

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-228-240>

УДК 697.8:62-347

Электропривод и автоматизация пробоотборной системы газоанализатора дымовой трубы

В. И. Емельянчиков¹⁾, Е. Э. Лойкуц¹⁾, О. Ф. Опейко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Для организации надежного контроля за выбросами дымовых труб энергетических объектов необходимы системы автоматического мониторинга. Известно оборудование для мониторинга выбросов труб малого диаметра, однако для труб большого диаметра (15 м и более), имеющихся в Республике Беларусь, соответствующие технические решения отсутствуют. В работе рассматривается задача автоматизации отбора пробы дымовых газов на основе электропривода в трубах большого диаметра. Для обеспечения оптимальной траектории движения пробоотборника в сечении трубы необходимо использовать асинхронный электродвигатель с преобразователем частоты и датчиком положения. Предложены функциональная схема системы управления, которая содержит программируемый логический контроллер для формирования режима движения, а также метод расчета параметров и выражения для формирования сигнала задания для режима непрерывного отбора пробы. Поскольку диапазон регулирования скорости возрастает по мере увеличения диаметра дымовой трубы, в зависимости от него может быть применено скалярное либо векторное частотное управление. Предложено выражение для расчета оптимального значения параметра N инкрементального датчика положения и скорости (энкодера), что способствует обоснованному выбору датчика. Представлены результаты имитационного моделирования, подтверждающие эффективность предложенного метода расчета параметров привода пробоотборника.

Ключевые слова: электропривод, частотное управление, мониторинг выбросов дымовой трубы, энкодер, имитационное моделирование

Для цитирования: Емельянчиков, В. И. Электропривод и автоматизация пробоотборной системы газоанализатора дымовой трубы / В. И. Емельянчиков, Е. Э. Лойкуц, О. Ф. Опейко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 3. С. 228–240. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-228-240>

Electric Drive and Automation of Sampling System for Chimney Gas Analyzer

V. I. Emeliantchikov¹⁾, E. E. Loikuts¹⁾, O. F. Opeiko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. To organize reliable control over emissions from chimneys of energy facilities, automatic monitoring systems are needed. Equipment is known for monitoring emissions from small-diameter

Адрес для переписки

Опейко Ольга Федоровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-61
oopeiko@bntu.by

Address for correspondence

Opeiko Olga F.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-61
oopeiko@bntu.by

chimneys, but for large-diameter pipes (15 m or more) available in our Republic, there are no corresponding technical solutions. The paper examines the problem of automating the sampling of flue gases based on an electric drive in large-diameter chimneys. To ensure the optimal trajectory of the sampler in the chimney section, it is necessary to use an asynchronous electric motor with a frequency converter and a position sensor. A functional diagram of the control system is proposed, which contains a programmable logic controller for generating the motion mode, as well as a method for calculating parameters and expressions for generating a task signal for continuous sampling mode. Since the range of speed control increases as the diameter of the chimney increases, depending on it, scalar or vector frequency control can be applied. An expression is proposed for calculating the optimal value of the parameter N of an incremental position and speed sensor (encoder), which contributes to a reasonable choice of sensor. The results of simulation modeling are presented, confirming the effectiveness of the proposed method for calculating the parameters of the sampler drive.

Keywords: electric drive, frequency control, chimney emission monitoring, encoder, simulation

For citation: Emeliantchikov V. I., Loikuts E. E., Opeiko O. F. (2024) Electric Drive and Automation of Sampling System for Chimney Gas Analyzer. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (3), 228–240. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-228-240> (in Russian)

Введение

Мониторинг вредных выбросов дымовых труб в атмосферу, включая автоматическую обработку данных, и их экспериментальное исследование остаются актуальной проблемой [1–13] в связи с большим вниманием к проблеме экологической безопасности в республике. В работе [9] выполнено численное моделирование течения газов в стволе дымовой трубы, показаны сложность динамики и неоднородность дымовых газов в сечении. В [6–8, 10] определены требования к отбору пробы и предложены соответствующие методы с учетом особенностей течения дымовых газов.

Известны различные методы анализа дымовых выбросов – со статическим [10, 16] и мобильным расположением приборов в дымовой трубе, оптические [6], электрохимические и др. Применение мобильных газоанализаторов MRU MGA 5 plus [14], Gasmeter 4000 (Финляндия) [15] и подобных позволяет разделять процессы отбора пробы и ее анализа. Особенностью дымовых труб в Республике Беларусь является больший диаметр поперечного сечения (до 15 м и 35 м) по сравнению с диаметром труб в мировой практике (до 2,4 м) [7]. Кроме того, через дымовую трубу выходят выбросы от нескольких котельных агрегатов. Поэтому отбор пробы требуется производить по всему сечению дымовой трубы [16], либо в точках отбора пробы, либо непрерывно в режиме движения по измерительным линиям. Применение регулируемого электропривода позволяет решить задачу отбора пробы. Дистанционное управление процессом отбора пробы сокращает объем работы на высоте, ограничиваясь плановым обслуживанием электрооборудования [17].

