаков форм коэффициентов энтропий и контрэксцесов. Блок 1285 предназначен для изменения коэффициента усиления рассогласования интервалов энтропийно–параметрических неопределённостей симметричных модели и симметричной целевой плотности распределений выходного параметра стохастической системы. Сигналы рассогласований на выходе блоков настройки пропорциональности суммируются и/или используются блоком 1290 для формирования управляющего воздействия $[u]$ коррекции рассогласования интервалов неопределённости стохастической системы посредством регулирования её параметров. Дополнительный вход z блока 1290 позволяет изменять коэффициенты связей блока 1290 в зависимости от номера симметричной модели плотности распределения выходного параметра.

Как следует из описания фигуры 12, схема устройства является примером возможной реализации способа контроля неопределённости стохастической системы при получении условной оценке центра плотности распределения. При этом в схеме устройства на фигуре 12 сохранён структурный подход схемы устройства параметрического контроля неопределённости стохастической системы, основанной на параметрах статистического ряда (35) и показанной на фигуре 11.

Заявитель отмечает, что структурные схемы способа контроля неопределённости стохастической системы могут содержать другие реализации, объединяемые общей идеей разделения контроля асимметрии распределения и контроля симметричной модели плотности

распределения выходного параметра относительно её целевой плотности распределения. При таком подходе коэффициент энтропии симметричного распределения определяется отношением интервалов неопределённостей, заданных относительно оценки центра распределений, и не зависят от смещения распределений.

Литература

1. ГОСТ 34100.1 - 2017 / ISO/ IEC Guide 98-1:2009. Неопределённость измерения. Введение в руководство по выражению неопределённости измерения. М.: Стандартинформ, 2018.
2. ГОСТ 3 54500.3 - 2011/ Руководство ИСО/ МЭК 98-3: 2008. Неопределённость измерения. Руководство по выражению неопределённости измерения. М.: Стандартинформ, 2012.
3. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова Э.М. Системный анализ процессов химической технологии и процессы массовой кристаллизации из растворов и газовой фазы. М., изд-во «Наука», 1983.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989 – 540 с.
5. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификации и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989 – 607 с.
6. Острем К.Ю. Введение в стохастическую теорию управления. М., Изд-во «Мир», 1973.
7. Александров А.В., Александрова Т.Н. Реология и гидродинамика процессов отлива и формования бумаги. СПбГТУРП. – СПб., 2015 – 132 с
8. Овсянников Д.А. Математические методы управления пучками. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1980.
9. Гарнштейн Г.М., Медок М.С. Способ определения распределения плотности заряда в потоках заряженных частиц. Авт. свид. СССР, № 295215, опубл. 04.11.1971, Бюл. №7, СССР.
10. Полосин В.Г. Способ статистического анализа электрокардиографической информации. Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №10.
11. Рубин А.Б. Биофизика. Книга 1. Теоретическая биофизика. М.: Книжный дом «Университет», 1999. – 448 с.
12. Пухликов А. В. Задачи управления распределениями в динамических системах //Автоматика и телемеханика. – 1995. – №4. – С. 77 – 87.
13. Пухликов А. В. Задачи управления распределениями // Нелинейная динамика и управление. ФИЗМАТЛИТ – №2. – 2010.
14. Jian-Qiao Sun, 2006. Stochastic Dynamics and Control. Monograph Series on Nonlinear Science and Complexity / Elsevier B.V. 2006. – 410 p.
15. Wang, H. Bounded Dynamic Stochastic Systems: Modelling and Control. London, Springer-Verlsg, Elsrver, 2000. - 196 p.
16. Guoa L., Wang H., Wang A.P. Optimal probability density function control for NARMAX stochastic systems / Autovatica, Vol. 44, 2008 , pp. 1904–1911
17. Пат. 2565367 Российская Федерация. Способ контроля и управления динамической системой / Полосин В.Г., Бодин О.Н. – заявка № 2014111833/08; опубл. 20.10.15, Бюл. №29

18. Новицкий П.В., Зограф И.А., Оценка погрешности результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат. 1985г. – 248 с
19. Polosin V.G., 2020, Mapping distributions in the entropy-parametric space / Journal of Physics: Conf. Ser., 1515 032044, doi:10.1088/1742-6596/1515/3/0320.
20. Назаров И.А., К вопросу о предельных значениях энтропийного коэффициента. – В кн.: Известия ЛЭТИ, вып. 66, ч. 1, 1965, С. 21 – 23.
21. Полосин В.Г. Применение информационно-измерительного кванта для исследования электрофизиологических характеристик сердца // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2017 №4. Публикация 1-5. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2017-4/1-5.pdf>
DOI: 10.12737/article_5a38cce58642a7.78002703.

Способ и устройства контроля неопределённости стохастической системы

П.1: Способ контроля неопределённости стохастической системы, основанный на целенаправленном изменении плотности симметричной модели распределения выходного параметра к симметричной целевой плотности распределения стохастической системы, при котором регистрируют состояние объекта; формируют массив значений выходного параметра y_i ; определяют математическое ожидание M и средний квадратический разброс σ выходного параметра; формируют базу данных эталонных параметров распределений выходного параметра; трансформируют закон распределения выходного параметра посредством изменения настроек системы; отличающийся тем, что осуществляют определение признака асимметрии Sk для несимметричной плотности распределения массива значений выходного параметра системы

$$Sk = \frac{\mu_3}{\sigma^3},$$

где μ_3 – третий центральный момент распределения массива значений выходного параметра определяемый

$$\mu_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - M)^3,$$

где N – число значений в выборке выходного параметра;

проверку допустимости рассогласования асимметрии распределения массива значений области оптимального состояния системы

$$|Sk - Sk_0| \leq \Delta Sk_{\text{крит}},$$

где Sk_0 – признак асимметрии оптимального распределения стохастической системы;

$\Delta Sk_{\text{крит}}$ – критическое значение разности асимметрий области оптимального состояния;

определение формы симметричной модели выходной плотности распределения стохастической системы *посредством*

– выбора и определение центра y_c несимметричного массива $[Y]$ значений выходного параметра;

– формирования симметричного массива значений $[Z]$ отображением значений несимметричного массива значений Y выходного параметра относительно оценки центра;

– определения второго μ_{2S} и четвёртого μ_{4S} центральных моментов симметричного массива значений $[Z]$

$$\mu_{2S} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} (z_i - y_c)^2,$$

$$\mu_{4S} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} (z_i - y_c)^4,$$

– определения коэффициента энтропии и контрэксцесса симметричного массива значений выходного параметра

$$\kappa_S = \frac{\mu_{2S}}{\sqrt{\mu_{4S}}},$$

– определения *интервалов информационной и параметрической неопределённостей* симметричного массива значений выходного параметра стохастической системы

$$\Delta_{HS} = \exp(-E(-\ln P_Z(Z))),$$

$$\Delta_{PS} = \sqrt{\mu_{2S}},$$

– определения коэффициента энтропии и контрэксцесса симметричного массива значений выходного параметра

$$K_{HS} = \frac{\Delta_{HS}}{\Delta_{PS}},$$

– определения критерия области контроля признаков формы симметричной целевой плотности распределения

$$\gamma = \left(\left\| \frac{\frac{K_{HS} - K_{HS0}}{\Delta K_{HS}}}{\frac{\kappa_S - \kappa_{S0}}{\Delta \kappa_S}} \right\| > 1 \right)$$

где $\Delta \kappa_S$, ΔK_{HS} – разбросы признаков контрэксцесса и коэффициента энтропии симметричного массива относительно контрэксцесса κ_{S0} и коэффициента энтропии K_{HS0} симметричной целевой плотности распределения стохастической системы;

– проверки принадлежности положения системы области контроля и если критерий γ равен единице ($\gamma=1$), то проводят трансформацию закона распределения посредством изменением настроек системы;

– определения дистанций между положениями возможных моделей и положением симметричного массива значений выходного параметра

$$\Delta L_j = \left| \frac{\frac{K_{HS} - K_{HSj}^M}{\Delta K_{HS}}}{\frac{\kappa_S - \kappa_{Sj}^M}{\Delta \kappa_S}} \right|,$$

