

# КЕРУВАННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

---

---

УДК 621.365.036

В. В. Осадчий

## ОСОБЕННОСТИ АДАПТИВНОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

---

*В работе проводится теоретическое обоснование методологии построения взаимосвязанного дуального закона и моделей функционирования иерархических систем адаптивного управления производством огнеупорных материалов на основе закона параметрической и структурной адаптации.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Производство огнеупорных материалов для агрегатов металлургии является важнейшим системным обеспечением производства металла и нерудных изделий в сталеплавлении, ферросплавном производстве и других конструкционных материалов для металлургических печей и установок.

Автоматизированное управление технологическими процессами производства никельхромовых и железохромалюминиевых сплавов проводится в воздушной и углеродсодержащей атмосфере, из карбида кремния, молибдена, хромита лантана, диоксида циркония и других компонентов [1]. Технологические процессы производства огнеупорных материалов отличаются значительными системо- и схмотехническими факторами и конструктивным воплощением. В настоящее время созданы и разрабатываются АСУ ТП металлургического назначения: транспортных линий известково-обжигательного цеха, производства кирпича, флюсодоломитного комбината, технологических отделений цеха агломерации и другие [2].

Огнеупорные материалы для футеровок обеспечивают работу десятков и сотен термических установок технологических комплексов только на крупнейших предприятиях Запорожья (Запорожбразив, Мотор Сич, Запорожжкокс, Запорожсталь, Днепропетсталь, Запорожжуглерод, Запорожский алюминиевый комбинат, Запорожферросплав), что обуславливает существенный интерес к вопросам анализа системотехнического обеспечения производства огнеупорных изделий многокомпонентного состава с изменяемой рецептурой и на его основе синтеза схмотехнических решений АСУ ТП.

### **ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

В современных условиях важнейшими факторами при создании систем управления технологией являются факторы эффективного использования первичных и вторичных энергоресурсов, экономичного расходования энергетических материалов, высокого качества продукции, структурно-технологической перестройки энергоемких процессов и производств; организация постоянного контроля и разработка мер воздействия на подразделения предприятия; массовое оснащение всех потребителей средствами учета, контроля и регулирования расхода всех видов затрачиваемых энергоресурсов; повышения эффективности управления энергопотреблением и другие [3]. Главным критерием управления производственно-технологическими процессами является стабилизация ре-

жима работы технологической системы в соответствии с заданной программой. Система контролирует работу конвейеров, бункеров-накопителей, питателей, дозаторов и других механизмов, при этом рабочими параметрами являются точность дозирования, производительность агрегатов, разрешающая способность весо-измерительных систем. Операторская станция осуществляет взаимодействие оператора и системы управления в интерактивном режиме через клавиатуру и набор отображаемых на экране монитора унифицированных элементов, составляющих подсистему связи с оператором: мнемосхему, меню, окно ввода данных, информационное окно [4, 5].

Эксплуатация современных АСУ ТП позволит:

- обеспечить координацию управляющих воздействий по всему комплексу параметров процесса, исключить нарушения работы оборудования, предотвратить аварии и увеличить сроки эксплуатации оборудования, снизить расход энергоресурсов за счет оптимизации работы приводов оборудования технологической системы;

- повысить точность измерений, исключив погрешности планиметрической обработки диаграмм при исключении громоздких регистрирующих приборов [5, 6];

- повысить эффективность информационных каналов благодаря представлению и архивированию информации о протекании технологического процесса, ведению протокола технологического режима по сменам с последующим его анализом;

- обеспечить рост культуры производства, освобождение оперативного персонала от непроизводительных потерь рабочего времени за счет возможности анализа качества ведения технологического процесса, получения достоверной информации о состоянии и работе технологического оборудования и регулировать ход технологического процесса в пределах допустимых изменений параметров технологического процесса;

- выдавать сообщения о нарушениях в работе технологического оборудования и отклонениях параметров от заданных значений на рабочую станцию диспетчера-оператора, оперативно вести системный журнал, архивировать системные данные, вести визуальное наблюдение за процессами управления электроприводами и диагностику работы электрооборудования, протоколировать отказы в работе оборудования за требуемый интервал и другие процессы.