Целью данной работы является построение системы автоматизации отбора пробы в дымовых трубах на базе электропривода. Решаются задачи формулировки требований к системе, формирования схемы автоматизации и вывода выражений для расчета параметров управления. С целью анализа

динамических свойств системы проводится имитационное моделирование электропривода.

Требования к автоматизации отбора пробы

Устройство отбора пробы состоит из подвижной каретки с закрепленной на ней трубкой, отборный конец которой должен перемещаться по измерительной линии в горизонтальном сечении дымовой трубы. Для репрезентативности пробы время ее отбора должно быть не менее 10–30 мин в зависимости от площади сечения трубы [1–8] в режимах дискретного и непрерывного отбора пробы. Схема расположения измерительных линий $A1-A8$ и $B1-B8$ в поперечных сечениях трубы [6–8] показана на рис. 1.

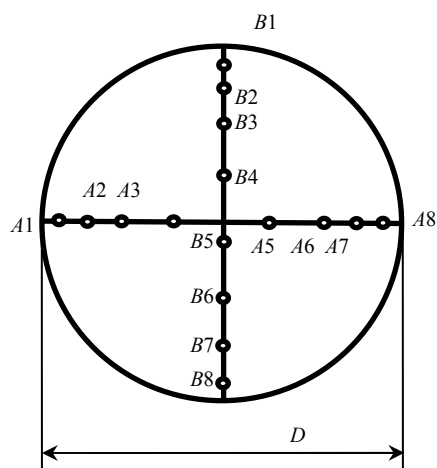


Рис. 1. Точки отбора пробы

Fig. 1. Sampling points

Для режима дискретного отбора пробы установлены точки отбора $A1, A2, \dots, A8$ и $B1, B2, \dots, B8$, которые лежат на двух измерительных линиях, взаимно перпендикулярных и проходящих через ось трубы в ее сечениях, разнесенных по высоте на небольшое расстояние (здесь D – диаметр трубы). Точки рекомендуется располагать по условию равенства площадей колец, формируемых радиусами соседних точек. В режиме непрерывного отбора пробы площадь кольца, пересекаемого в единицу времени, должна оставаться постоянной.

Это означает увеличение скорости при подходе к оси трубы и далее снижение скорости при удалении к краю сечения. Применение регулируемого электропривода для автоматизации отбора пробы позволит обеспечить как дискретный, так и непрерывный режимы. По газосборной трубе газ должен поступать в газоанализатор, который размещен вне дымовой трубы, например в мобильной лаборатории. По результатам отбора пробы в непрерывном режиме возможно определение точки, в которой результат измерения равен среднему по сечению трубы. После этого отбор пробы может выполняться в этой одной точке.

Схема автоматизации отбора пробы

Регулируемый электропривод через редуктор 2 (рис. 2) приводит в движение канатоведущий шкив (КВШ), соединенный канатом со вторым, опорным, шкивом на противоположной стороне трубы для перемещения устройства отбора пробы. Предпочтительно расположение всего оборудо-

вания на рабочей площадке вне трубы (рис. 2). Внутри трубы находится трос с устройством отбора пробы. Для движения по двум взаимно перпендикулярным измерительным линиям применяются два электродвигателя $M1$ и $M2$. Для обеспечения постоянства температуры отобранной пробы газа используется термостатированный ящик 4, клапан 5 позволяет управлять режимом отбора пробы.

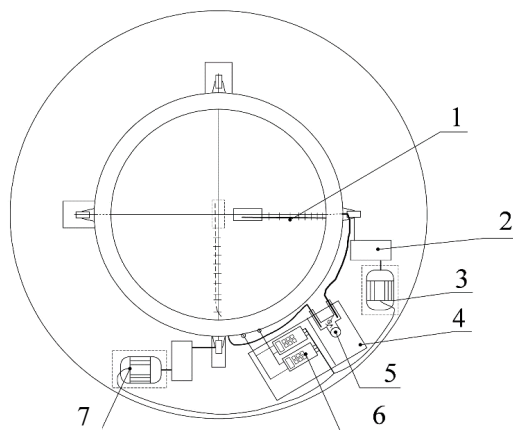


Рис. 2. Расположение оборудования на рабочей площадке трубы: 1 – пробоотборная трубка, 2 – редуктор; 3 – электродвигатель $M1$; 4 – термостатированный ящик; 5 – трехходовой клапан; 6 – преобразователи частоты; 7 – электродвигатель $M2$

Fig. 2. Equipment location on the chimney work site:
1 – sampling tube; 2 – reducer; 3 – electric motor $M1$; 4 – thermostated box;
5 – three-way valve; 6 – frequency converters; 7 – electric motor $M2$

Функциональная схема автоматизации представлена на рис. 3. Регулируемые электроприводы с двигателями $M1$ и $M2$ для движения по взаимно перпендикулярным измерительным линиям идентичны. Двигатели получают питание от преобразователей частоты $UZ1$ и $UZ2$, имеют датчики положения $BQ1$, $BQ2$ и приводят в движение идентичные рабочие органы $L1$ и $L2$. Радиус приведения $r = v_m/\omega_n$, где $v_m = 0,2\text{--}0,3$ м/с – требуемая наибольшая скорость рабочего органа, обеспечивается радиусом r_s канатоведущего шкива и передаточным отношением i_r редуктора по выражению $r = r_s/i_r$.