где K_{HSj}^M и κ_{Sj}^M – контрэксцесс и коэффициент энтропии симметричной j -й модели плотности распределения;

– выбора формы симметричной модели плотности распределения из условия минимума дистанции между положениями возможных моделей и положением симметричного массива значений выходного параметра

$$\Delta L_j \rightarrow \min;$$

– определения вектора рассогласования признаков формы симметричной модели плотности распределений выходного параметра и симметричной целевой плотности распределения стохастической системы

$$[\delta K_{HS} \quad \delta \kappa]^T = [K_{HS}^M - K_{HS0}, \quad \kappa_S^M - \kappa_{S0}]^T,$$

где K_{HS}^M и κ_S^M – коэффициента энтропии и контрэксцесса выбранной симметричной модели плотности распределения;

– формирования управляющего воздействия для коррекции рассогласования признаков формы симметричной модели плотности распределения посредством изменения параметров и настроек системы;

определение интервала энтропийно-параметрической неопределённости симметричного массива значений выходного параметра стохастической системы

$$\Delta_{HPS} = \sqrt{(\Delta_{HS})^2 + (\Delta_{PS})^2}$$

формирование интервала энтропийно-параметрической неопределённости симметричной модели плотности распределения выходного параметра

$$\Delta_{HPS}^M = \sqrt{\left((K_{HS\lambda}^M)^2 + 1\right) \cdot \mu_{2\lambda}},$$

определение параметра масштаба симметричной модели плотности распределения выходного параметра из условия минимума разницы интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей симметричного массива значений выходного параметра и симметричной модели распределения выходного параметра

$$|\Delta_{HPS} - \Delta_{HPS}^M| \rightarrow \min,$$

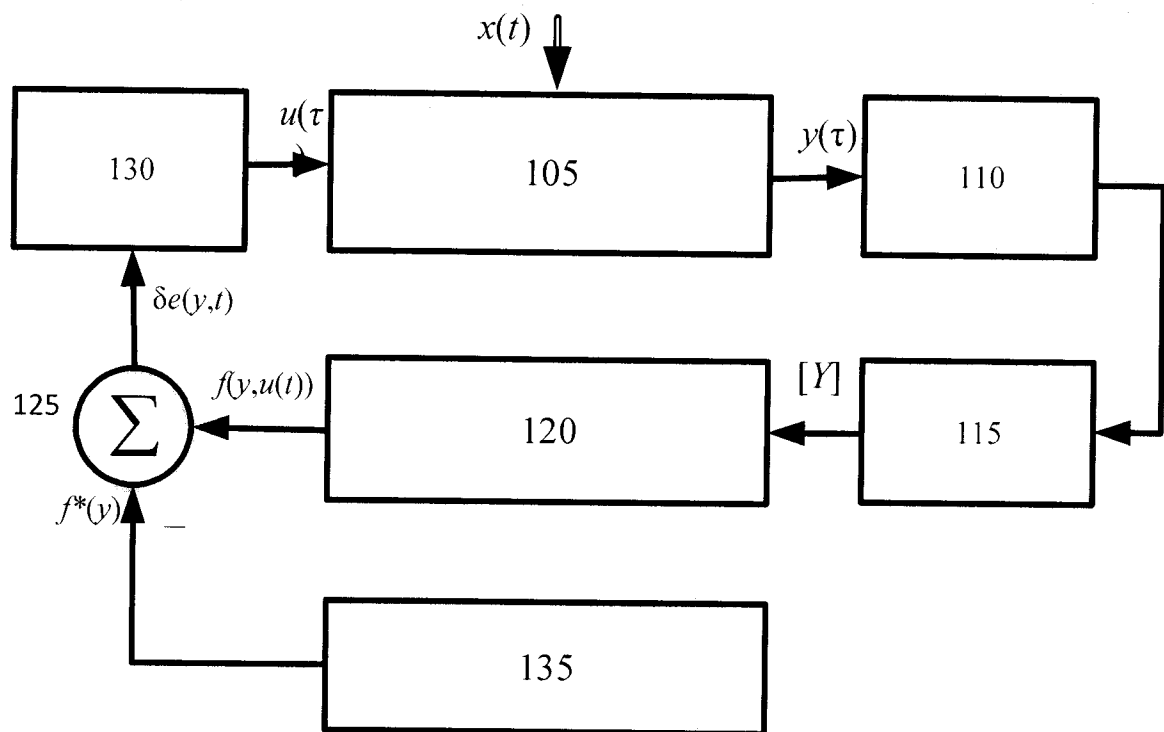
определение рассогласования интервалов энтропийно-параметрических неопределённостей симметричной модели плотности распределения выходного параметра Δ_{HPS}^M и симметричной целевой плотности распределения Δ_{HPS}^u ;

$$\delta \Delta_{HPS} = |\Delta_{HPS}^M - \Delta_{HPS}^u| \rightarrow \min,$$

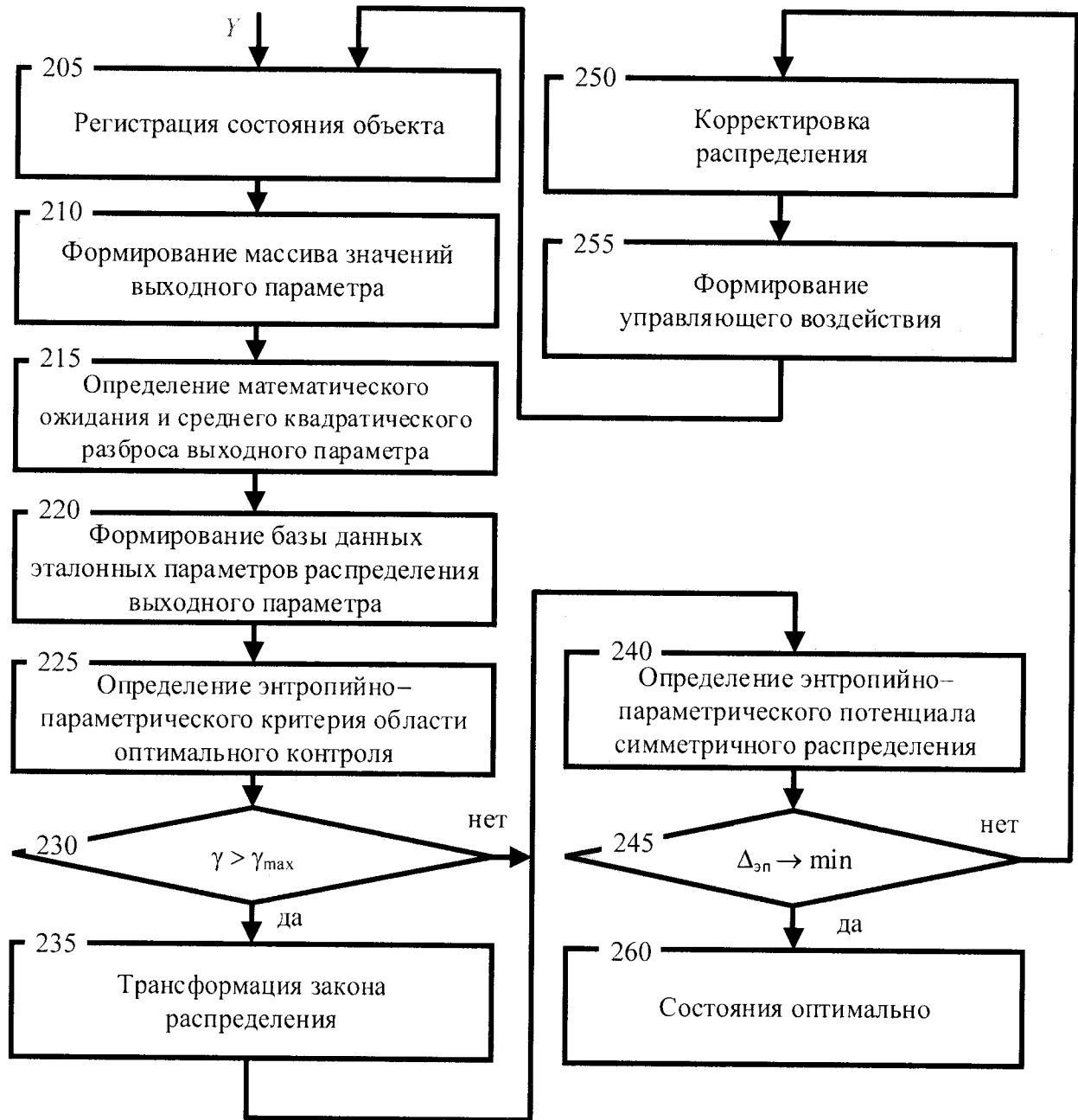
минимизацию рассогласования интервалов энтропийно–параметрических неопределённостей симметричной модели плотности распределения выходного параметра и симметричной модели целевой плотности распределения, коррекции симметричной модели выходной плотности распределения стохастической системы и формирование управляющего воздействия для коррекции рассогласования интервалов неопределённости стохастической системы, сохранение параметров модели и визуализацию модели неопределённости стохастической системы.

