

УДК 004.942; 504.064.38; 504.064.2.001.18
DOI: 10.15827/0236-235X.140.707-714

Дата подачи статьи: 11.07.22, после доработки: 30.09.22
2022. Т. 35. № 4. С. 707–714

Построение декарбонирующей замкнутой системы управления «Природа–Техногеника»

*Р.И. Сольнищев*¹, д.т.н., профессор, *remira70@mail.ru*

*Г.И. Коршунов*², д.т.н., профессор, *kgi@pantes.ru*

*Лэй Ван*¹, аспирант, *18361206765@163.com*

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, 197022, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, 190000, Россия

В статье рассмотрены выбросы двуокиси углерода энергетическими и промышленными предприятиями в совокупности с целью построения декарбонирующей замкнутой системы управления «Природа–Техногеника».

Наряду с известными подходами для достижения декарбонизации атмосферы предложены альтернативный подход к решению проблемы на основе замкнутой системы управления «Природа–Техногеника», математические модели и основные подходы к анализу и синтезу замкнутой системы управления «Природа–Техногеника» для совокупности энергетических и промышленных предприятий, которые служат основой для разработки соответствующей АСУ ТП. Проведены анализ и параметрический синтез управлений по этим моделям на основе математического моделирования. Основным критерием в этом случае является минимизация выбросов CO₂. Рассмотрено построение такой системы в составе энергетических и промышленных предприятий, которая может быть применена для разных видов производства. Приведены этапы проектирования основных подсистем и звеньев замкнутой системы управления «Природа–Техногеника», вырабатывающей управления и реализуемой в виде АСУ ТП. В зависимости от объекта применяются конечные регуляторы управления – фильтры, химические адсорберы, катализаторы и другие.

В данной работе рассмотрены природные источники топлива энергетических предприятий, которые вызывают наибольшие выбросы CO₂ (уголь, природный газ и т.д.). Поскольку источники топлива имеют различные единицы измерения и содержание углерода, каждый из них приводится к стандартному углю с коэффициентами пересчета. Приведены результаты анализа состояния и перспектив экологической обстановки по выбросам CO₂ в г. Пекине (КНР), оценок ограничений на потребление энергии от энергетических и промышленных предприятий. На основе моделирования предложенной многомерной системы управления предложено решение проблемы минимизации выбросов CO₂ совокупности промышленных предприятий и предприятий-источников энергии (ТЭЦ). Показана возможность принципиального решения проблемы минимизации выбросов CO₂ путем реализации рассматриваемой декарбонирующей системы управления на основе современных аппаратно-программных модулей АСУ ТП и соответствующей базы знаний.

Ключевые слова: декарбонизация, система управление «Природа–Техногеника», выбросы CO₂, модель скользящего среднего, математическое моделирование, анализ процессов динамики, САПР, АСУ ТП.

Проблема глобального изменения климата стала самым масштабным и далеко идущим вызовом, с которым когда-либо сталкивалось человечество. Сдерживать глобальное потепление позволит низкоуглеродное развитие – новый тип подхода к развитию современного общества, позволяющий справиться с глобальным изменением климата и энергетическим кризисом. Рассмотрим проблему на примере г. Пекин (КНР). Национальный план развития четко выдвигает необходимость минимизации потребления энергии и, соответственно, выбросов *предприя-*

тий-источников энергии (ПИЭ), в то же время для каждого *промышленного предприятия* (ПП) потребление энергии непосредственно влияет на выпуск продукции. Комплексы ПИЭ и ПП, на вход которых поступают природные ресурсы, а на выходе, помимо основной продукции (энергии, машин, цемента и т.д.), выбросы в атмосферу (CO₂, SO₂, ...), могут оказаться экологически более вредными, чем каждое предприятие в отдельности. Возникает проблема минимизации выбросов совокупности ПИЭ и ПП при условии ограничений потребления энергии.

Интегрированная модель принятия решений по планированию атмосферной среды и энергетики в Пекине была предложена в 1991 г. и в основном используется для количественного описания зависимости между качеством атмосферной среды и планированием энергетики [1]. Проведены исследования по целевым показателям выбросов углерода и сделан анализ будущих энергетических стратегий и политики Китая. Построена комплексная система оценочных рамок для региональной ресурсной и экологической несущей способности [2]. Модель оптимизации энергетической структуры объединена с моделью контроля загрязнения воздуха [3]. Исследовано влияние изменения энергопотребления на загрязнение воздуха на примере промышленной структуры г. Шанхая (КНР) [4]. Предложена технология углеродных ферм, основанная на уникальной эколого-географической среде России, с использованием лесных технологий для поглощения парниковых газов для достижения цели декарбонизации экономики [5].

Приведенные исследования являются ориентиром для авторов данной работы, но не могут быть полностью применимыми для решения конкретных задач из-за различных фоновых условий. На основе этих данных создается и развивается система управления циклом декарбонизации с двойными целями ПИЭ и ПП для конкретного региона.