Датчики положения $BQ1$, $BQ2$ необходимы для управления точным позиционированием измерительной каретки в измерительные точки в режиме дискретных измерений. В режиме непрерывных измерений $BQ1$, $BQ2$ позволяют получить информацию о положении и скорости, необходимую для формирования заданного закона движения.

Программируемый логический контроллер (ПЛК, PLC) позволяет выполнить выбор ручного либо автоматического режима отбора пробы, а также координацию движения механизмов по измерительным линиям и отбора пробы.

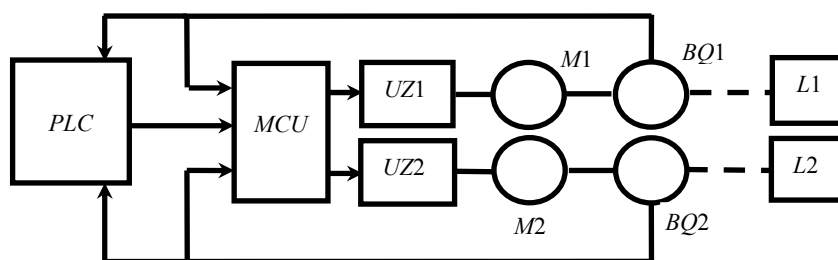


Рис. 3. Функциональная схема автоматизации

Fig. 3. Functional diagram of automation

Микроконтроллер *MCU* выполняет формирование сигналов управления в каждом из режимов функционирования. Возможен вариант системы без *PLC*, в котором *MCU* выполняет и функции *PLC*, а также вариант системы без *MCU*, где *PLC* выполняет все функции. Структура, представленная на рис. 3, допускает при необходимости развитие автоматизации путем совершенствования программного обеспечения.

Расчет параметров управления

Дискретный отбор пробы выполняется в режиме позиционирования электропривода с остановками на заданных точках в заданное время. Движение между точками может выполняться с наибольшей скоростью $v = v_m$ от периферии трубы к оси, проходя путь $S = R$ за время $t_m/2$, как показано на рис. 4а. После пересечения оси трубы в момент $t_m/2$ диаграмма скорости повторяется симметрично до противоположного края сечения трубы.

В непрерывном режиме площадь F , проходимая за заданный интервал времени T_s , должна быть постоянной, что является критерием репрезентативности отбора пробы. Площадь F определяется как площадь кольца с внешним радиусом R и внутренним радиусом $R - vT_s$ по выражению

$$F = \pi |R^2 - (R - vT_s)^2| = \pi T_s |v| |2R - vT_s|. \quad (1)$$

Здесь v , R – текущие значения скорости движения и радиуса.

Площадь круга с центром на оси трубы и с радиусом $R_0 = v_m T_s$, проходимым с наибольшей скоростью v_m за время T_s , определяется как $F_0 = \pi R_0^2$. Из условия постоянства площадей, проходимых за время T_s , следует равенство $F_0 = F$. При делении (1) на $F_0 = (v_m T_s)^2$ выражение $1 = V(2R_R - V)$ для пошагового расчета, допустимого при малых T_s , принимает вид

$$V_k = 1 / (2R_{R,k} - V_{k-1}). \quad (2)$$

Здесь использованы относительные единицы скорости $V = v/v_m$ и радиуса $R_R = R/R_0$. Следовательно, при $R_R = 1$ выполняется $V = 1$, а при $R_R < 1$

скорость V не определена в области действительных чисел. Однако в круге радиуса R_0 с центром на оси трубы необходимо стабилизировать скорость на уровне максимального значения v_m . В режиме непрерывного движения сигнал задания V для скорости может формироваться, как представлено на рис. 4b. Диапазон регулирования скорости определяется выражением

$$D_v = v_m / v_{\min} \approx R_m / R_0 \quad (3)$$

и повышается с увеличением радиуса трубы. На рис. 4b показан отрезок зависимости (2), когда $-20R_0 \leq R \leq 0$.

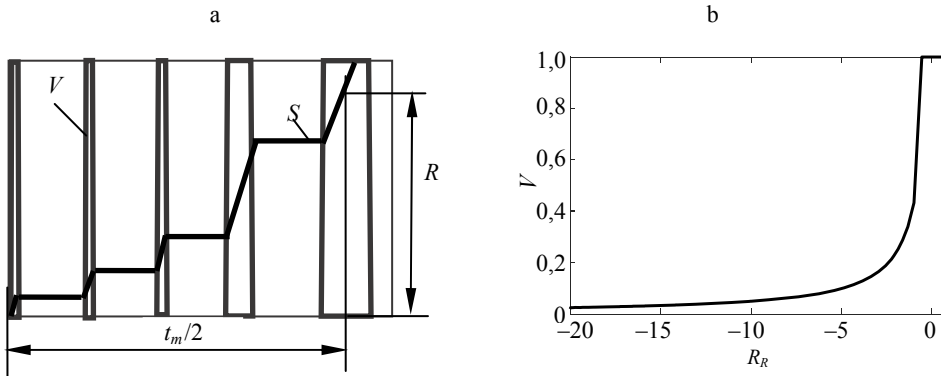


Рис. 4. Диаграмма движения в режиме дискретного (а) и непрерывного (б) отбора пробы