П.2. Устройство параметрического контроля неопределённости стохастической системы содержащее блок регистрации значений выходного параметра стохастической системы, выполненный с возможностью измерения, запоминания выходного сигнала; блок формирования массива значений выходного параметра стохастической системы, выполненный с возможностью группирования данных по интервалам; блок определения центральных моментов массива значений $[Y]$ выходного параметра, предназначенного для определения математического ожидания, второго, третьего и четвёртого центральных моментов выходного параметра; блоков определения интервала параметрической неопределённости и параметрических признаков формы – асимметрии и эксцесса – массива значений $[Y]$ выходного параметра стохастической системы, соответственно; блок формирования целевой плотности распределения, выполненной с возможностью получения массива значений в соответствии с математической моделью целевой плотности распределения; блок определения центральных моментов целевого распределения выходного параметра, предназначенного для определения математического ожидания и центральных моментов целевой плотности распределения; блок определения интервала параметрической неопределённости и параметрических признаков формы – асимметрии и эксцесса – целевой плотности распределения стохастической системы; блок сумматоров с инверсным входом, содержащего сумматор интервалов параметрических неопределённостей массива значений выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы, сумматоры параметрических признаков формы асимметрии и эксцесса массива значений выходного параметра и целевого распределения стохастической системы; блок настройки пропорциональностей рассогласований, содержащего блоки установления пропорциональности рассогласования интервалов параметрических неопределённостей, рассогласований асимметрии и рассогласования эксцессов массива значений $[Y]$ выходного параметра и целевой плотности распределения стохастической системы; блок формирования управляющего воздействия для коррекции рассогласований интервалов неопределённостей стохастической системы.

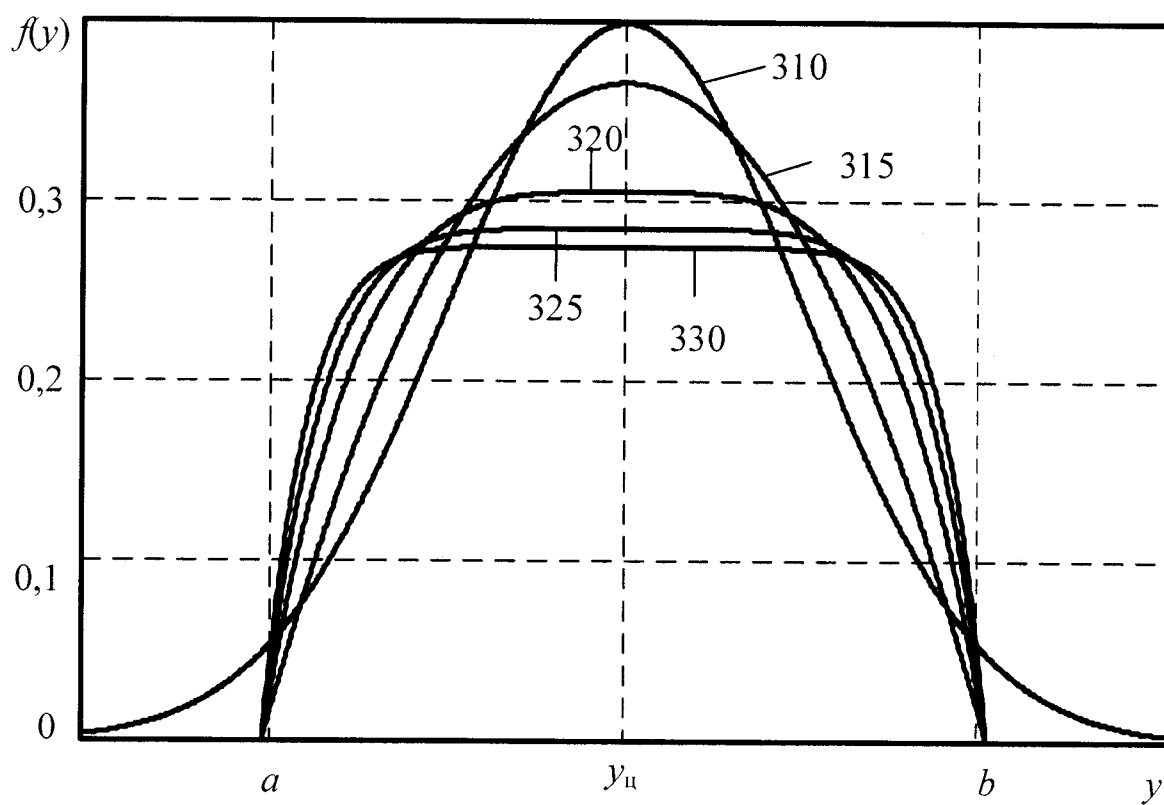
П.3: Устройство энтропийно–параметрического контроля неопределённости стохастической системы, содержащее блок измерения выходного параметра стохастической системы, выполненный с возможностью запоминания выходного сигнала; блок формирования массива значений выходного параметра, выполненный с возможностью запоминания значений выходного параметра и группирования данных по интервалам; блок определения центральных моментов массива значений $[Y]$ выходного параметра; блок определения асимметрии плотности распределения значений массива $[Y]$; блок формирования симметричного массива $[Z]$ выходного параметра, выполненный с возможностью выбора и определения центра симметрии выходного массива; блок определения центральных моментов и интервалов неопределённостей симметричного массива $[Z]$; блок определения параметров симметричного массива $[Z]$, выполненного с возможностью определения интервала энтропийно–параметрической неопределённости и признаков формы контрэксцесса и коэффициента энтропии симметричного массива $[Z]$ и возможностью проверки принадлежности симметричной модели области контроля; блок формирования воздействия для трансформации распределения выходного параметра стохастической системы; блок выбора формы симметричной модели с известными коэффициентом энтропии и контрэксцесса, выполненного с возможностью определения дистанции между положением возможных моделей и положением симметричного массива $[Z]$; блок формирования целевой плотности симметричного распределения; блок определения параметров целевой плотности симметричного распределения, выполненного с возможностью определения интервала энтропийно–параметрической неопределённости и признаков формы – контрэксцесса и коэффициента энтропии – целевой плотности симметричного распределения; блок сумматоров с инверсным входом, содержащего сумматор параметрических признаков асимметрии массива значений выходного параметра и его эталонного значения; сумматор интервалов энтропийно–параметрической неопределённости симметричного массива $[Z]$ и целевого плотности симметричного распределений выходного параметра стохастической системы; сумматор коэффициентов энтропий и сумматор контрэксцессов; блок настройки пропорциональностей рассогласований, содержащего блок установления пропорциональностей рассогласований асимметрии массива значений $[Y]$ выходного параметра и его эталонного значения, блоки установления пропорциональностей рассогласования коэффициентов энтропий, рассогласования контрэксцессов и рассогласования интервалов энтропийно–параметрической неопределённости симметричного массива $[Z]$ и целевого плотности симметричного распределений выходного параметра стохастической системы; блок формирования управляющего воздействия для коррекции рассогласования интервалов неопределённости стохастической системы.