Реализация указанных факторов требует использования в АСУ ТП решения новых задач управления [7, 8] на основе перестройки методов планирования и управления. Однако преодоление дуальных трудностей решения многовариантных задач планирования и управления приводят к тому, что разработчики АСУ базируются на простых и примитивных методах планирования процессов управления и регулирования координат, направляя при этом основные усилия на решение задач прямого расчетного характера, используя при этом традиционные принципы планирования от достигнутого и регулирования по отклонению, как правило, связывая с регулированием обычную корректировку.

Экономико-математические методы управления [9] базируются на методах математического программирования

в силу их эффективности и общности моделей, допускающих широкий спектр интерпретаций. В то же время, структура производства вариативна, характеризуется ростом числа рецептов продукции, повышением факторов динамичности и неопределенности. Действие на производственную систему различных помех приводит к тому, что даже хорошо разработанный план на основе применения методов математического программирования может быть неустойчивым. Это вызывает дополнительный расход энергии и материалов, затрат, направленных на коррекцию производственного плана. Данная ситуация снижает доверие к методам математического программирования. Традиционно используемые математические модели [10] задач планирования и регулирования производства только приблизительно описывают реальные экономико-производственные системы с определенной и, как правило, с существенной погрешностью. И даже при этом условии качество принятого решения в большой степени зависит от того, насколько правильно выбран тип модели и достаточно ли информационное обеспечение этой модели. Формирование алгоритмов управления в этих условиях должно осуществляться с помощью решения комплекса экстраполяционных и оптимизационных задач. В связи с этим возникает необходимость как в разработке методов решения отдельных задач, так и в алгоритмическом обеспечении согласования этих решений. Однако, для того чтобы оптимизация стала рабочим инструментом при планировании и регулировании производства, необходимо решить ряд проблем по совершенствованию организации и механизма управления. В данном случае должна быть повышена гибкость структуры производства и алгоритмов управления, что достигается использованием современных подходов к практике организации производства и автоматизированных систем управления на основе ЭВМ.

Целью проводимых нами исследований является решение задачи построения гибкой системы управления, обладающей адаптивностью к изменяющимся условиям производства, на базе реализации возможностей математических методов и средств вычислительной математики. Успешное решение проблемы совершенствования управления производством связано с преодолением следующих трудностей: постановки задачи, адекватной реальному объекту и процессу; оценки и анализа полученных результатов решения задачи с точки зрения их реализации и связи с другими проблемами; внедрения требуемой схемы принятия решений. Для реализации указанных задач на современном этапе развития систем управления производством и технологическими процессами адаптивного характера выделяется параметрическая и структурная адаптация математического обеспечения АСУ ТП. Параметрическая адаптация широко распространена в практике создания библиотеки стандартных программ системы обработки данных [6, 11]. Структурная адаптация обеспечивается с помощью модулей (подпрограмм), обладающих свойствами параметрической адаптации. Количество и разнообразие модулей выбирается достаточным для реализации той или иной функции в пределах области существования системы. В обоих видах присут-

ствуют элементы пассивной и активной адаптации. Элементы, предназначенные для самонастройки математического обеспечения к изменениям параметров, обладают свойствами пассивной адаптации, а элементы, осуществляющие структурную адаптацию информационной базы и математического обеспечения, обладают свойствами активной адаптации. Эволюция и нестационарность производственного объекта приводит к необходимости широкого использования неформальных средств "дооптимизационного" и "послеоптимизационного" анализа, т. е. комплексные методы принятия решения должны включать как процедуры математического программирования, так и процедуры дооптимизационного и послеоптимизационного анализа, а последние должны включать средства имитации и прогнозирования.