Основное внимание уделяется минимизации выбросов CO₂ на ПИЭ и ПП при ограничениях на энергопотребление ПП [6, 7]. Принципиальная схема системы взаимодействия ПИЭ и ПП с управлениями $U_1(t)$ и $U_2(t)$ потоками сырья, энергии, продукции, выбросов ПИЭ и ПП по критерию $\min(\text{CO}_2)$ и заданных ограничений показана на рисунке 1.

Анализ выбросов CO₂

Ископаемые источники энергии, такие как уголь и нефть, составляют подавляющее большинство источников топлива в Пекине, что отражается в измеренных и рассчитанных выбро-

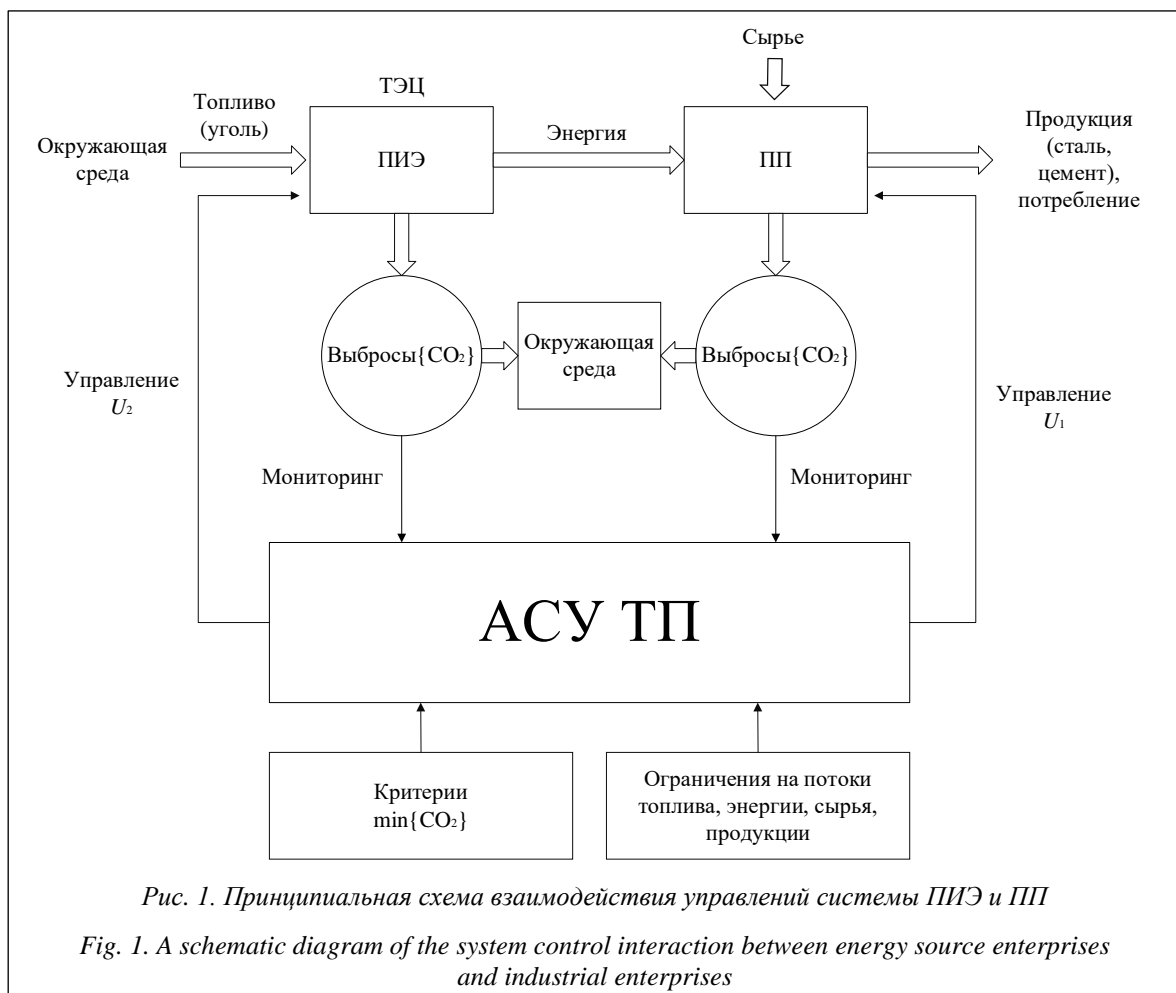


Рис. 1. Принципиальная схема взаимодействия управлений системы ПИЭ и ПП

Fig. 1. A schematic diagram of the system control interaction between energy source enterprises and industrial enterprises

сах CO₂ от ПИЭ и ПП. Данные о расходе топлива в Пекине с 2000 по 2019 гг. показали, что среднегодовой темп его роста составил 4,09 %. Статистика конкретных данных показана на рисунке 2 [8].