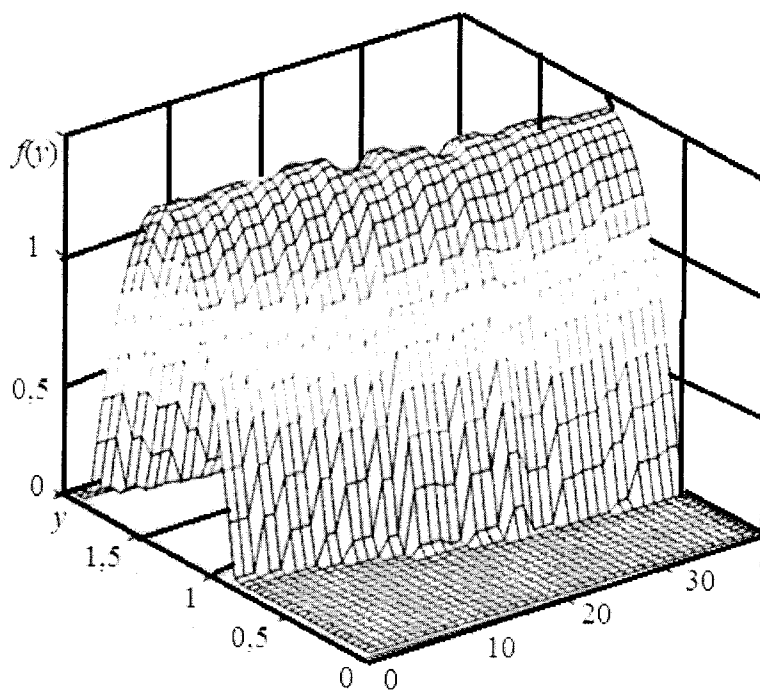
Фиг. 1



Фиг. 2

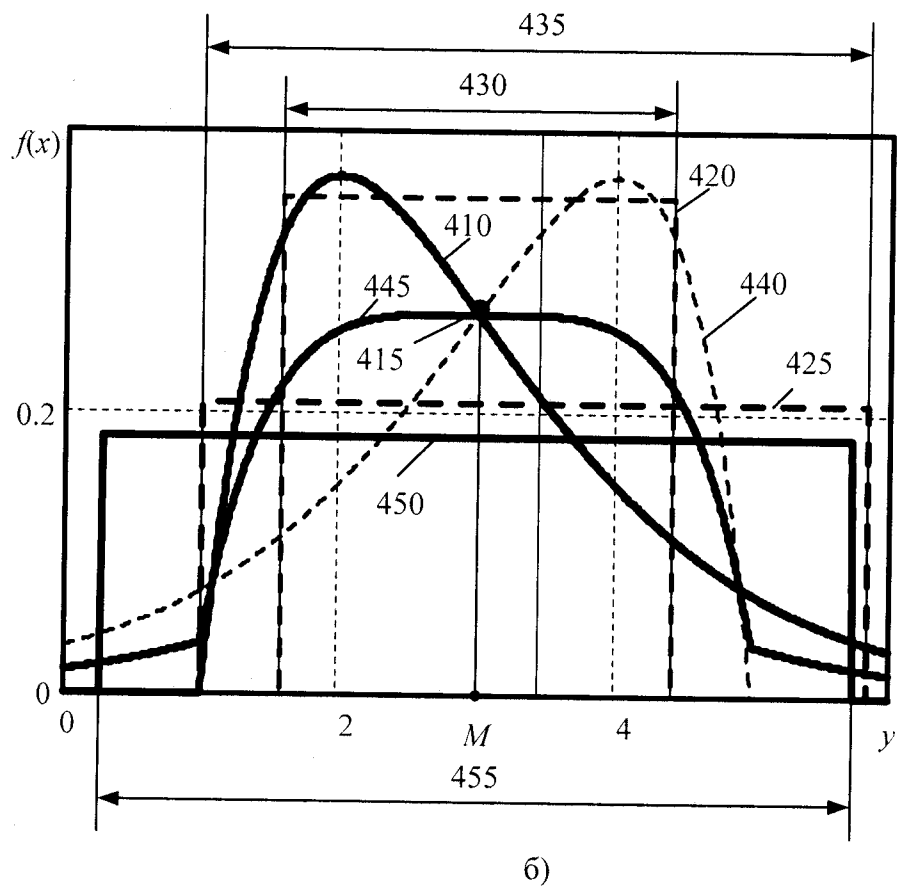
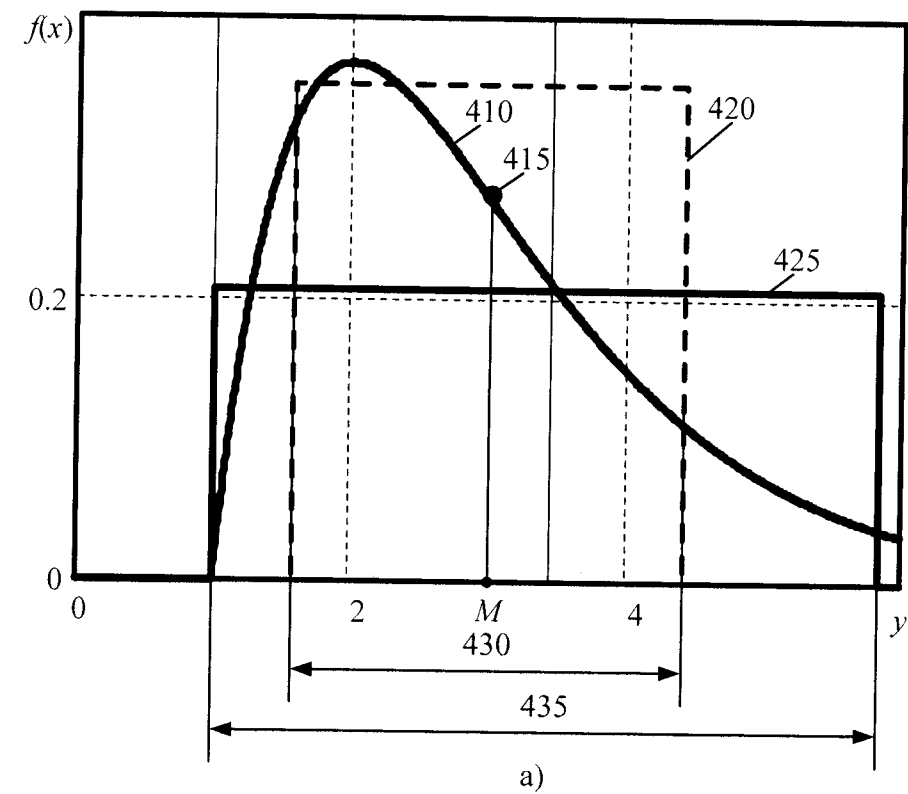


а)