Fig. 4. Motion diagram for the discrete (a) and continuous (b) sampling mode

Если пренебречь электромагнитным процессом, электропривод с асинхронным электродвигателем (АД) и частотным управлением имеет динамику, описываемую системой уравнений:

$$\begin{aligned} dS / dt &= v, \\ T_M dv / dt &= -v + Bu, \\ y &= (S; F)^T. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь y – выходной вектор, состоящий из значения проходимого пути S , и величины $F(v, S)$ площади, проходимой за время Ts :

$$\begin{aligned} F(v, S) &= abs(\pi Ts \cdot v)(R - S) = \\ &= \pi |R^2 - (R - vTs)^2| = \pi Ts |v| |2R - vTs|. \end{aligned} \quad (5)$$

В уравнениях (4) приняты обозначения: $T_M = R_e J / (k_e k_M \Psi_2)$ – электро-механическая постоянная времени, зависящая от $R_e = R_1 + k_2^2 R_2$, где R_1, R_2 – сопротивления фазы статора и ротора; $k_2 = L_{12} / L_2$ – отношение индуктивностей L_{12}, L_2 – взаимной и ротора соответственно; J – приведенный к валу электродвигателя суммарный момент инерции; $k_e = p_p k_2$; $k_M = 3p_p k_2 / 2$;

p_p – число пар полюсов; Ψ_2 – потокоцепление ротора, постоянный коэффициент B определяется выражением $B = r\omega_n/u_m$.

Для управления объектом (4) по выходу y применимы пропорциональный (П) либо пропорционально-интегрирующий (ПИ) регулятор [18] в зависимости от требования к точности.

Малость интервала времени T_T , формируемого в ПЛК и в микроконтроллерах, позволяет обеспечить допустимую погрешность δ_F измерения площади F . Чем меньше интервал времени T_S формирования задания скорости, тем точнее диаграмма скорости. Так, в окрестности оси трубы по причине ограничения скорости $v = v_m = \text{const}$ имеет место погрешность Δ площади, проходимой за единицу времени, определяемая выражением $\Delta = F_0/2 = \pi R_0^2/2 = T_S^2 \pi v_m^2/2$. Эта погрешность снижает репрезентативность пробы, что в относительном выражении, учитывая радиус трубы R_m , составит $\delta_1 = \Delta/(\pi R_m^2) = T_S^2 v_m^2/(\pi R_m^2)$, и определяется величиной интервала времени T_S

$$T_S \leq \frac{\sqrt{2\delta_1} R_m}{v_m}. \quad (6)$$

Однако рекомендуемое время отбора пробы t_m при движении по диаметру сечения трубы задается условием $t_m = T_S R_m^2/R_0^2 = R_m^2/(T_S v_m^2)$. Отсюда получаем выражение для расчета интервала T_S , скоординированное с требуемым временем отбора пробы t_m :

$$T_S = \frac{R_m^2}{v_m^2 t_m}. \quad (7)$$

Далее следует выбрать минимальное из двух значений (6) и (7)

$$T_S = \min \left(\frac{\sqrt{2\delta_1} R_m}{v_m}, \frac{R_m^2}{v_m^2 t_m} \right). \quad (8)$$

Однако следует учитывать и погрешность выходной величины $F(R)$, в процессе движения вдоль остальной части диаметра трубы. Погрешность $F(R)$ складывается из погрешностей скорости v и положения R . Абсолютная погрешность для F определяется на основании выражения (1) следующим образом:

$$\Delta F(v, S) = 2\pi T_S (|v\Delta R| + |\Delta v R|).$$

Относительная погрешность $\delta_F = \Delta F/F$ определяется на основании относительных погрешностей $\delta_v = \Delta v/v$; $\delta_R = \Delta R/R$ скорости и положения. Если абсолютную погрешность разделить на $\pi v \cdot T_S \cdot R$ и учесть $Rv \approx R_0 v_m$, относительная погрешность величины F примет вид

$$\delta_F = 2(\delta_v + \delta_R). \quad (9)$$

Абсолютная погрешность $\Delta R = 2\pi r/N$ измерения положения инкрементальным датчиком, с учетом (3) и с радиусом приведения $r = v/\omega_N$, где ω_N – скорость вращения датчика, позволяет представить относительную погрешность в виде

$$\delta_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{2\pi r}{NR}. \quad (10)$$