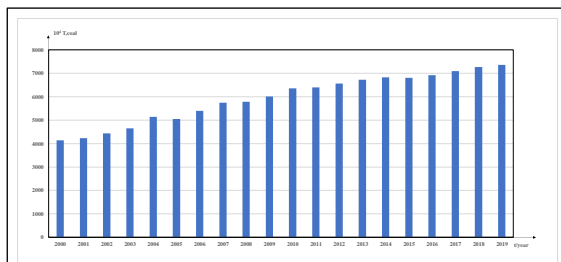


Рис. 2. Статистические результаты по общему потреблению топлива в Пекине в 2000–2019 гг.

Fig. 2. Statistical results for total fuel consumption in Beijing from 2000 to 2019

В настоящем исследовании рассматриваются природные источники топлива ПИЭ, которые вызывают наибольшие выбросы CO₂ (уголь, природный газ и т.п.). Поскольку каждый источник топлива имеет различные единицы измерения и содержание углерода, в данной работе он приводится к стандартному углю с коэффициентами пересчета, приведенными в Руководстве МГЭИК для национальной инвентаризации парниковых газов. Коэффициенты пересчета расхода различных видов топлива следующие: уголь – 0.7143, мазут – 1.4286, природный газ – 1.33, сжиженный нефтяной газ – 1.7143, бензин/керосин – 1.4714, дизель – 1.4571.

Вначале определяется количество стандартного угля Q [9, 10]:

$$Q = CE_i, \tag{1}$$

где C – коэффициент пересчета; E_i – потребление i -го источника энергии.

Количество стандартного угля, рассчитанное по формуле (1), пересчитывается в количество выбросов CO₂ на основе коэффициента перевода стандартного угля в CO₂ (V_{CO_2}) по формуле

$$V_{CO_2} = KQ, \tag{2}$$

где K – коэффициент преобразования стандартного угля в CO₂, который варьируется от региона к региону в силу особенностей и технических условий.

Общие выбросы CO₂ рассчитываются путем умножения количества сжигаемых ископаемых энергоносителей на соответствующие коэффициенты выбросов CO₂.

Выбросы углерода от энергетического топлива i = потребление энергетического топлива i * коэффициент выброса CO₂ для энергетического топлива i .

Коэффициент выброса CO₂ = производство низкого тепла * коэффициент содержания углерода * коэффициент окисления углерода * 44/12.

В Китае уголь потребляется чаще, а энергоемкость его ниже, чем у других высокоуглеродистых видов топлива, поэтому текущий коэффициент преобразования (k) в основном находится в диапазоне 2,42–2,72. В данной работе используется коэффициент преобразования 2,6 [9].

В Пекине относительно мало отраслей промышленного производства, которые непосредственно производят углекислый газ, но связаны с ПИЭ и ПП, производящими материалы для ПП, которые выбрасывают углекислый газ. Основные выбросы приходятся на ТЭЦ, металлургические и цементные заводы.

Анализ выбросов CO₂ совокупности ПИЭ и ПП с учетом приведенных коэффициентов показал их сокращение с 5886.868 в 2008 г. до 3700.476 в 2019 г. (рис. 3).

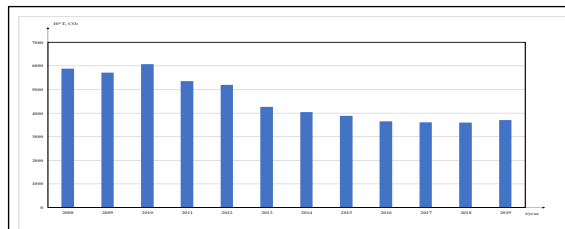


Рис. 3. Оценка общего объема промышленных выбросов CO₂ в Пекине в 2008–2019 гг.

Fig. 3. Estimated total industrial CO₂ emissions in Beijing from 2008 to 2019

Для оценки дальнейших тенденций рассмотрим прогноз промышленных выбросов CO₂ на ближайшие годы на основе метода регрессионного анализа [9].

Обработка исходных данных на стационарность в данной работе проводилась в системе MATLAB с тестированием ADF и KPSS [10, 11]. Результаты обработки показаны в таблице.

Результаты исходных данных обработки
The results of the raw processing data

Данные	Тест		Проходимость теста на стационарность
	ADF	KPSS	
Необработанные	1	1	Нет
После обработки	1	0	Да

Объединением модели авторегрессии (AR) и модели скользящего среднего (MA) получена модель разностного авторегрессионного скользящего среднего ARIMA с параметрами p, d, q , где d – порядок разности, которую необходимо внести в данные [12]. Исходя из оценки $d = 1$, численные значения, выбранные для p и q в данной работе, составляют 4 и 3 соответственно. После расчетов по указанным моделям и алгоритмам оказалось, что полученные прогнозы соответствуют общим промышленным выбросам углерода. Полученные результаты анализа вводятся в базу знаний (БЗ) средствами системы управления БЗ (СУБЗ) аналогично [7]. В дальнейшем такая БЗ служит для проектирования АСУ ТП в составе системы управления ПИЭ и ПП (рис. 1).