Экономикоматематические модели планирования движений системы являются наиболее разработанными в исследованиях проблемы оптимального функционирования экономико-производственных систем, оптимизационные модели имеют не менее ограниченное применение. Это является следствием того, что модели математического моделирования, по которым разрабатывается план управления движением системы, не отражают возможностей и условий его реализации. Реально процедура планирования движения системы должна учитывать возможности реализации плана в процессе его разработки, учитывать прогнозируемые потери, обусловленные необходимостью локализации помех и компенсации отклонений при реализации плана, т. е. удельный вес методов математического программирования в реальной процедуре планирования может не превышать удельный вес формальных и неинформационных средств анализа, а иногда может быть гораздо меньше его. В этом случае применение точных методов решения задач математического программирования, используемых при планировании движений системы, может терять смысл, так как нестационарность среды производства требует применения итерационных методов, обогащенных возможностями учета эволюции данных об объекте, изменения моделей планирования, оценки потерь и анализа реализации плана движений на основе имитационных и прогнозных моделей влияния дестабилизирующих воздействий помех и возмущений. В данном случае требуется адаптация не только методов математического программирования к анализу сложных технологических процессов и производства, но и самого плана движений или управляющего решения к условиям его реализации [10, 11]. К принципиальным особенностям адаптивного планирования управления движением относятся следующие особенности:

– лица, принимающие решения (ЛПР) в области экономико-производственных систем, непосредственно привлекаются к процессу формирования планов и управлению. В данном случае оказывается возможным адаптивный процесс прогнозирования тех или иных решений. Адаптивное планирование предполагает наличие процесса обучения ЛПР. Тем самым обеспечивается сближение процедур планирования и управления с процедурами научного исследования. В современных условиях возникает необходимость предпосылки реализации плана ими-

тационного эксперимента с целью проверки функциональных возможностей системы, который основан на диалоге ЭВМ и человека;

– при адаптивном планировании должны быть разработаны методы эффективного контроля и управления деятельностью системы по реализации плана движений и учета знаний о характеристиках в определенные временные отрезки будущего. Знание может быть определенным, "размытым" и полностью отсутствующим. В первом случае распознавание сравнительно определенных аспектов будущего может оказаться трудной задачей. Их раскрытие требует большого объема исследований. Очевидными они часто становятся только ретроспективно. Во втором случае, если известны статистические характеристики, для оптимизации плановых решений используются различные варианты стохастического программирования. Если же неопределенность не является стохастической, возможно использование элементов теории нечетких множеств и алгоритмов. При сравнительно высокой степени неопределенности и возможности вариантного представления будущего, планирование движений следует осуществлять по вариантам, т. е. для каждого возможного состояния среды в будущем формировать свой план. Используя также игровой подход, гарантированный результат может быть получен на основе экспертных оценок. В случае полного отсутствия знаний или информации о будущем состоянии системы, адаптация системы осуществляется косвенно путем планирования движений по реагированию. Такое планирование движений направлено на создание системы, которая бы могла различать отклонения от ожидаемого и эффективно реагировать на них. В этом случае может быть максимизирована скорость адаптации.

### **ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

На основании вышеизложенного можно принять за основной постулат положение, что адаптивная система управления технологическими процессами или производством состоит из двух взаимосвязанных систем: адаптивной системы планирования движений и адаптивной системы регулирования. Основываясь на основных положениях концепции адаптации, следует отметить, что выделенные системы практически идентичны по своей структуре. Функциональная структура каждой из них состоит из следующих взаимосвязанных частей: модели планирования (соответственно регулирования) движений производства; имитационной модели функционирования производственной системы; внутреннего (имитационного) адаптора; внешнего (объектного) адаптора.