Погрешности измерения положения и скорости в (9) зависят от датчика положения. Частота f_N событий от датчика пропорциональна скорости $f_N = Nv/2\pi r$. Погрешность измерения скорости [19, 20] зависит от частоты f_T измерения интервала времени $T_N = f_N^{-1}$ между событиями от датчика. Расчет скорости по сигналам датчика выполняется в устройстве управления (в ПЛК или микроконтроллере). Относительная погрешность измерения скорости представима в виде

$$\delta_v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{f_N}{f_T} = \frac{Nv}{2\pi r f_T}. \quad (11)$$

С учетом (10), (11) относительная погрешность для F после преобразований примет вид

$$\delta_F = 2 \left(\frac{NvT_T}{2\pi r} + \frac{2\pi r}{NR} \right).$$

Приравнявая нулю производную по N , учитывая $vR \approx v_m R_0$ и обозначив $\omega_m = v_m/(2\pi r)$, оптимальное $N = N^*$, при котором имеет место минимум δ_a , можно представить в виде

$$N^* = \frac{2\pi r}{R_0} \sqrt{\frac{T_S}{T_T}} = \frac{1}{\omega_m \sqrt{T_S T_T}}. \quad (12)$$

Минимум погрешности определяется выражением

$$\delta_F^* = 4D_v^{-1} \sqrt{T_T / T_S}. \quad (13)$$

Таким образом, выражения (12), (13) позволяют рассчитать параметр N^* инкрементального датчика положения и оценить относительную погрешность величины F .

Методика расчета основных параметров для синтеза системы управления электроприводом основана на расчетных выражениях (7), (8) и (12), (13) и позволяет по исходным данным R , v_m , δ и t_m рассчитать величины T_s и R_0 , а затем построить сигнал задания скорости в соответствии с (2).

Далее, в зависимости от T_s и R_0 , определяется требуемый диапазон D регулирования скорости по выражению (3). Если диапазон не превосходит 50, возможно применение скалярного частотного управления АД. Для диапазона более 50 рекомендуется векторное управление [21, 22]. Как при векторном, так и при скалярном управлении необходим датчик скорости и положения, как правило, инкрементальный. Выражение (13) позволяет определить оптимальное значение количества событий на оборот и параметра N инкрементального датчика.

Пример. Для обеспечения $\delta_1 \leq 0,05$ при $R_m = 5$ м и $v_m = 0,2$ м/с интервал времени в соответствии с (6) должен быть $T_S < 7,9$ с. При $r = 0,05$ м и $t_m \geq 625$ с в соответствии с (7) требуется интервал времени $T_S \leq 1,0$ с, при котором условие (6) обеспечения точности заведомо выполнено. Требуемый диапазон регулирования скорости по выражению (3): $D_v = v_m / v_{\min} \approx R / R_0 = R_m / R_0 = 5/0,2 = 25$. При таком диапазоне возможно применение скалярного частотного управления. В соответствии с выражением (12) при $T_T = 0,01$ с количество событий от энкодера на один оборот должно быть $N^* = 2\pi r / R_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,05 / 0,2 \cdot 10 \approx 31$. Относительная погрешность (13) не превысит значения 0,02.

Имитационное моделирование

Целью имитационного моделирования является анализ динамики системы в процессе выполнения задаваемых при отборе пробы программ движения. Имитационное моделирование выполнено в соответствии с уравнениями (4) объекта и структурой системы одного из электроприводов, показанной на рис. 3. При непрерывном отборе пробы движение системы в соответствии с зависимостью (2) и рис. 4б показано на рис. 5 для дымовой трубы диаметром 10 м при наибольшей скорости 0,2 м/с с интервалом времени $T_S = 1$ с.

На рис. 5а представлены графики скорости и положения, на рис. 5б – погрешность отработки постоянства площади за единицу времени.

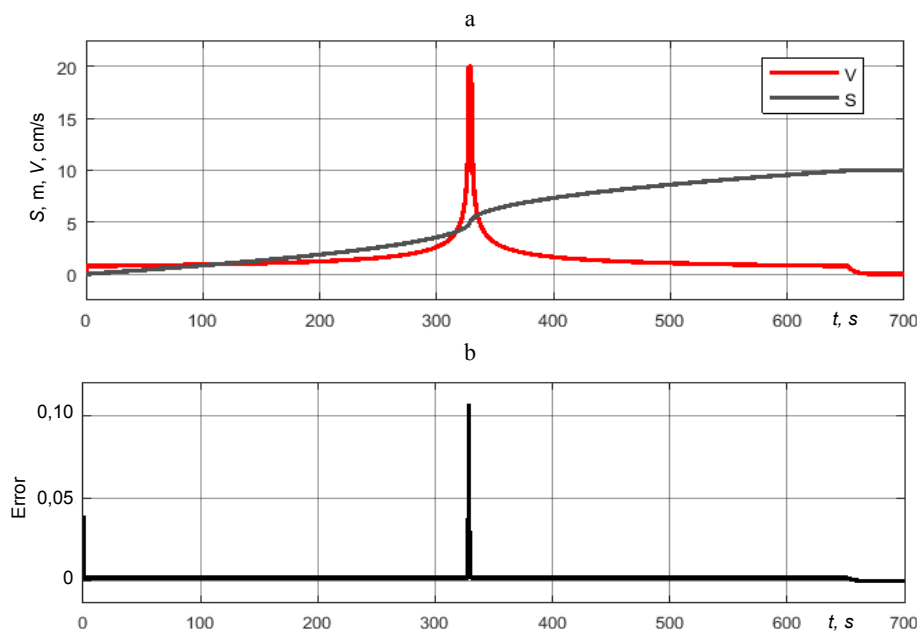


Рис. 5. Процесс движения по измерительной линии в режиме непрерывного отбора пробы, графики скорости v и пути S (а), график ошибки площади, проходимой за время T_S , (б)