Переходя к построению замкнутой системы управления «Природа–Техногеника» (ЗСУ ПТ) для ПИЭ и ПП, будем исходить из условия, что минимизация выбросов CO₂ происходит после оценки спроса на энергию ПП. Этот спрос используется в качестве оценки верхнего предела потребления энергии ПП от ПИЭ в виде

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 E_i \leq E, \\ E_i \leq E_i^d, \\ (\frac{Q_k}{Q_i} - 1)(\frac{E_k}{E_i}) \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где E – общее количество энергии, доступное для использования в промышленной системе региона; E_i – количество энергии, поступающей от i -го ПИЭ; E_i^d – предельное значение E_i [13].

Первое ограничение в (3) состоит в том, что для решения задачи энергосбережения общее количество выделенной энергии должно находиться в заданном диапазоне; второе – i -е ПП не должно потреблять больше энергии, чем определено стандартами [14], третье – распределение энергии между ПП- k и ПП- i должно быть связано с объемом их промышленного производства, предприятия с высоким объемом производства, как правило, имеют более высокие энергозатраты.

Минимизация выбросов CO₂

На основе концепции ЗСУ ПТ рассмотрим структуру совместного управления ПИЭ и ПП [14].

На рисунке 4 представлена обобщенная схема минимизации выбросов совокупности ПИЭ и ПП. На схеме изображены два контура управления с регуляторами – внутренний $L_1(p)$ и внешний $L_2(p)$. Операторы $L_1(p), L_2(p)$ строятся по передаточным функциям «вход-выход» звеньев контуров управления, $p \cong d/dt$.

Минимизация выбросов CO₂ (Y_1, Y_2) достигается путем разработки АСУ ТП на основе

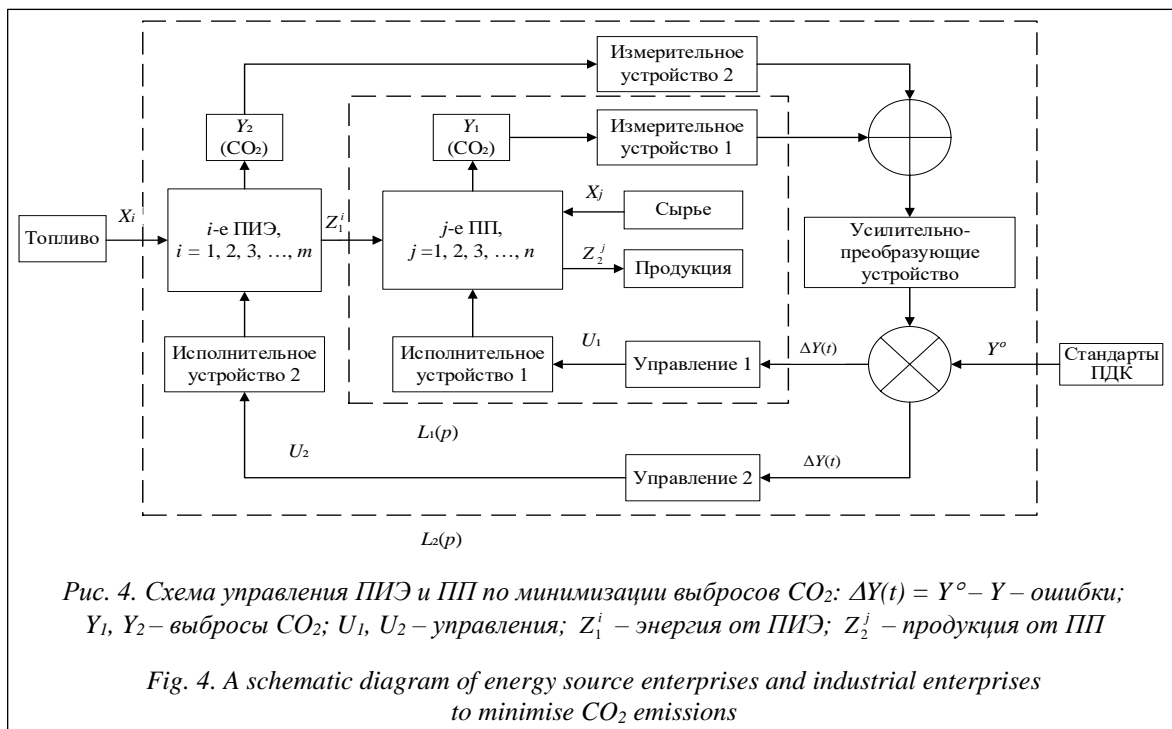


Рис. 4. Схема управления ПИЭ и ПП по минимизации выбросов CO₂: $\Delta Y(t) = Y^\circ - Y$ – ошибки; Y_1, Y_2 – выбросы CO₂; U_1, U_2 – управления; Z_1^i – энергия от ПИЭ; Z_2^j – продукция от ПП

Fig. 4. A schematic diagram of energy source enterprises and industrial enterprises to minimise CO₂ emissions

концепции ЗСУ ПТ для сочетания ПИЭ и ПП по критериям, принятым стандартами по промышленным выбросам.