Неформальное описание работы адаптивной системы управления будет включать в себя следующие основные элементы. Внешний адаптор на основе анализа характеристик объекта и внешней среды выбирает модель задачи планирования, а также имитационную модель, осуществляя тем самым структурную адаптацию системы управления. Затем по результатам выполнения планов прошлых периодов и прошлых возмущающих воздействий

он подстраивает параметры в модели планирования (регулирующего) и в имитационной модели, включающей модели объекта, среды и системы регулирования. В адаптивной системе планирования, основываясь на полученных параметрах, по модели планирования определяют план управления движением системы и потенциальный эффект. План рассматривается как траектория задания последовательностей плановых состояний, распределенных во времени. По имитационной модели осуществляется имитация реализации плана и оцениваются потери, не позволившие достичь потенциального эффекта. Имитация реализации плана выполняется несколько раз для получения статистически значимых оценок показателей плановых движений. По результатам расчета плана и имитации его выполнения проводятся оценка и анализ приемлемости алгоритмов реализации плана. Если план с учетом его возможной реализации приемлем, то он принимается к реализации. В противном случае внутренний адаптор, основываясь на результатах имитации, подстраивает параметры модели планирования и модели регулирования и работа схемы повторяется, начиная с пересчета плана при новых параметрах. Работа внутреннего адаптора базируется на одном из методов оптимизации в условиях помех.

Фактор "приемлемости" при неформальном описании адаптивной системы управления производством является сложным. Для технических адаптивных систем управления по Д. Дональдсу и Л.А. Задэ система считается приемлемой, если для заданного класса входных воздействий значение ее критерия качества или нескольких критериев попадает в заданную область [12]. Критерий приемлемости в адаптивной системе управления можно представить в виде двух показателей: потенциальный эффект  $Q$ , полученный в результате расчета планирования движений и потери  $\Pi$ , образуемые на этапе формирования и обусловленные влиянием помех и необходимостью выбора регулирующих воздействий, направленных на устранение влияния этих помех. Применительно к условиям производства огнеупорных изделий в качестве показателя, который может служить в качестве критерия приемлемости в адаптивной системе планирования производства, является показатель ритмичности работы технологической системы  $R$ , определяемый в виде соотношения [10, 11]  $R = 1 - \frac{x_{\Pi} - x_{\Phi}^*}{x_{\Pi}}$ ,  $x_{\Pi}$ ,  $x_{\Phi}^*$  – плановые и фактические значения показателей движения элементов производства соответственно. Фактическое состояние  $x_{\Phi}^*$  на этапе планирования определяется в результате функционирования произвольной системы, а плановое  $x_{\Pi}$  – в результате решения задачи планирования.

В общем виде за критерий приемлемости может быть принято выражение вида [12]  $\Phi = Q - \Pi$ , которое подчеркивает отрицательное воздействие потерь. Таким соотношением удобно пользоваться при описании механизма адаптации. Если между показателями, входящими в  $Q$  и  $\Pi$ , нет однозначного соответствия, а также не удается привести их к одному показателю, то критерий