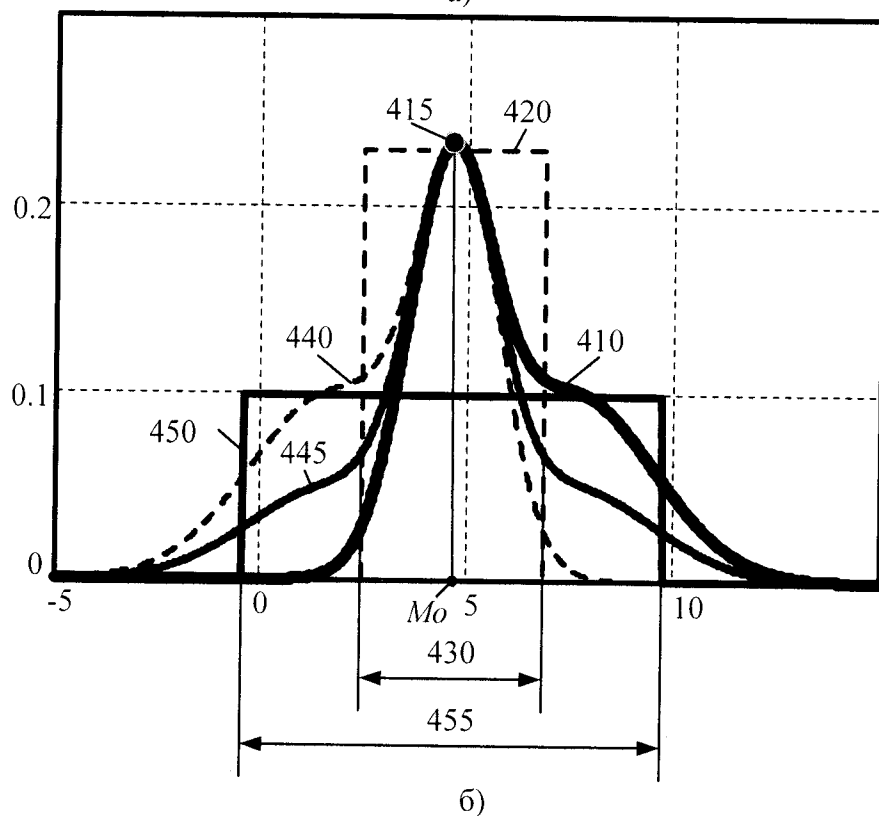
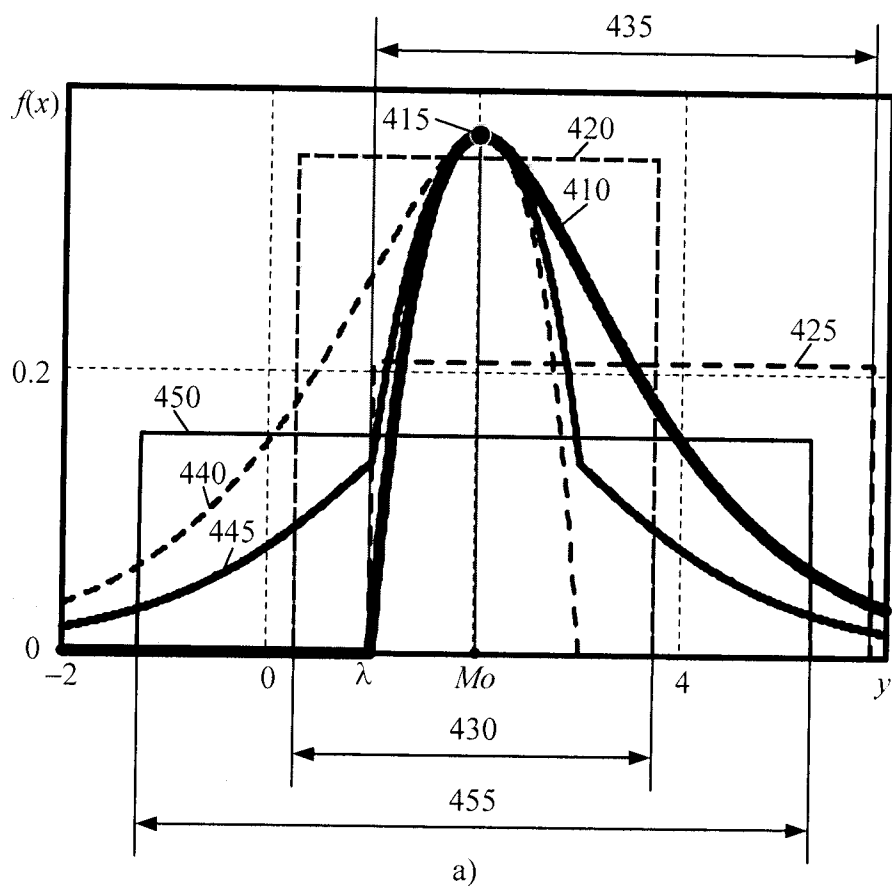


б)