Установление связей функционирования ПИЭ и ПП сводится к построению соответствующих математических моделей системной динамики рассматриваемых потоков.

Модели взаимодействия ПИЭ и ПП, а также выбросов этих предприятий и окружающей среды имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{dZ_1^i}{dt} &= K_i^{(1)} X_i - K_i^{(2)} Y_i, \\ \frac{dZ_2^j}{dt} &= K_j^{(1)} Z_1^i - K_j^{(2)} Y_j + K_j^{(3)} X_j, \end{aligned} \quad (4)$$

где Z_1^i [МДж] – количество энергии от i -го ПИЭ; X_i [кг] – количество топлива (уголь) на входе ПИЭ; Y_i [кг] – количество CO_2 , выбрасываемого в атмосферу ПИЭ; Z_2^j [кг] – количество продукции ПП (сталь, цемент); X_j [кг] – количество сырья (железная руда, известняк) на входе ПП; Y_j [кг] – количество CO_2 , выбрасываемого в атмосферу ПП; $K_i^{(1)}$ [МДж / С · кг] – коэффициент преобразования топлива в энергию; $K_i^{(2)}$ [МДж / С · кг] – коэффициент преобразования сгорания угля в выбросы CO_2 ; $K_j^{(1)}$ [кг / С · МДж] – коэффициент преобразования энергии в продукцию; $K_j^{(2)}$ [1 / С] – коэффициент преобразования (потерь) продукции в выбросы CO_2 ; $K_j^{(3)}$ [1 / С] – коэффициент преобразования сырья в продукцию. Исходные данные для ПИЭ и ПП приведены после преобразования в стандартный уголь (энергосодержание одной тонны стандартного угля составляет 29 307 МДж):

$$\begin{aligned} \frac{dY_i}{dt} &= K_i^{(4)} Z_1^i - K_i^{(5)} Y_i, \\ \frac{dY_j}{dt} &= K_j^{(4)} Z_2^j - K_j^{(5)} Y_j, \end{aligned} \quad (5)$$

где $K_i^{(4)}, K_j^{(4)}, K_i^{(5)}, K_j^{(5)}$ – соответствующие коэффициенты преобразования потоков энергии от ПИЭ, потоков продукции от ПП, компенсации потоков выбросов от ПИЭ и ПП природными и техногенными средствами [6].

Классификация источников энергии

Усредненные значения коэффициентов \bar{K}_i и \bar{K}_j получены из Китайского ежегодника статистики энергетики.

Начальные значения переменных ($Z_1^i(0) = 1.64 \times 10^{11}$ [МДж], $Z_2^j(0) = 1.32 \times 10^{10}$ [кг], $Y_i(0) = 0$ [кг], $Y_j(0) = 0$ [кг], $X_i(0) = 5.6 \times 10^9$ [кг], $X_j(0) = 1.42 \times 10^{10}$ [кг]) и коэффициентов ($K_i^{(1)} = 29.31$, $K_i^{(2)} = 18.47$, $K_j^{(1)} = 0.02$, $K_j^{(2)} = 0.14$, $K_j^{(3)} = 0.70$, $K_i^{(4)} = 0.28$, $K_j^{(4)} = 31.07$, $K_i^{(5)} = 1.55$, $K_j^{(5)} = 1.68$) приведены по официальным данным Китая.

После ввода управлений U_1 и U_2 получим:

$$\begin{aligned} \frac{dY_i}{dt} &= K_i^{(4)} Z_1^i - K_i^{(5)} Y_i - U_1, \\ \frac{dY_j}{dt} &= K_j^{(4)} Z_2^j - K_j^{(5)} Y_j - U_2, \end{aligned} \quad (6)$$

где $U_1 = F(\Delta Y_i)$, $U_2 = F(\Delta Y_j)$ – управления, которые синтезируются в общем случае по функционалу

$$\min\{Y[(\Delta Y_i, \Delta Y_j)]\}. \quad (7)$$

Решение системы уравнений (4), (5) при заданных начальных условиях $Z_1^i(0)$, $Z_2^j(0)$, $Y_i(0)$, $Y_j(0)$, $X_i(0)$, $X_j(0)$ и средних значениях коэффициентов $K_i^{(1)}$, $K_i^{(2)}$, $K_j^{(1)}$, $K_j^{(2)}$, $K_j^{(3)}$, $K_i^{(4)}$, $K_j^{(4)}$, $K_i^{(5)}$, $K_j^{(5)}$ позволяет произвести предварительный анализ функционирования системы ПИЭ–ПП. Включение управлений (7) добавляет к уравнениям (4) и (5) систему уравнений (6) с синтезированными параметрами регуляторов.