Fig. 5. Process of movement along the measuring line in continuous sampling mode, graphs of speed v and position S (a), graph of the error of the area covered during the time T_S (b)

Как видно из рис. 5а, процесс является устойчивым и сигнал скорости соответствует сигналу задания с незначительным отличием. Погрешность закона постоянства площади показана на рис. 5b и не превосходит допустимого значения. Имитационное моделирование системы электропривода со скалярным частотным управлением и обратной связью по положению выполнено для анализа режима дискретного отбора пробы.

В системе применен пропорциональный регулятор положения. На рис. 6а, б представлены соответственно скорость электродвигателя и положение рабочего органа в процессе движения вдоль измерительной линии с остановкой в точке измерения и реверсом. Динамика системы является удовлетворительной, а погрешность положения (рис. 6b) в режиме постоянства скорости составляет не более 0,025 м, что допустимо.

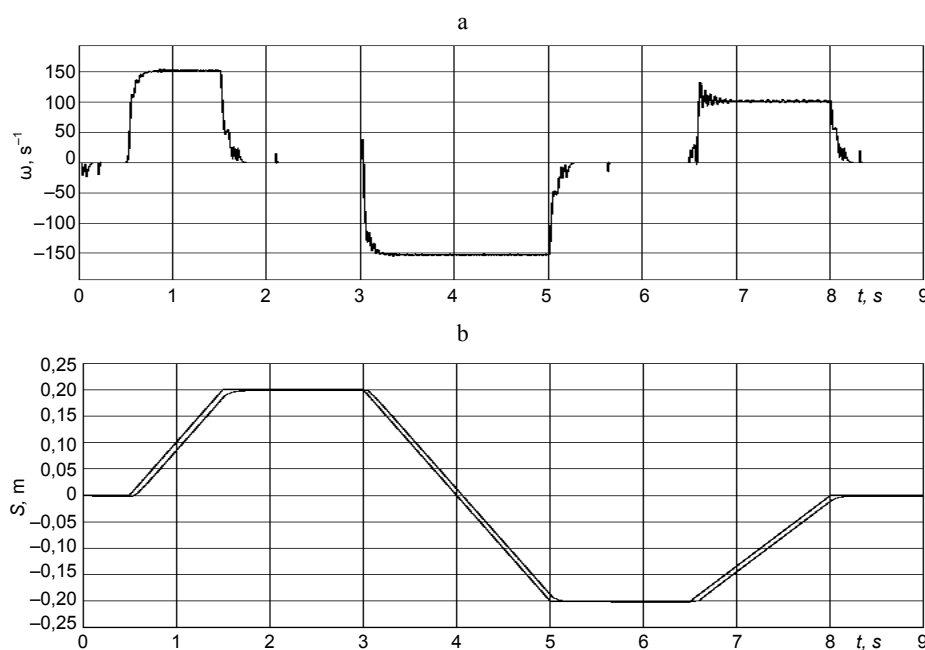


Рис. 6. Скорость вращения ротора двигателя (а),
сравнение заданного положения каретки и фактического (б)

Fig. 6. Motor speed (а), comparison of the specified position
of the carriage and the actual one (b)

Результаты моделирования подтверждают возможность улучшить репрезентативность отбора пробы, применяя автоматизацию на основе электропривода, в том числе для труб большого диаметра.

По сравнению с данными, представленными в [10], где репрезентативность пробы может иметь погрешность от 10 до 40 %, автоматизированный электропривод пробоотборного устройства позволит обеспечить репрезентативность с погрешностью менее 10 % за счет рекомендуемого режима изменения скорости в соответствии с (2).

ВЫВОДЫ

1. Автоматизация системы отбора пробы в сечении дымовой трубы на основе электропривода обеспечивает высокую точность отбора как в дискретном, так и в непрерывном режимах и позволяет улучшить репрезентативность отбора пробы за счет точного выполнения траектории движением устройства отбора.

2. Автоматизированная система позволяет набрать надежный массив данных для исследования процессов тепло- и массообмена внутри дымовых труб.