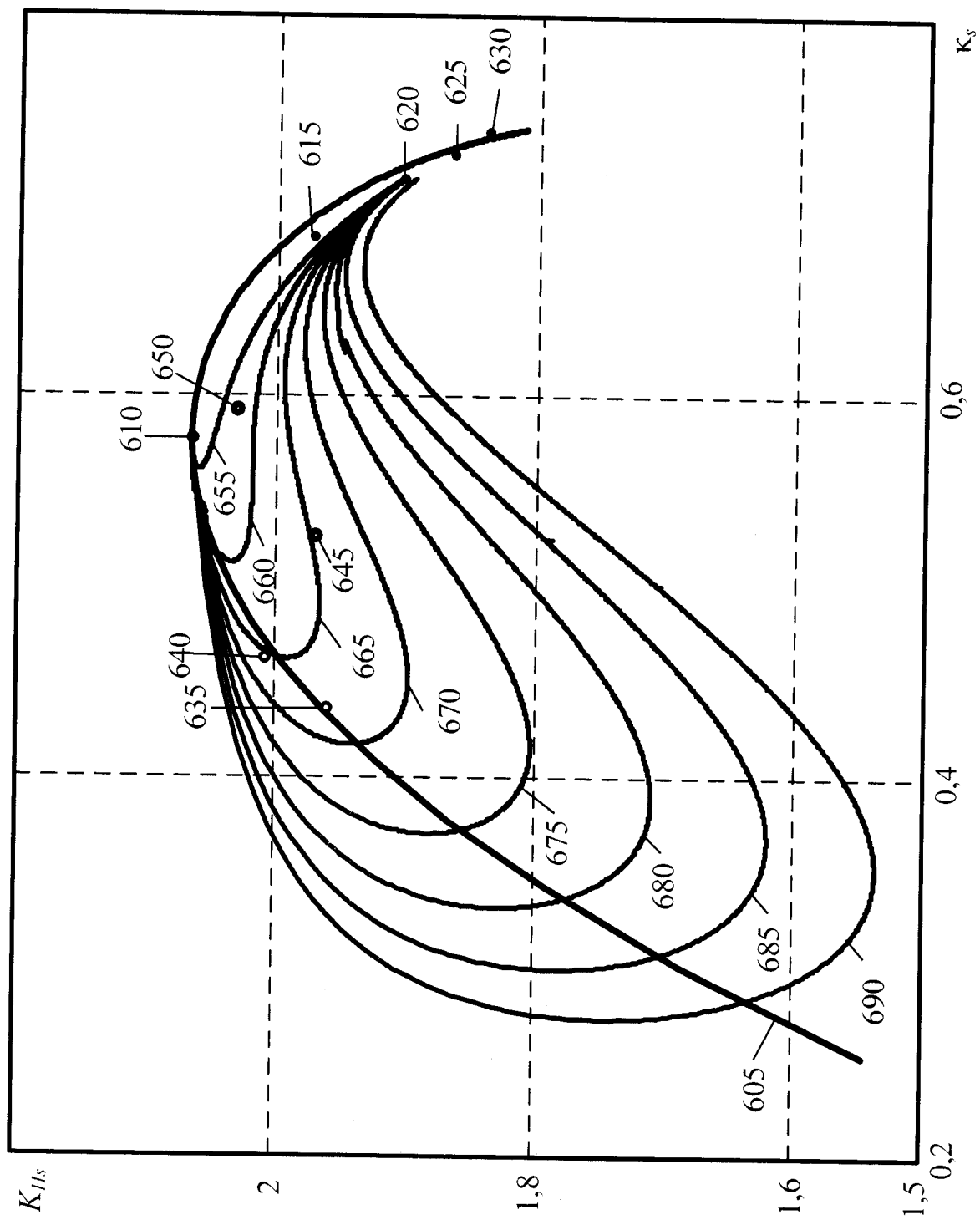
Фиг. 3



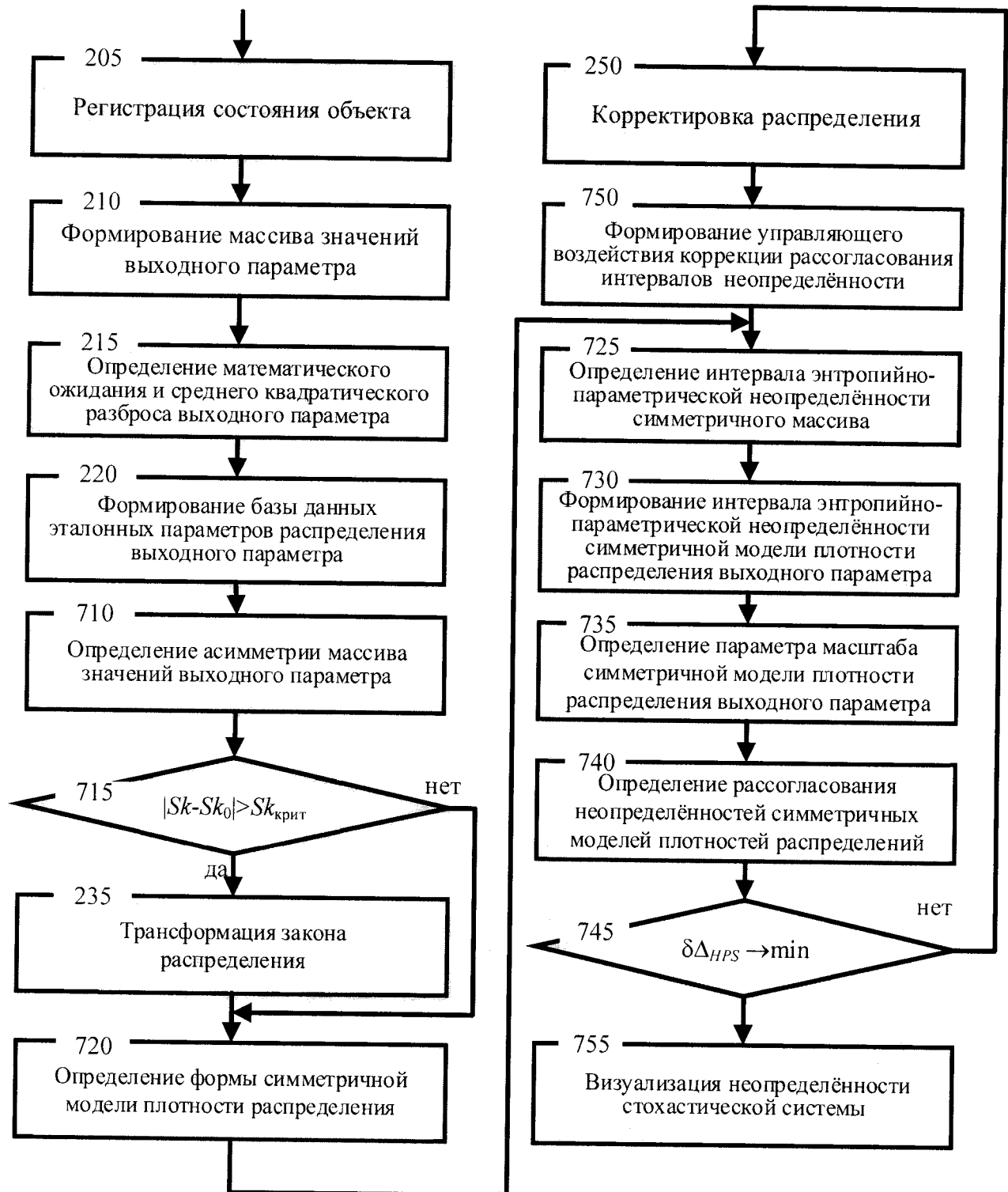
Фиг. 4



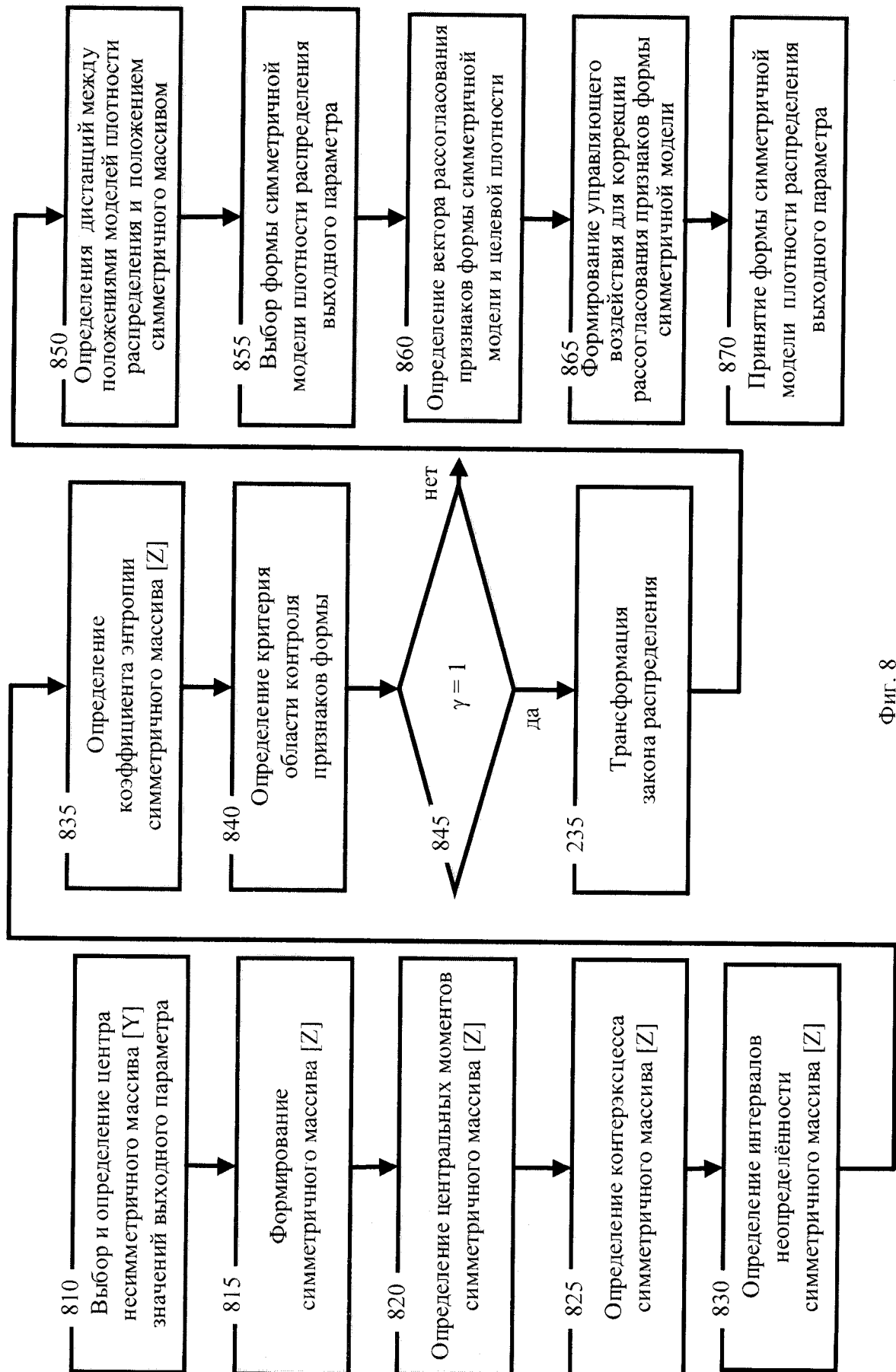
Фиг. 5



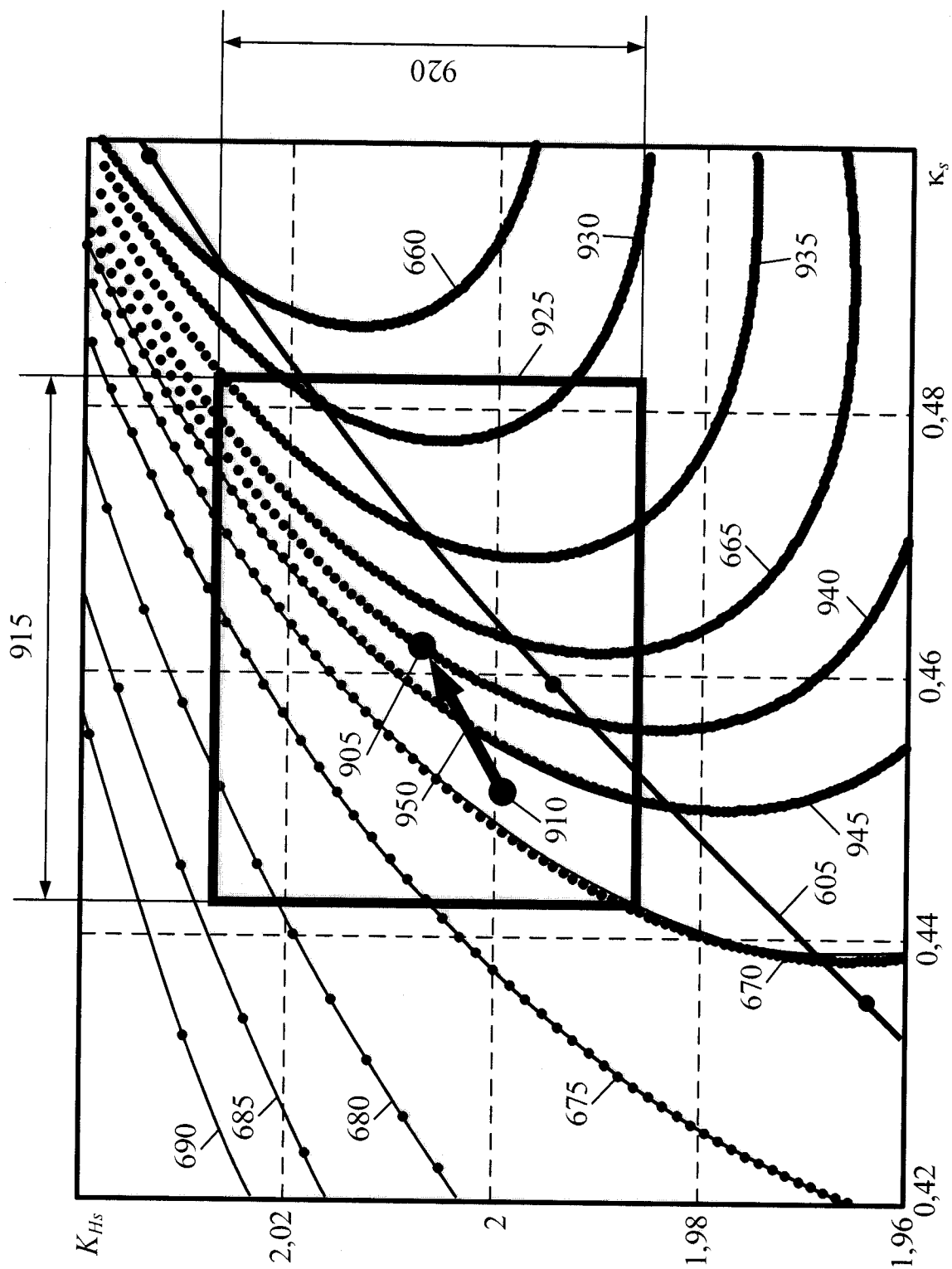
Фиг. 6



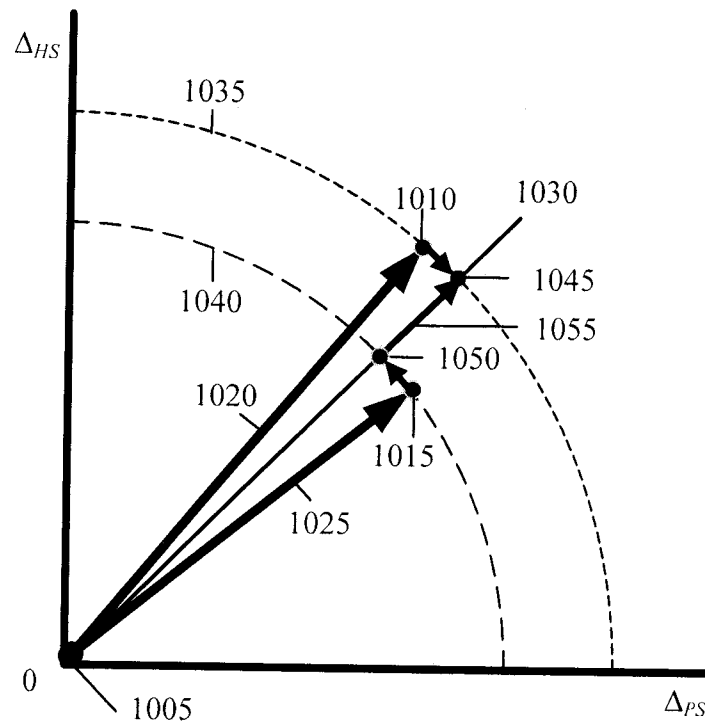
Фиг. 7



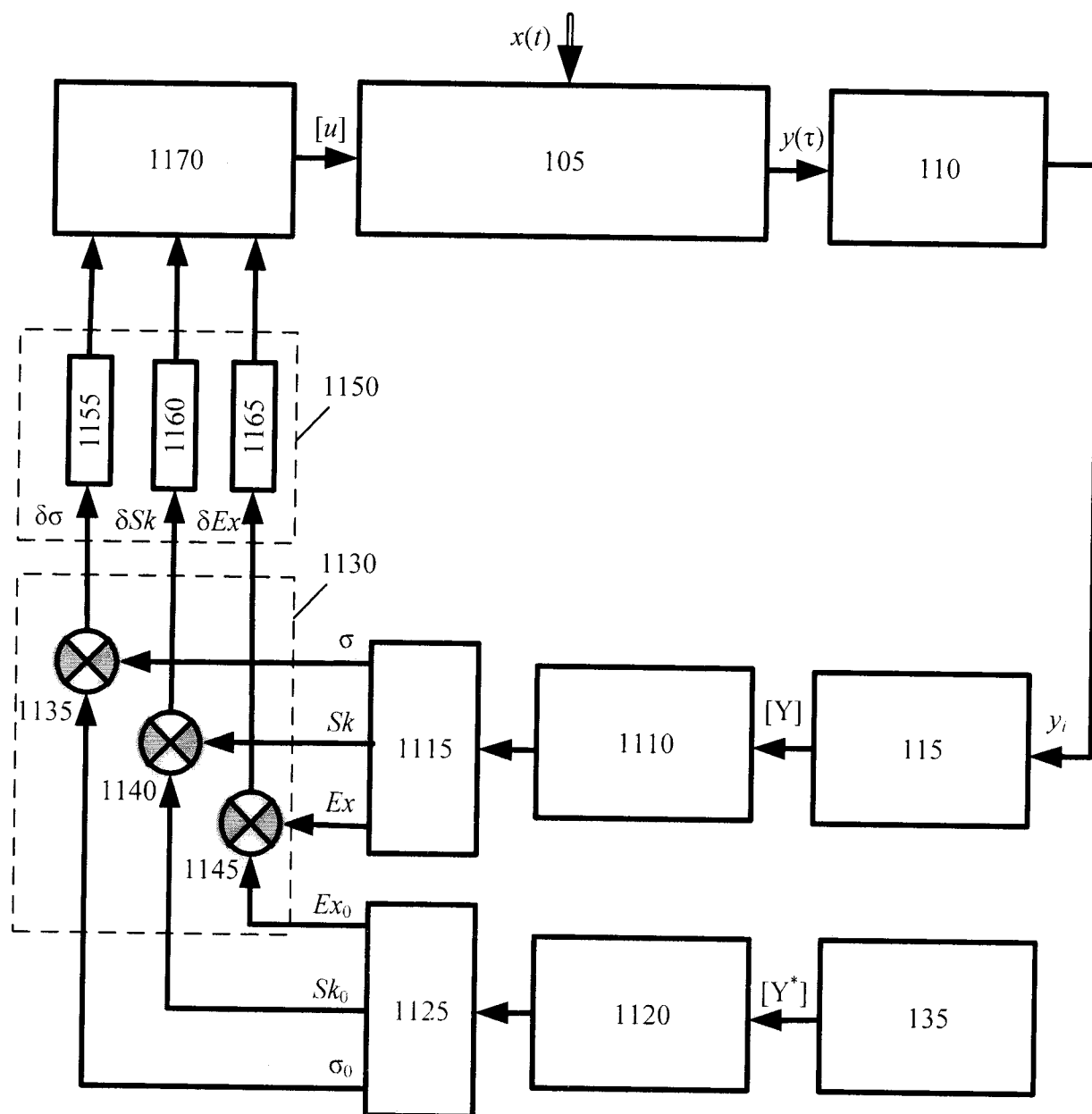
Фиг. 8



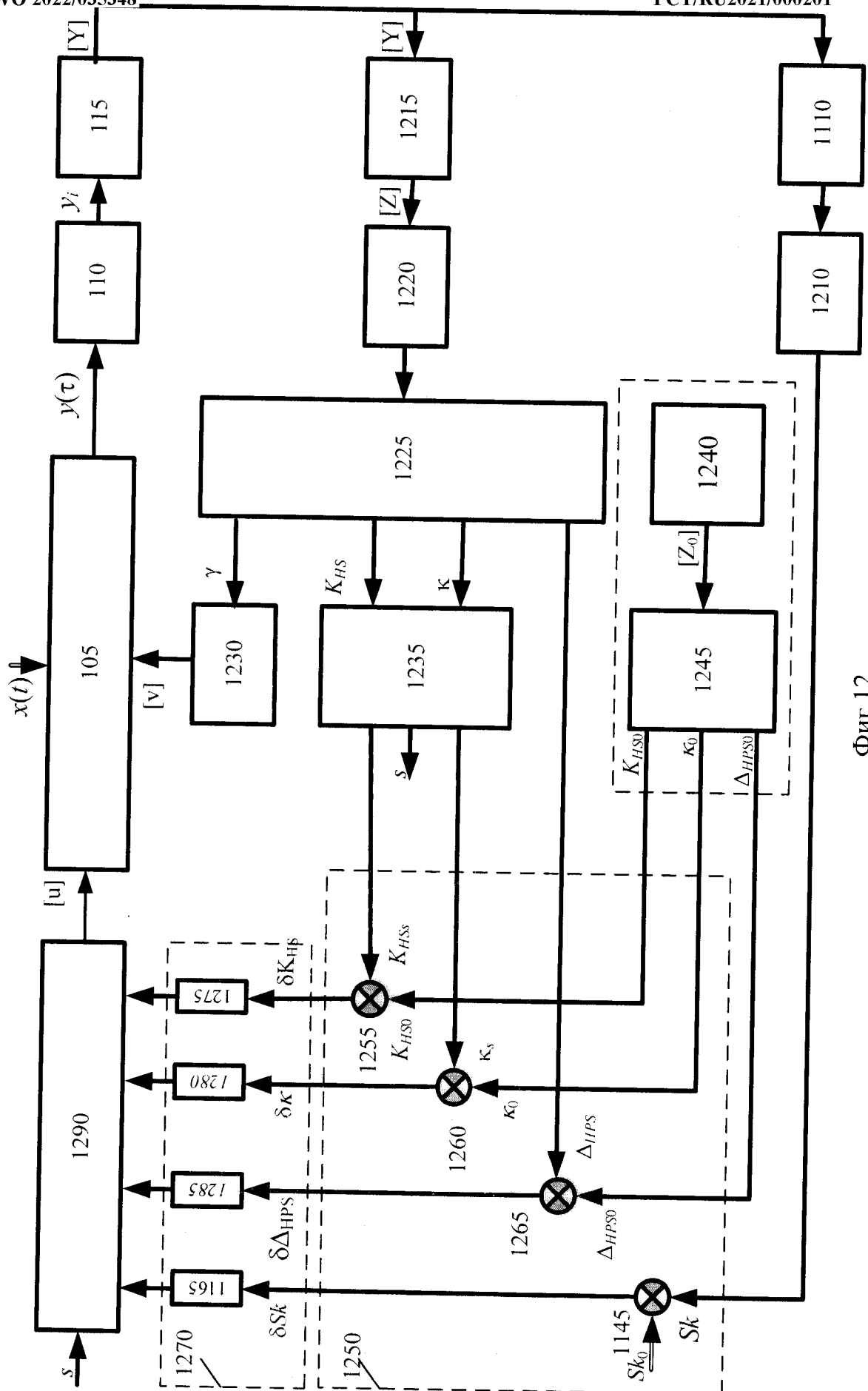
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/RU 2021/000201

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05B 13/00 (2006.01)**G06F 17/00 (2006.01)**

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G05B 13/00, A61B 5/00, 5/04, 5/0402, A61B 6/00, G06N 5/00, B60G 17/00, 17/015, 17/018

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

PatSearch (RUPTO internal), USPTO, PAJ, Esp@cenet, DWPI, EAPATIS, PATENTSCOPE

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A, D	RU 2565367 C1 (OBSCHESTVO S OGRANICHENNOI OTVETSTVENNOSTJU (OOO) "KARDIOVID") 20.10.2015	1-3
A	RU 2615286 C1 (BODNI OLEG NIKOLAEVICH et al.) 04.04.2017	1-3
A	RU 2704913 C1 (FGBOU VO "PENZENSKY GOSUDARSTVENNY UNIVERSITET") 31.10.2019	1-3
A	RU 2296356 C1 (LAZAREV VIKTOR LAZAREVICH) 27.03.2007	1-3
A	US 6496761 B1 (YAMAHA MOTOR CO LTD) 17.12.2002	1-3

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

30 August 2021 (30.08.2021)

Date of mailing of the international search report

02 September 2021 (02.09.2021)

Name and mailing address of the ISA/

RU

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

ОТЧЕТ О МЕЖДУНАРОДНОМ ПОИСКЕ

Номер международной заявки