На рисунке 5 приведены результаты моделирования системы ПИЭ–ПП по уравнениям (4), (5).

Результаты моделирования системы управления ПИЭ–ПП после ввода управлений

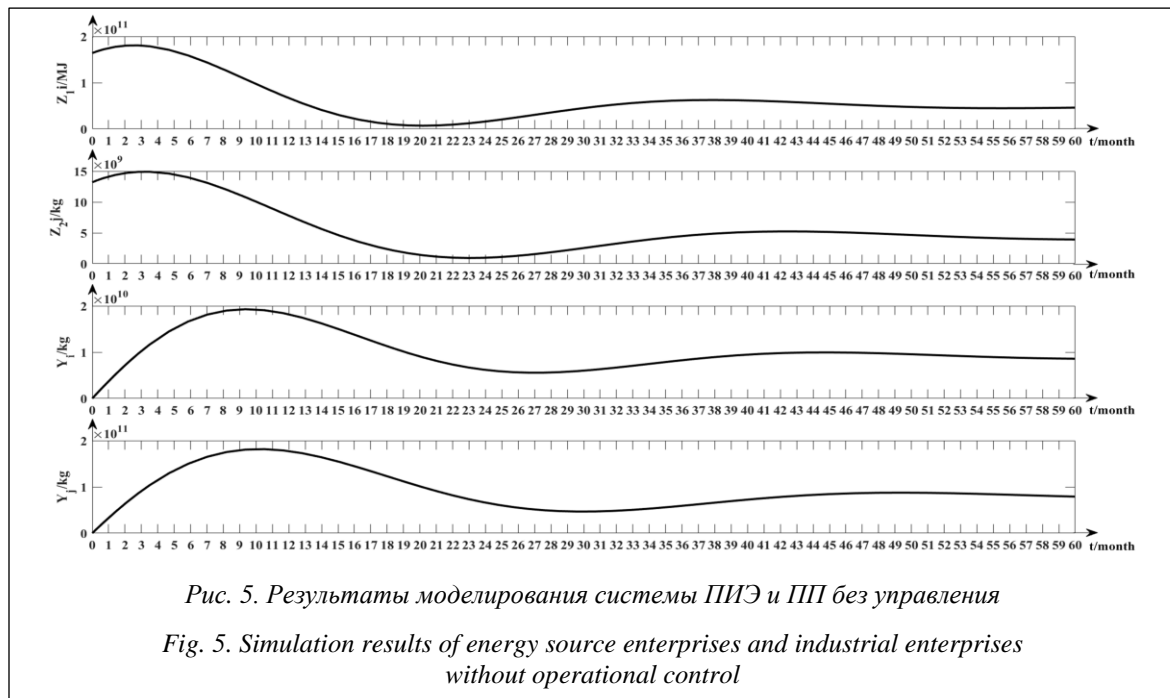
$$U_1 = \gamma_1 \Delta Y_i + \zeta_1 \int \Delta Y_i dt + \xi_1 \frac{d}{dt} \Delta Y_i, \quad (8)$$

$$U_2 = \gamma_2 \Delta Y_j + \zeta_2 \int \Delta Y_j dt + \xi_2 \frac{d}{dt} \Delta Y_j, \quad (9)$$

с варьируемыми коэффициентами γ_1 , ζ_1 , ξ_1 , γ_2 , ζ_2 , ξ_2 (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-4/2022-4-dop/4.jpg>) приведены на рисунке (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-4/2022-4-dop/5-jpg>).

Путем параметрического синтеза ПИД-регулятора, как следует из результатов моделирования, можно значительно снизить выбросы CO_2 в системе управления ПИЭ–ПП.

На следующем этапе разработки АСУ ТП, соответствующей рассмотренной концепции ЗСУ ПТ для объекта проектирования ПИЭ- i -ПП- j , проводятся анализ, синтез и расчет каждого кон-



тура САУ, представленного операторами $L_1(p)$, $L_2(p)$ на принципиальной схеме (рис. 4).

Заключение

Предложен подход к созданию декарбонизирующей системы управления, основанной на ЗСУ ПТ. Для анализа выбросов CO_2 ПП в зависимости от ПИЭ (например, ТЭЦ) предложены математические модели взаимодействия «промышленные предприятия–выбросы углерода–потребители продукции». Проведены анализ и параметрический синтез управлений по этим моделям на основе математического моделирования. Полученные результаты основаны на проведенном анализе по модели ARIMA для расчета данных и прогнозов временного ряда промыш-

ленных выбросов углерода в Пекине. Полученные данные прогноза на период 2020–2022 гг. показали, что результаты соответствуют существующей тенденции энергетических и производственных выбросов углерода. Модели передачи энергии от ПИЭ к ПП с вводом управлений и взаимодействием ПИЭ с ПП с определенным контролем энергии приводят к решению задачи минимизации выбросов CO_2 .

