

УДК 658.512.22

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ «ПРИРОДА-ТЕХНОГЕНИКА»

Р. И. Сольницев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

До Суан Чо,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Излагается дальнейшее развитие теории и практики создания замкнутой системы управления «Природа-техногеника», предназначенной для эффективного снижения загрязняющих веществ, выбрасываемых промышленными предприятиями в атмосферу. Представлены алгоритмы обработки и передачи метеорологических данных в систему управления «Природа-техногеника».

Ключевые слова — экология, загрязняющие вещества, система автоматического управления, метеорологическое обеспечение, алгоритм.

Введение

Замкнутая система управления «Природа-техногеника» (ЗСУПТ) предназначена для минимизации загрязняющих веществ (ЗВ) в окружающей среде. Концепция ЗСУПТ и ее развитие изложены в предыдущих работах (например, [1]). В данной статье рассматривается ЗСУПТ в атмосфере. Важной задачей в процессе создания этой системы является разработка средств ее метеорологической поддержки в реальном времени. Поскольку проектирование ЗСУПТ проводится с помощью САПР, рассматриваются постановка задачи, алгоритмизация обработки, ввода метеорологической информации, а также некоторые результаты применения соответствующей подсистемы САПР ЗСУПТ.

Влияние метеорологических данных на ЗСУПТ

Скорость потока переноса, \tilde{V} , ЗВ в атмосфере от предприятий — источников ЗВ до датчиков измерения (рис. 1) существенно зависит от метеорологических данных в заданной окрестности источника ЗВ (природопользовательской зоне).

Основными составляющими метеорологического влияния на скорость потока переноса ЗВ \tilde{V}

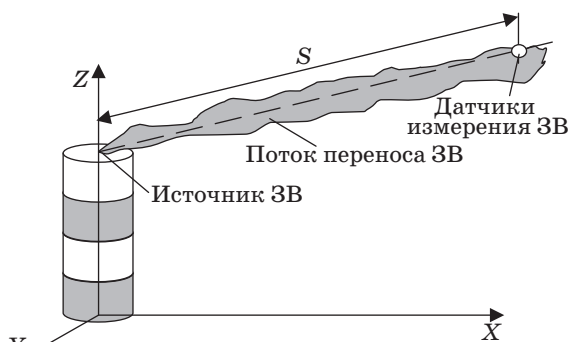
являются скорость ветра V , температура T , давление P , влажность W .

Скорость потока \tilde{V} определяет время запаздывания τ переноса ЗВ от источника до датчиков измерения концентраций ЗВ. ЗСУПТ представляет собой систему автоматического управления (САУ), в которой объект управления — распределенная система [2]. Структурная схема ЗСУПТ (рис. 2) включает устройства как отдельные звенья этой САУ [3].

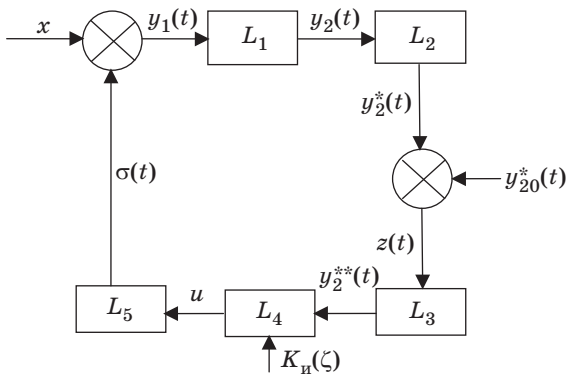
На структурной схеме обозначены операторы:

L_1 — переноса ЗВ от источника ЗВ до точки измерения параметров;

L_2 — измерительного устройства (датчика);



■ Рис. 1. Поток переноса ЗВ в атмосфере



■ Рис. 2. Структурная схема ЗСУПТ как САУ

- L_3 — устройства преобразования данных измерения;
- L_4 — устройства управления;
- L_5 — агрегата очистки совместно с исполнительным устройством, а также сигналы:
- x — возмущающее воздействие (компенсируемая составляющая топливных газов);
- y_1 — рассогласование;
- y_2 — измеряемая величина концентрации ЗВ;
- y_2^* — результат измерения параметров;
- y_{20}^* — допустимая величина концентрации ЗВ (y_2^{**});
- z — величина отклонения;
- u — управление;
- σ — компенсация возмущения;
- y_2^{**} — преобразованный сигнал.