PCT/RU 2021/000201

A. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕДМЕТА ИЗОБРЕТЕНИЯ G05B 13/00 (2006.01) G06F 17/00 (2006.01)		
Согласно Международной патентной классификации МПК		
B. ОБЛАСТЬ ПОИСКА Проверенный минимум документации (система классификации с индексами классификации) G05B 13/00, A61B 5/00, 5/04, 5/0402, A61B 6/00, G06N 5/00, B60G 17/00, 17/015, 17/018		
Другая проверенная документация в той мере, в какой она включена в поисковые подборки		
Электронная база данных, использовавшаяся при поиске (название базы и, если, возможно, используемые поисковые термины) PatSearch (RUPTO internal), USPTO, PAJ, Esp@cenet, DWPI, EAPATIS, PATENTSCOPE		
C. ДОКУМЕНТЫ, СЧИТАЮЩИЕСЯ РЕЛЕВАНТНЫМИ:		
Категория*	Цитируемые документы с указанием, где это возможно, релевантных частей	Относится к пункту №
A, D	RU 2565367 C1 (ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ (ООО) "КАРДИОВИД") 20.10.2015	1-3
A	RU 2615286 C1 (БОДИН ОЛЕГ НИКОЛАЕВИЧ и др.) 04.04.2017	1-3
A	RU 2704913 C1 (ФГБОУ ВО "ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ") 31.10.2019	1-3
A	RU 2296356 C1 (ЛАЗАРЕВ ВИКТОР ЛАЗАРЕВИЧ) 27.03.2007	1-3
A	US 6496761 B1 (YAMAHA MOTOR CO LTD) 17.12.2002	1-3
☐ последующие документы указаны в продолжении графы C. ☐ данные о патентах-аналогах указаны в приложении		