Предложенный подход имеет практический выход по снижению выбросов CO_2 . Его реализация в виде соответствующей АСУ ТП позволит снизить выбросы CO_2 , что окажет положительное влияние на экологическую защиту города. В перспективе подход может найти широкое применение для построения декарбонизирующей системы управления.

Исследование проводится при поддержке Государственного комитета по стипендиям КНР (грант № 202109010139).

Литература

1. Dong K. Transition path of China's energy consumption structure and its optimization model in a low-carbon. Doctor of Management. Management Science and Engineering, 2019, pp. 1–21.
2. Wang L., Liu H. Comprehensive evaluation of regional resources and environmental carrying capacity based on PS-DR-DP theoretical model. J. of Geographical Sciences, 2019, vol. 29, no. 3, pp. 363–376. DOI: 10.1007/s11442-019-1603-4.
3. Zhou L. Air pollutant emission control based on energy structure adjustment. Proc. Int. Conf. on Science, Technology, Innovation and Education Development, 2019, pp. 272–273.
4. Li S., Zhu P. The impact of industrial restructuring and energy consumption changes on air pollution – an empirical analysis based on Shanghai input-output tables. Shanghai Economic Research, 2017, no. 6, pp. 82–89.

5. Митрофанова И.В. Декарбонизация экономики – генеральный тренд развития России и ее регионов в XXI веке // Региональная экономика. Юг России. 2021. № 4. С. 4–13. DOI: 10.15688/te.volsu.2021.4.1.
6. Сольнищев Р.И., Коршунов Г.И. Системы управления «Природа–Техногеника». СПб: Политехника, 2013. 205 с.
7. Сольнищев Р.И., Лэй В., Кузьмин С.А., Куприянов Г.А. Анализ состояния окружающей среды и вопросы нейтрализации выбросов в Китае на примере Пекина // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 4. С. 649–659. DOI: 10.15827/0236-235X.136.649-659.
8. Zhu S., Cai B. et al. The main content and insights of 2019 refinements to IPCC 2006 Guidelines. *Climate Change Research*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 86–94.
9. Liu Yusheng. The research on the relationship for carbon emissions, energy consumption and economic growth of Beijing. *Master of Economics. National Economics*, 2013, pp. 16–25.
10. Aylar E., Smeekes S., Westerlund J. Lag truncation and the local asymptotic distribution of the ADF test for a unit root. *Statistical Papers*, 2019, vol. 60, no. 6, pp. 2109–2118. DOI: 10.1007/s00362-017-0911-y.
11. Kokoszka P., Young G. KPSS test for functional time series. *Statistics*, 2016, vol. 50, no. 5, pp. 957–973. DOI: 10.1080/02331888.2015.1128937.
12. Zhou K., Wang W.Y., Hu T., Wu C.H. Comparison of time series forecasting based on statistical ARIMA model and LSTM with attention mechanism. *J. of Physics: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1631, no. 1, art. 012141. DOI: 10.1088/1742-6596/1631/1/012141.
13. Qiang H., Zhenglin L. A two-tier planning model for energy allocation in industrial sector based on total control. *Chinese J. of Management Science*, 2013, vol. 21, no. 2, pp. 168–174.
14. Korshunov G.I., Solnitsev R.I., Zhilnikova N.A., Polyakov S.L. Models of cyber-physical control systems for pollution minimization technologies. *Proc. SAEC*, 2022, pp. 442–450.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.140.707-714

Received 11.07.22, Revised 30.09.22
2022, vol. 35, no. 4, pp. 707–714

Designing a decarbonising closed-loop "Nature–Technology" control system

R.I. Solnitsev¹, *Dr.Sc. (Engineering), Professor, remira70@mail.ru*

G.I. Korshunov², *Dr.Sc. (Engineering), Professor, kgi@pantes.ru*

Lei Wang¹, *Postgraduate Student, Corresponding Author, 18361206765@163.com*

¹ *St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197022, Russian Federation*

² *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 190000, Russian Federation*

Abstract. This paper considers carbon dioxide emissions from both energy and industrial enterprises in order to build a decarbonising closed-loop "Nature–Technology" control system based on the example of Beijing, PRC.

Along with the known approaches to achieve atmospheric decarbonisation, the paper proposes an alternative approach to solving the problem based on a closed-loop "Nature–Technology" control system. Mathematical models and basic approaches to the analysis and synthesis of a closed-loop "Nature–Technology" control system are proposed for the combination of energy and industrial enterprises as a basis for developing an appropriate automated process control system. The analysis and parametric synthesis of controls according to these models is based on mathematical modelling. In this case, the main criterion is to minimise CO₂ emissions. The paper considers the construction of such a system as a part of energy and industrial enterprises, which might be applied to different types of production. The paper gives the stages of designing the main subsystems and links of the closed-loop "Nature–Technology" control system, which generates control and is implemented in the form of automated process control system. Final control regulators - filters, chemical adsorbers, catalysts and others are applied depending on the facility.