При известном расстоянии от источника ЗВ до датчика (S на рис. 1) скорость переноса \tilde{V} является неизвестной функцией не только ветра (V), но и всех остальных метеорологических параметров.

Поскольку направление ветра определяется положением подвижного носителя датчиков измерения [3], то в дальнейшем рассматривается только составляющая скорости ветра по оси факела.

Методики расчетов концентраций ЗВ, усредненных за большие сроки на основе многолетних экспериментальных данных, хорошо известны и представлены в стандартных формах. Однако применение этих методик для управления очистными агрегатами в ЗСУПТ невозможно, поскольку в ЗСУПТ требуется непрерывное (или с приемлемой дискретностью) поступление управляющих сигналов на исполнительное устройство.

В структурной схеме ЗСУПТ регулятор представлен оператором L_4 . В результате синтеза закона регулирования получен [3] пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор, и оператор L_4 имеет вид

$$w_4(p) = K_{\text{п}} + K_{\text{д}}p + K_{\text{и}} \frac{1}{p}, \quad (1)$$

где $p = \frac{d}{dt}$.

Особенностью такой САУ является то, что объект управления представляет собой распределенную систему, математическая модель которой после приведения ее к форме «вход — выход» (оператор L_1 на рис. 2) имеет вид $w_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} e^{-p\tau}$, где τ — запаздывание при переносе ЗВ от источника до датчика измерительной системы ЗСУПТ [2]. При этом требуемые характеристики процессов регулирования достигаются при соотношении $K_{\text{и}}\tau = a \approx 0,8 \div 1,2$, где $K_{\text{и}}$ — коэффициент передачи интегрирующего звена в ПИД-регуляторе [3].

С другой стороны, величина τ определяется скоростью переноса ЗВ \tilde{V} и является функцией

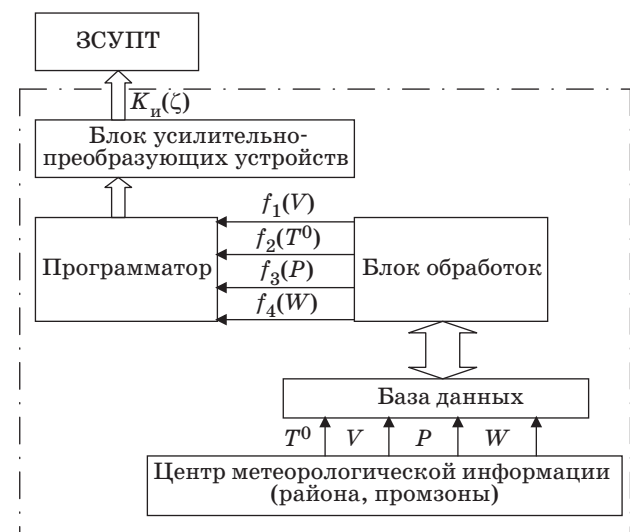
$$\tau = F(V, T^0, P, W, S), \quad (2)$$

где величина расстояния S считается заданной.

В этой связи требуются автоподстройка коэффициента $K_{\text{и}}$ в ПИД-регуляторе при непрерывном (или с допустимой дискретностью) поступлении метеорологических данных и определение алгоритма автоподстройки с дальнейшим построением соответствующей программы контроллера, реализующего зависимость

$$K_{\text{и}} = F^0(V, T^0, P, W, S) = K_{\text{и}}(\zeta). \quad (3)$$

Обработка и передача метеорологической информации в ЗСУПТ, в свою очередь, требуют разработки алгоритмов определения метеорологических характеристик: $f_1(V)$, $f_2(T^0)$, $f_3(P)$, $f_4(W)$ — и отношений между этими функциями (рис. 3). Переменные V, T^0, P, W в общем случае являются нестационарными случайными процессами (НСП). Функции f_1, f_2, f_3, f_4 рассматриваются в дальнейшем [см. (4)–(9)] как оценки НСП. На основе этих функций строятся массивы данных, поступа-



■ Рис. 3. Схема сбора, обработки и передачи метеорологической информации в ЗСУПТ

ющих в ЗСУПТ непрерывно или с допустимой дискретностью.