приемлемости будет рассматриваться в виде векторного критерия  $\vec{\Phi} = \{f_s, s = \overline{1, S}\}$ , где  $f_s$  – частный критерий оптимальности,  $S$  – количество частных критериев. Данным представлением  $\vec{\Phi}$  можно пользоваться при описании конкретных алгоритмов. Показатели, определяемые по результатам функционирования системы, имеют вероятностную природу [9], поэтому в качестве управления может выступать либо математическое ожидание [9]  $M(\vec{\Phi}) \rightarrow \max$ , либо вероятность  $P(\Phi \geq \alpha) \rightarrow \max$ , ( $\alpha - \text{const}$ ), либо  $\alpha \rightarrow \max$ ,  $P(\Phi \geq \alpha) = 1$ . Предполагая, что цель движения системы задана как  $P(\Phi \geq \alpha) \rightarrow \max$ , для дальнейшего анализа вводятся необходимые основные определения. Время принимается дискретным  $t = t_0, t_1, t_2, \dots$ . Каждый из интервалов времени  $[t_k, t_{k+1}]$ , в свою очередь, разбивается на  $N$  подинтервалов  $[\tau_v, \tau_{v+1}]$ ,  $v = \overline{0, N-1}$ ,  $\tau_0 = t_k$ ;  $\tau_v$  – моменты времени, принадлежащие интервалам  $[t_k, t_{k+1}]$ . Величины, связанные с моментом времени  $t_k$ , снабжаются индексом  $k$ . Величины, связанные с моментом времени  $\tau_v$ , принадлежащим интервалу  $[t_k, t_{k+1}]$ , снабжаются индексами  $k_v$  (индекс  $k$  может быть опущен). Пусть  $x_k$  – состояние системы в момент времени  $t_k$ . Через  $x_k$  обозначается плановая траектория, заданная как  $[T+1]$  точками на интервале  $[t_k, t_{k+1}]$ ;  $x_k = \{x_v, v = \overline{0, N}\}$ . На систему в ходе выполнения траектории  $x_k$  действуют помехи: измеряемая  $r_k$  и неизмеряемые (не учтенные в моделях)  $\varphi_k$ ;  $r_k = \{r_v, v = \overline{0, N}\}$ . Несмотря на то, что в каждой конкретной модели смысл  $\varphi_k$  будет различным, используется одинаковый символ  $\varphi_k$ .

Регулирующие воздействия, выдаваемые системой регулирования на интервале  $[t_k, t_{k+1}]$  с целью компенсации возмущений, действующих на систему, обозначается как  $U_k$ ;  $U_k = \{U_v, v = \overline{0, N}\}$ . Через  $w_k$  обозначаются параметры моделей, входящих в систему планирования и регулирования,  $w_k = \{w_v, v = \overline{1, N}\}$ . Параметры  $w_k$  состоят из двух наборов параметров: параметров, подстраиваемых внутренним адаптором  $W_k^1$ , и параметров, подстраиваемых внешним адаптором  $W_k^2$ , которые, в свою очередь, делятся по принадлежности к различным моделям. В набор параметров  $W_k^1$  входят параметры модели планирования  $W_k^{1\Pi}$  и модели регулирования  $W_k^{1P}$ , в набор параметров  $W_k^2$  входят параметры модели планирования  $W_k^{2\Pi}$ , параметры имитационной модели внешней среды  $W_k^{2B}$ , имитационной модели производства (объекта регулирования)  $W_k^{2O}$  и параметры модели регулирования  $W_k^{2P}$  (имитационная модель объекта и модель регулирования входят в качестве составных частей в модель имитации реализации плановых движений системы). Кроме того, если  $Z_0, Z_1, \dots, Z_t$  – последовательность элементов множества  $\{Z\}$ , то упорядоченные наборы (конечные и бесконечные) соответствующих элементов будут обозначаться как  $z_s^t = [z_s, \dots, z_t]$ ,  $z_s^\infty = [z_s, z_{s+1}, \dots]$ ,  $0 \leq s \leq t$ . Элемент  $z_s^t$  при  $s > t$  обозначает пустое множество, поэтому  $Z_0 = Z_0^0$ .

С учетом вышеизложенного вначале рассматривается работа адаптивной системы планирования движений на основе алгоритмов параметрической адаптации. Динамика системы адаптивного планирования определяется контуром внутренней адаптации. Первым по времени работает внешний адаптор и параметры, подстроенные внешним адаптором, используются во всех операторах внутреннего контура адаптации. Системотехническая эволюция объекта описывается уравнением вида  $x_{v+1} = X(x_S^V, U_S^V, r_S^V, \varphi_S^V, \xi)$ ;  $X(\cdot)$  – некоторый оператор. Состояние объекта в момент времени  $\tau_{v+1}$  зависит от предыдущих состояний объекта  $x_S^V$ , регулирующих  $U_S^V$  и возмущающих воздействий  $r_S^V$ ,  $\varphi_S^V$ , а также набора параметров объекта  $\xi$ . Под параметрами объекта подразумеваются параметры: внешней среды, продукции и производства, включая параметры системы регулирования координат технологии производства. В общем случае оператор  $X(\cdot)$  может задаваться алгоритмом различного вида, в том числе стохастическим.