This paper considers the natural fuel sources of the energy enterprises causing the highest CO₂ emissions (coal, natural gas, etc.). As every fuel source is different in metric units and carbon content, this paper converts each source to "standard coal" with conversion factors. There are results on the status and prospects of the environmental situation regarding CO₂ emissions in Beijing, PRC, estimates of energy consumption limits from energy and industrial enterprises. Based on the modelling of the proposed multidimensional control system, the authors propose a solution to the problem of minimising CO₂ emissions for a combination of industrial enterprises and energy source enterprises (Thermal Power Plant). Taking Beijing, PRC as the example, the

paper shows the possibility of fundamentally solving the problem of minimising CO₂ emissions by implementing the considered decarbonising control system based on modern hardware and software modules automated process control system and an appropriate knowledge base.

Keywords: decarbonisation, "Nature–Technology" control system, CO₂ emissions, moving average model, mathematical modelling, dynamics process analysis, computer-aided design, automated process control system.

Acknowledgements. *The study was realized with the support of the China Scholarship Council (grant no. 202109010139).*

References

1. Dong K. Transition path of China's energy consumption structure and its optimization model in a low-carbon. *Doctor of Management. Management Science and Engineering*, 2019, pp. 1–21.
2. Wang L., Liu H. Comprehensive evaluation of regional resources and environmental carrying capacity based on PS-DR-DP theoretical model. *J. of Geographical Sciences*, 2019, vol. 29, no. 3, pp. 363–376. DOI: 10.1007/s11442-019-1603-4.
3. Zhou L. Air pollutant emission control based on energy structure adjustment. *Proc. Int. Conf. on Science, Technology, Innovation and Education Development*, 2019, pp. 272–273.
4. Li S., Zhu P. The impact of industrial restructuring and energy consumption changes on air pollution – an empirical analysis based on Shanghai input-output tables. *Shanghai Economic Research*, 2017, no. 6, pp. 82–89.
5. Mitrofanova I.V. Decarbonization of the economy – the general trend of development of Russia and its regions in the 21st century. *Regional Economy. South of Russia*, 2021, no. 4, pp. 4–13. DOI: 10.15688/re.volsu.2021.4.1 (in Russ.).
6. Solnitsev R.I., Korshunov G.I. "Nature–Technology" Control Systems. St. Petersburg, 2013, 205 p. (in Russ.).
7. Solnitsev R.I., Lei W., Kuzmin S.A., Kupriyanov G.A. The environment status analysis and the issues of emission neutralization in China on the example of the Beijing area. *Software & Systems*, 2021, vol. 34, no. 4, pp. 649–659. DOI: 10.15827/0236-235X.136.649-659 (in Russ.).
8. Zhu S., Cai B. et al. The main content and insights of 2019 refinements to IPCC 2006 Guidelines. *Climate Change Research*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 86–94.
9. Liu Yusheng. The research on the relationship for carbon emissions, energy consumption and economic growth of Beijing. *Master of Economics. National Economics*, 2013, pp. 16–25.
10. Aylar E., Smeekes S., Westerlund J. Lag truncation and the local asymptotic distribution of the ADF test for a unit root. *Statistical Papers*, 2019, vol. 60, no. 6, pp. 2109–2118. DOI: 10.1007/s00362-017-0911-y.
11. Kokoszka P., Young G. KPSS test for functional time series. *Statistics*, 2016, vol. 50, no. 5, pp. 957–973. DOI: 10.1080/02331888.2015.1128937.
12. Zhou K., Wang W.Y., Hu T., Wu C.H. Comparison of time series forecasting based on statistical ARIMA model and LSTM with attention mechanism. *J. of Physics: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1631, no. 1, art. 012141. DOI: 10.1088/1742-6596/1631/1/012141.
13. Qiang H., Zhenglin L. A two-tier planning model for energy allocation in industrial sector based on total control. *Chinese J. of Management Science*, 2013, vol. 21, no. 2, pp. 168–174.
14. Korshunov G.I., Solnitsev R.I., Zhilnikova N.A., Polyakov S.L. Models of cyber-physical control systems for pollution minimization technologies. *Proc. SAEC*, 2022, pp. 442–450.

Для цитирования

Сольницев Р.И., Коршунов Г.И., Лэй Ван Построение декарбонизирующей замкнутой системы управления «Природа–Техногеника» // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 4. С. 707–714. DOI: 10.15827/0236-235X.140.707-714.

For citation

Solnitsev R.I., Korshunov G.I., Lei Wang Designing a decarbonising closed-loop "Nature–Technology" control system. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 4, pp. 707–714 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.140.707-714.