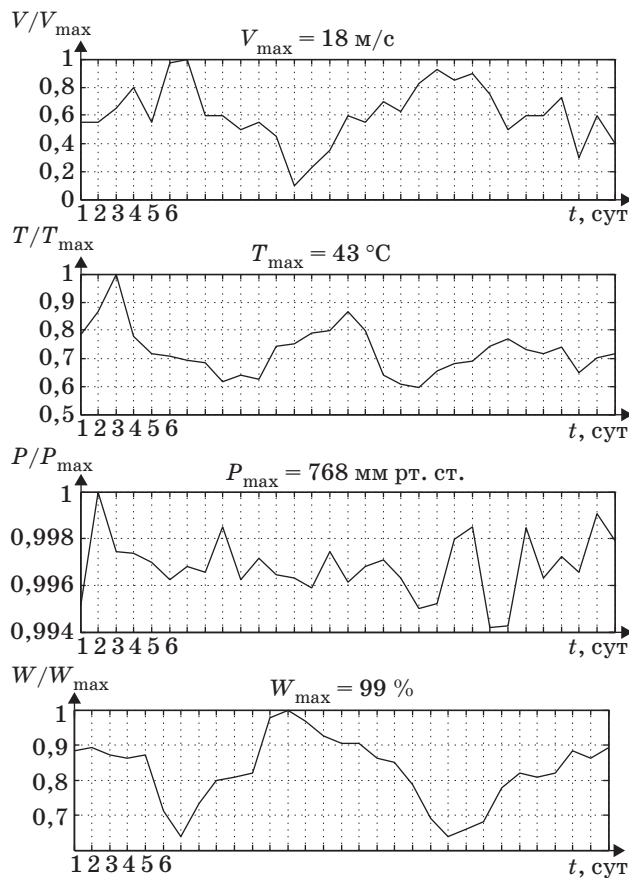
В соответствии с отмеченными обстоятельствами в статье рассматриваются:

1) алгоритмы обработки метеорологической информации V, T^0, P, W в виде математических ожиданий $M(V), M(T^0), M(P), M(W)$, автокорреляционных и взаимно корреляционных функций $R_{VV}, R_{TT}, R_{PP}, R_{WW}, R_{VT}, R_{VP}, R_{VW}$;

2) алгоритмизация управления автоподстройкой ПИД-регулятора.

Алгоритмы обработки метеорологических данных

В настоящей работе исходной является метеорологическая информация V, T^0, P, W , полученная из Центра метеорологической информации города Ханоя (Вьетнам) для микрорайона (промзоны) «Шок Шон» с долготой $106^{\circ}03'$ и широтой $20^{\circ}39'$ [4]. На рис. 4 представлены примеры реализаций, иллюстрирующие массив этой информации. Для обработки массива реализаций как НСП рассматриваются алгоритмы сглаживания [5]. Алгоритмы сглаживания использованы [6] для при-



■ Рис. 4. Примеры исходных реализаций метеорологической информации (январь 2011 г.)

ведения НСП к эквивалентным стационарным с соответствующими оценками точности такого приведения. Алгоритмы обработки на основе сглаживания приводятся далее в виде оценок НСП.

Математическое ожидание

$$M(x_i(t)) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} x_i(t) dt, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (4)$$

где T — интервал текущего сглаживания; $x_i(t)$ — исходные реализации, соответствующие V, T^0, P, W .