3. Предложенная методика расчета параметров на основании выражений (8), (15), (16) позволяет рассчитать основные параметры и построить сигнал задания скорости в соответствии с (2) для трубы заданного радиуса R_m и для заданного времени отбора пробы t_m , что улучшит репрезентативность пробы в режиме непрерывного отбора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Системы автоматического контроля и учета выбросов загрязняющих веществ тепловых электростанций в атмосферу. Основные требования: ГОСТ Р 113.38.03–2021. Введен 01.05.2022. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 36 с.
2. Качество воздуха. Выбросы стационарных источников. Требования к выбору измерительных секций и мест измерений, цели и плану измерений, и составлению отчета: ГОСТ Р ЕН 15259–2015. Введен 15.11.2015. Москва: Стандартиформ, 2015. 61 с.
3. Air Quality – Measurement of Stationary Source Emissions – Requirements for Measurement Sections and for the Measurement Objective, Plan and Report: EN 15259:2007.
4. Правила проектирования и эксплуатации автоматизированных систем контроля за выбросами загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух: ТКП 17.13-01–2008 (02120). Минск: Минприроды Республики Беларусь, 2008. 26 с.
5. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух (в том числе озоновый слой). Требования экологической безопасности в области охраны атмосферного воздуха [Электронный ресурс]: ЭкоНиП 17.08.06-001–2022: утв. постановлением М-вом природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь 29.12.2022, № 32-Т. Режим доступа: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/04/%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%9D%D0%B8%D0%9F-17.08.06-001-2022-%D0%B7%D0%B0%D1%89-2.pdf>.
6. Guidelines for Continuous Emission Monitoring Systems [Electronic Resource]: 1st Revised Guidelines for Continuous Emission Monitoring Systems August 2018 / Central pollution control board Parivesh Bhawan, East Arjun Nagar, Delhi-110032. Mode of access: [https://jspcb.nic.in/upload/uploadfiles/files/revised-ocems-guidelines%20\(2\)_compressed.pdf](https://jspcb.nic.in/upload/uploadfiles/files/revised-ocems-guidelines%20(2)_compressed.pdf)
7. TCEQ Sampling Procedures Manual Rev. July 19, 2016 // United States Environmental Protection Agency (USEPA) Title 40 Code of Federal Regulations Part 60, Appendix A Method 1 (USEPA Method 1). www.tceq.texas.gov.
8. Liu, D. H. F. Analyzer Sampling / D. H. F. Liu, B. G. Lipták // Analysis and Analyzers. CRC Press, 2016. P. 79–90. <https://doi.org/10.1201/9781315370323-4>.
9. Новожилова, Л. Л. Численные исследования аэродинамики дымовых труб с целью обеспечения достоверного контроля вредных выбросов ТЭС в атмосферу: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.14 / Л. Л. Новожилова. М., 2009. 181 с.
10. Обеспечение достоверного непрерывного инструментального контроля выбросов маркерных загрязняющих веществ ТЭС в атмосферу / П. В. Росляков [и др.] // Теплоэнергетика. 2022. № 2. С. 68–77. <https://doi.org/10.1134/s0040363621110047>.
11. Sednin, A. V. An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System / A. V. Sednin, A. V. Zherelo // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.

12. Сорока, Б. С. Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Ч. 1 / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 340–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354>.
13. Сорока, Б. С. Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Ч. 2: Образование вредных веществ при сжигании природного газа в атмосферных горелках: экспериментальные исследования / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 5. С. 450–461. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-450-461>.
14. https://mru-instruments.com/wp-content/uploads/2015/04/MGA-5-plus_Brochure-2015.pdf. date of 10.07.2023, 19–26.
15. GT5000 Terra FTIR Gas Analyzer [Electronic Resource] / Gasmeter. Mode of access: <https://www.gasmet.com/wp-content/uploads/2019/09/Gasmet-GT5000-Terra-Technical-Datasheet-ID-10233-1.pdf>. Date of access: 10.07.2023.
16. Емельяничков, В. И. Автоматические гибкие зонды и системы непрерывного контроля и учета выбросов вредных веществ дымовых труб тепловых электростанций / В. И. Емельяничков, Ю. Ю. Елисеенко // Экологические системы и приборы. 2020. № 6. С. 3–11.
17. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: ТКП 181–2009. Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2009. 332 с.
18. Анхимюк, В. Л. Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. 2-е изд., испр. Минск: Дизайн ПРО, 2002. 343 с.
19. Опейко, О. Ф. Выбор параметров устройства управления электроприводов с импульсным датчиком / О. Ф. Опейко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2007. № 2. С. 11–17.
20. Brock, S. The problem of measurement and control of speed in a drive with an inaccurate measuring position transducer / S. Brock, J. Deskur // 2008 10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Trento, Italy, 2008. P. 132–136. <https://doi.org/10.1109/AMC.2008.4516054>.
21. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. 2-е изд. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.
22. Фираго, Б. И. Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. Минск: Вышэйш. шк., 2016. 160 с.