* Особые категории ссылочных документов: "А" документ, определяющий общий уровень техники и не считающийся особо релевантным "D" документ, цитируемый заявителем в международной заявке "Е" более ранняя заявка или патент, но опубликованная на дату международной подачи или после нее "L" документ, подвергающий сомнению притязание(я) на приоритет, или который приводится с целью установления даты публикации другого ссылочного документа, а также в других целях (как указано) "O" документ, относящийся к устному раскрытию, использованию, экспонированию и т.д. "P" документ, опубликованный до даты международной подачи, но после даты испрашиваемого приоритета	"T" более поздний документ, опубликованный после даты международной подачи или приоритета, но приведенный для понимания принципа или теории, на которых основывается изобретение "X" документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска; заявленное изобретение не обладает новизной или изобретательским уровнем, в сравнении с документом, взятым в отдельности "Y" документ, имеющий наиболее близкое отношение к предмету поиска; заявленное изобретение не обладает изобретательским уровнем, когда документ взят в сочетании с одним или несколькими документами той же категории, такая комбинация документов очевидна для специалиста "&" документ, являющийся патентом-аналогом	
Дата действительного завершения международного поиска		Дата отправки настоящего отчета о международном поиске
30 августа 2021 (30.08.2021)		02 сентября 2021 (02.09.2021)
Наименование и адрес ISA/RU: Федеральный институт промышленной собственности, Бережковская наб., 30-1, Москва, Г-59, ГСП-3, Россия, 125993 Факс: (8-495) 531-63-18, (8-499) 243-33-37		Уполномоченное лицо: Ирицкий Е.В. Телефон № (499) 240-25-91