Автокорреляционная функция

$$R_{xx}^i(t, \lambda) = \frac{1}{T_1} \int_{t-\frac{T_1}{2}}^{t+\frac{T_1}{2}} x_i^0(t) x_i^0(t+\lambda) dt, \quad (5)$$

где $\lambda = \mu \Delta\lambda$ — время задержки, $\mu = 1, 2, 3, \dots, n$, $\Delta\lambda$ — шаг квантования по λ ; T_1 — интервал текущего сглаживания; $x_i^0(t) = x_i(t) - M(x_i(t))$.

Средняя автокорреляционная функция по одной реализации определяется по формуле

$$R_{xx_{cp}}^i(\lambda) = \frac{1}{T_2} \int_0^{T_2} R_{xx}^i(t, \lambda) dt, \quad (6)$$

где T_2 — время усреднения корреляционной функции $R_{xx}^i(t, \lambda)$ с численной оценкой близости обрабатываемого НСП к эквивалентному стационарному [6].

Средняя автокорреляционная функция по всем реализациям ансамбля будет

$$R_{xx_{cp}}^*(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{xx_{cp}}^i(\lambda), \quad (7)$$

где N — количество реализаций в ансамбле.

Взаимная корреляционная функция, связывающая значение процесса $x_i(t)$ в момент времени t и значение процесса $y_j(t)$ в момент $t + \lambda$, имеет вид

$$R_{xy}^{i,j}(t, \lambda) = \frac{1}{T_3} \int_{t-\frac{T_3}{2}}^{t+\frac{T_3}{2}} x_i^0(t) y_j^0(t+\lambda) dt, \quad (8)$$

где $y_j^0(t) = y_j(t) - M(y_j(t)), M(y_j(t)) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} y_j(t) dt$ —

математическое ожидание процесса $y_j(t)$, $y_j(t)$ — реализации исходных случайных процессов, $i \neq j$; T, T_3 — интервалы текущего сглаживания.

Средняя взаимная корреляционная функция

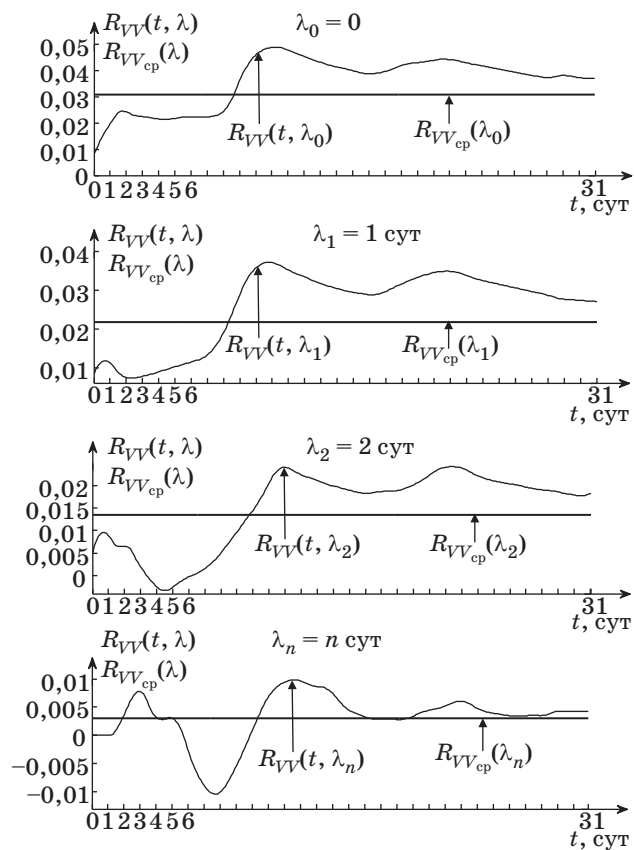
$$R_{xy_{cp}}^{i,j}(\lambda) = \frac{1}{T_2} \int_0^{T_2} R_{xy}^{i,j}(t+\lambda) dt, \quad (9)$$

где T_2 — время усреднения аналогично (6).