Поступила 09.01.2024 Подписана в печать 14.03.2024 Опубликовано онлайн 31.05.2024

REFERENCES

1. State Standard R 113.38.03–2021. *Systems for Automatic Control and Accounting of Pollutant Emissions from Thermal Power Plants Into the Atmosphere. Primary Requirements*. Moscow, Russian Standardization Institute, 2021. 36 (in Russian).
2. State Standard R EN 15259–2015. *Air Quality. Emissions from Stationary Sources. Requirements for the Selection of Measuring Sections and Measurement Locations, the Purpose and Plan of Measurements, and Reporting*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 61 (in Russian).
3. EN 15259:2007. Air quality – measurement of Stationary Source Emissions – Requirements for Measurement Sections and for the Measurement Objective, Plan and Report. MKC [MKS = ICS – International Classification for Standards] 13.040.40. M. [Moscow]: Publishing House “Standartinform”, 2007.
4. ТКР [Technical Code of Common Practice] 17.13-01–2008 (02120). *Rules for the Design and Operation of Automated Systems for Monitoring Emissions of Pollutants and Greenhouse Gases Into Atmospheric Air*. Minsk, Publishing House of Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2008. 26 (in Russian).
5. EkoNiP [Environmental Standards and Regulations] 17.08.06-001–2022. *Environmental Protection and Nature Management. Atmospheric Air (Including the Ozone Layer). Environmental Safety Requirements in the Field of Atmospheric Air Protection” (Approved by the Resolution of Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus dated 29.12.2022 No 32-T*. Available at: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/04/%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%9D%D0%B8%D0%9F-17.08.06-001-2022-%D0%B7%D0%B0%D1%89-2.pdf> (in Russian).

6. *Guidelines for Continuous Emission Monitoring Systems: 1st Revised Guidelines for Continuous Emission Monitoring Systems August 2018*. Central Pollution Control Board Parivesh Bhawan, East Arjun Nagar, Delhi-110032. Available at: [https://jspcb.nic.in/upload/uploadfiles/files/revised-ocems-guidelines%20\(2\)_compressed.pdf](https://jspcb.nic.in/upload/uploadfiles/files/revised-ocems-guidelines%20(2)_compressed.pdf).
7. TCEQ Sampling Procedures Manual Rev. July 19, 2016 // United States Environmental Protection Agency (USEPA) Title 40 Code of Federal Regulations Part 60, Appendix A Method 1 (USEPA Method 1). www.tceq.texas.gov.
8. Liu D. H. F., Lipták B. G. (2016) Analyzer Sampling. *Analysis and Analyzers*. CRC Press, 79–90. <https://doi.org/10.1201/9781315370323-4>.
9. Novozhilova L. L. (2009) *Numerical Studies of the Aerodynamics of Chimneys in Order to Ensure Reliable Control of Harmful Emissions from Thermal Power Plants Into Atmosphere* [Dissertation]. Moscow. 181 (in Russian).
10. Roslyakov P. V., Kondrat'eva O. E., Ionkin I. L., Egorova L. E. (2022) Ensuring Reliable Continuous Instrumental Emission Control of Marker Pollutants from Thermal Power Plants Into the Atmosphere. *Thermal Engineering*, 69, 57–65. <https://doi.org/10.1134/s0040601521110045>.
11. Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.
12. Soroka B. S., Horupa V. V. (2020) Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 340–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354> (in Russian).
13. Soroka B. S., Horupa V. V. (2020) Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel. Part 2. Pollutants Formation by Natural Gas Combustion in Atmospheric Burners: Experimental Studies. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (5), 450–461. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-450-461> (in Russian).
14. <https://mru-instruments.com/wp-content/uploads/2015/04/MGA-5-plus>. Brochure-2015.pdf. date of 10.07.2023, 19–26.
15. *GT5000 Terra FTIR Gas Analyzer*. Gasmeter. Available at: <https://www.gasmet.com/wp-content/uploads/2019/09/Gasmet-GT5000-Terra-Technical-Datasheet-ID-10233-1.pdf> (accessed 10 July 2023).
16. Emelyanichkov V. I., Eliseenko Yu. Yu. (2020) Automatic Flexible Probes and Systems for Continuous Monitoring and Accounting of Emissions of Harmful Substances from Chimneys of Thermal Power Plants. *Ekologicheskie Sistemy i Pribory = Ecological Systems and Devices*, (6), 3–11 (in Russian).
17. TKP [Technical Code of Common Practice] 181–2009. *Rules for Technical Operation of Consumer Electrical Installations*. Minsk, Publishing House of Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2009. 332 (in Russian).
18. Ankhimuk V. L., Opeyko O. F., Mikheev N. N. (2002) *Automatic Control Theory*. 2nd ed. Minsk, Dizain PRO Publ. 343 (in Russian).
19. Opeyko O. F. (2007) Selection of Control Device Parameters for Electric Drive with Pulse Transducer. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 11–17 (in Russian).
20. Brock S., Deskur J. (2008) The problem of Measurement and Control of Speed in a Drive with an Inaccurate Measuring Position Transducer. *2008 10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*. Trento, Italy, 132–136. <https://doi.org/10.1109/AMC.2008.4516054>.
21. Firago B. I., Pavlyachik L. B. (2007) *Electric Drive Theory*. 2nd ed. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ. 585 (in Russian).
22. Firago B. I., Vasilyev D. S. (2016) *Vector Control Systems for Electric Drives*. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ. 160 (in Russian).

Received: 09 January 2024

Accepted: 14 March 2024

Published online: 31 May 2024