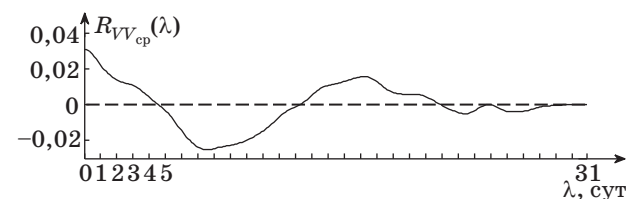
На рис. 5, 6 представлены примеры результатов обработки НСП по $V(t)$ на основе алгоритмов (4)–(7) и их дискретизации, приведенной в работе [6].

Обработка проводилась в среде MatLab при помощи приложения, аналогичного созданному в подсистеме САПР ЗСУПТ «Моделирование» [7].

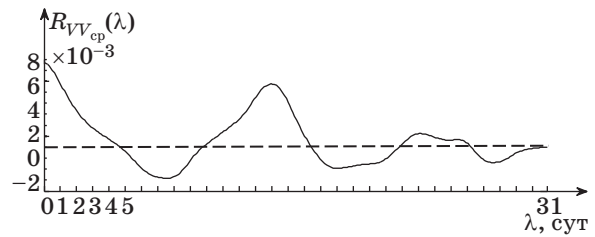
Составляющие $R_{TT}(\lambda_\mu)$, $R_{PP}(\lambda_\mu)$, $R_{WW}(\lambda_\mu)$ автокорреляционных функций температуры, давления, влажности и их средние значения $R_{TT_{cp}}(\lambda)$, $R_{PP_{cp}}(\lambda)$, $R_{WW_{cp}}(\lambda)$ вычисляются аналогично таким же характеристикам скорости ветра. На рис. 7 показан результат вычисления средней автокор-



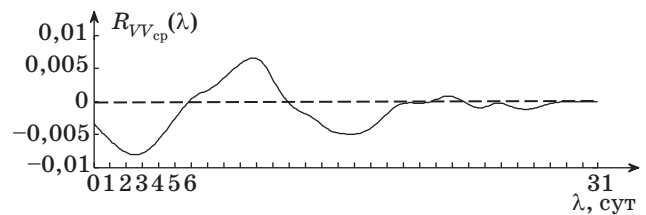
■ Рис. 5. Составляющие $R_{VV}^i(t, \lambda_\mu)$ автокорреляционной функции скорости ветра и их средние значения $R_{VV_{cp}}^i(\lambda_\mu)$



■ Рис. 6. Средняя автокорреляционная функция $R_{VV_{cp}}(\lambda)$ скорости ветра после приведения к эквивалентному стационарному процессу



■ Рис. 7. Средняя автокорреляционная функция $R_{TT_{cp}}(\lambda)$ температуры



■ Рис. 8. Средняя взаимная корреляционная функция $R_{VT_{cp}}(\lambda)$ между скоростью ветра и температурой

реляционной функции $R_{TT_{cp}}(\lambda)$ температуры на основе алгоритмов (4)–(7).

Результат вычисления средней взаимной корреляционной функции $R_{VT_{cp}}(\lambda)$ между скоростью ветра и температурой на основе алгоритмов (8), (9) представлен на рис. 8.

Алгоритмизация автоподстройки ПИД-регулятора

После расчета характеристик НСП по V , T^0 , P , W составим алгоритм, реализующий зависимость (3).

Поскольку функция $K_{\text{и}} = F^0(V, T^0, P, W, S)$ неизвестна, то приближение к ней можно построить, исходя из следующего соотношения:

$$\tau_{\text{потока}} = \frac{S}{M(\tilde{V}(t))} \cong \tau_{\text{ср}} + \Delta\tau, \quad (10)$$

где $M(\tilde{V}(t)) = M(V(t)) + M(\Delta\tilde{V}(t)/T^0, P, W)$, $M(V(t))$, $t_i < t < t_{i+1}$, $i = 1, \dots, 12$ (месяцы) — математическое ожидание усредненной скорости потока по основной составляющей — скорости ветра $V(t)$ — с учетом колебаний по месяцам, соответствующее $\tau_{\text{ср}}$; $M(\Delta\tilde{V}(t)/T^0, P, W)$ — условное математическое ожидание дополнения к усредненной скорости потока, соответствующее $\Delta\tau$ — дополнению к $\tau_{\text{ср}}$ от влияния остальных метеорологических составляющих T^0, P, W , при этом t меняется в диапазоне $t_i < t < t_{i+1}$ (сутки), в предельном случае $\{t = 0, 1\}$ (полдень — 0, полночь — 1).

Оценка $M(V(t))$ производится по результатам обработки реализаций $V(t)$, оценка величины $M(\Delta\tilde{V}(t)/T^0, P, W)$ — по уравнению регрессии:

$$M(\Delta\tilde{V}(t)/T^0, P, W) = b_0 + \sum_1^3 b_i \cdot M(X_i(t)), \quad (11)$$

$X_1 = T^0$, $X_2 = P$, $X_3 = W$; b_0 , b_i — коэффициенты регрессии.

Определение коэффициентов b_0 , b_i осуществляется по методу наименьших квадратов:

$$Q = \left[M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i) - \left\{ b_0 + \sum_1^3 b_i \cdot M(x_i) \right\} \right]^2 \rightarrow \min,$$

тогда $\frac{\partial Q}{\partial b_i} = 0$, $i = 0, 1, 2, 3$;

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial Q}{\partial b_0} = M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i) - \left\{ b_0 + \sum_1^3 b_i \cdot M(x_i) \right\} = 0;$$

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial Q}{\partial b_i} = \left\{ M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i) - \left(b_0 + \sum_1^3 b_i \cdot M(x_i) \right) \cdot M(x_m) \right\} = 0,$$

$i = 1, 2, 3$; $m = 1, 2, 3$. (12)

Из (12) получаем систему уравнений

$$M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i) - b_0 - b_1 M(x_1) - b_2 M(x_2) - b_3 M(x_3) = 0;$$

$$M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i) - b_0 M(x_1) - b_1 \{M(x_1)\}^2 - b_2 M(x_2) M(x_1) - b_3 M(x_3) M(x_1) = 0;$$

$$M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i) - b_0 M(x_2) - b_1 M(x_1) M(x_2) - b_2 \{M(x_2)\}^2 - b_3 M(x_3) M(x_2) = 0;$$

$$M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i) - b_0 M(x_3) - b_1 M(x_1) M(x_3) - b_2 M(x_2) M(x_3) - b_3 \{M(x_3)\}^2 = 0. \quad (13)$$

Представим (13) в матричной форме

$$AB = C, \quad (14)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 1 & M(x_1) & M(x_2) & M(x_3) \\ M(x_1) & \{M(x_1)\}^2 & M(x_2)M(x_1) & M(x_3)M(x_1) \\ M(x_2) & M(x_1)M(x_2) & \{M(x_2)\}^2 & M(x_3)M(x_2) \\ M(x_3) & M(x_1)M(x_3) & M(x_2)M(x_3) & \{M(x_3)\}^2 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i) \\ M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i)M(x_1) \\ M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i)M(x_2) \\ M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i)M(x_3) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Элементы вектора C принимаются в виде

$$M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i) \cong M(\bar{D}_{cp}(V(t)/x_1)), \quad i = 1, 2, 3,$$

где $M(\bar{D}_{cp}(V(t)/x_1))$ — условное математическое ожидание средней дисперсии ветра $V(t)$;

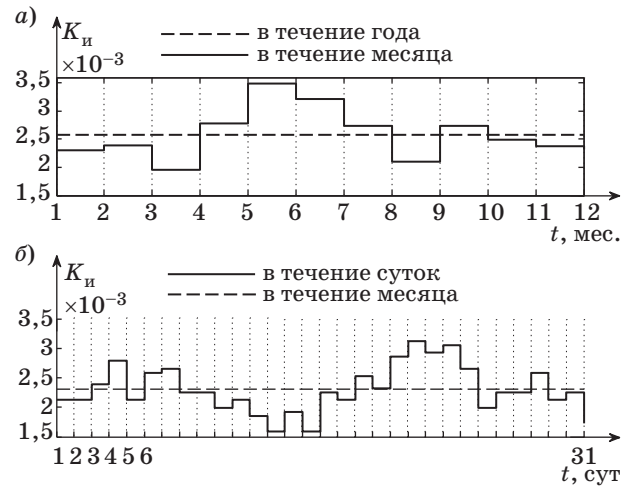


Рис. 9. Закон управления автоподстройкой ПИД-регулятора с усреднением по месяцам (а) и суткам (б)

$\bar{D}_{cp}(V(t)/x_1)$ определяется по взаимно корреляционным функциям (8), (9).

Проведем нормирование величин M , S в соотношении

$$K_{и} = \frac{a \left[M(V(t)) + M(\Delta\tilde{V}(t)/T^0, P, W) \right]}{S}$$

в виде

$$\bar{M}(V(t)) = \frac{M(V(t))}{\max\{MV(t)\}}; \quad \bar{S} = \frac{S}{S_{\max}};$$

$$\bar{M}(\Delta\tilde{V}(t)/x_i) = \frac{M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i)}{\max\{M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i)\}}. \quad (16)$$

После нормирования (16) получим алгоритм управления автоподстройкой коэффициента $K_{и}$ в ПИД-регуляторе с учетом ввода в ЗСУПТ метеорологических данных:

$$K_{и} = \frac{a \left[\bar{M}(V(t)) + \bar{M}(\Delta\tilde{V}(t)/T^0, P, W) \right]}{\bar{S}}. \quad (17)$$

Закон управления автоподстройкой во времени для конкретных численных значений представлен на графиках (рис. 9, а, б).

Расчеты проводились при значениях параметров в (17), $a = 1$, $S = 1500$ м, $M(\tilde{V}(t))$, $M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i)$ вычислялись по алгоритмам (8), (9) и решению уравнений (13).

Численные значения $M(\tilde{V}(t))$, $M(\Delta\tilde{V}(t)/x_i)$ вычислялись после приведения НСП V , T^0 , P , W к эквивалентным стационарным процессам в соответствии с алгоритмами (4)–(9).

Заключение

Таким образом, предложенные в статье алгоритмы, а также сформированные законы управ-

ления автоподстройкой ПИД-регулятора позволяют осуществлять коррекцию управления при проектировании и производстве ЗСУПТ по многим критериям [8].

Литература

1. **Сольников Р. И.** Построение замкнутой системы «Природа — Техногеника» // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе. IT + S&E'06: материалы XXXIII Междунар. конф., IV Междунар. конф. молодых ученых, Украина, Крым, Ялта-Гурзуф, 20–30 мая 2006 г. — Запорожье: Запорож. нац. ун-т, 2006. (Приложение к журналу «Открытое образование»). С. 404–408.
2. **Сольников Р. И.** Вопросы построения замкнутой системы управления «Природа-Техногеника» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 7. С. 23–32.
3. **Сольников Р. И., Коршунов Г. И.** Системы управления «Природа—Техногеника». — СПб.: Политехника, 2013. — 205 с.
4. **National Hydro-meteorological Service National Center for Hydro-meteorological Forecasting (NCHMF).** <http://www.thoietvietnam.gov.vn/web/en-US/62/19/58/map/Default.aspx> (дата обращения: 17.01.2013).
5. **Пугачев В. С.** Введение в теорию вероятностей. — Наука. Глав. ред. физико-математической литературы, 1968. — 368 с.
6. **Сольников Р. И.** Вычислительные машины в судовой гироскопии. — Л.: Судостроение, 1977. — 312 с.
7. **Сольников Р. И., Тревгода М. А.** Программное обеспечение подсистемы САПР замкнутой системы управления «Природа-техногеника» // Информационно-управляющие системы. 2010. № 4. С. 34–38.
8. **Коршунов Г. И., Тисенко В. Н.** Управление процессами и принятие решений: учеб.-метод. пособие. — СПб.: СПбГПУ, 2010. — 231 с.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Национальная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, в том числе добавлять публикации, которых нет в базе данных НЭБ, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.