Работа системы планирования движений технологической системы базируется на эволюционном уравнении объекта управления  $x_{v+1}$ . Система планирования движений рассчитывает плановую траекторию в дискретные моменты времени  $t_k$  на период  $[t_k, t_{k+1}]$ . Система регулирования осуществляет контроль выполнения объектом плановых заданий и вмешательство в процесс производства с целью стабилизации выходных показателей объекта в дискретные моменты времени  $\tau_v$ . Расчет плановых траекторий осуществляется по уравнению  $x_k = P(Y_k^{\Pi}, Q, W_k^{\Pi})$ , где  $P(\cdot)$  – оператор (модель) расчета плановой траектории;  $Y_k^{\Pi}$  – учетные данные, полученные подсистемой учета;  $Q$  – производительность или набор показателей (потенциальный эффект), характеризующий план  $\chi_k$ ;  $W_k^{\Pi}$  – модель планирования. С помощью параметров  $w_k^{\Pi} = (W_k^{1\Pi}, W_k^{2\Pi})$  учитываются особенности объекта, который характеризуется своим набором параметров  $\xi$ .

Для этапа планирования процесс сбора и преобразования информации, осуществляемой подсистемой учета, можно описать сенсорным уравнением [10, 13]:  $Y_k^{\Pi} = Y^{\Pi}(x_S^k, \chi_S^{k-1}, U_S^{k-1}, r_S^{k-1}, \varphi_k)$ ;  $S < k$ ;  $Y(\cdot)$  – оператор, отражающий работу задач учета и нормирования, в частности, этим оператором учитываются и потери  $\Pi$ , связанные с неопределенным или неоптимальным функционированием из-за дестабилизирующего воздействия помех  $r_S^{k-1}$ ,  $\varphi_k$ ,  $U_S^{k-1}$  – регулирующие воздействия, применяемые системой регулирования для уменьшения влияния помех  $r_S^{k-1}$  на плановые траектории;  $r_S^{k-1}$  – контролируемые (учитываемые) помехи, действующие в периоды  $[t_S, t_{S+1}]$ , ...,  $[t_{k-1}, t_k]$ . Учетные данные  $y_k^0$  задаются в виде функций от времени. Плановая траектория  $\chi_k$ , полученная по соответствующему выражению для  $\chi_k$ , поступает в блок, в котором имитируется реализация плана. В результате имитации реализации плана формируются данные, совпадающие по содержанию с  $y_k^{\Pi}$ . Некоторый  $l$ -й вариант реализации плановой траектории ге-

нерируется имитационной моделью, работа которой описывается уравнением  $\tilde{y}_{k+1}^{le} = U(y_k^{\Pi}, \chi_k, W_k^u, \xi)$ ; (индекс "u" – имитационный);  $U(\cdot)$  – оператор;  $w_k = (w_k^{2O}, w_k^{2P}, w_k^{2B})$  – параметры имитационной модели (подстраиваются внешним адаптором);  $\xi$  – равномерно распределенная на интервале  $[0, 1]$  некоррелированная случайная величина. Параметр  $\tilde{y}_{k+1}^{\Pi(l)}$  является многомерным случайным процессом, причем любой наперед заданный тест должен подтверждать гипотезу об эквивалентности выборок  $\tilde{y}_{k+1}^{\Pi(l)}$  и  $Y_{k+1}^{\Pi}$ , т. е., имея информацию  $\tilde{y}_{k+1}^{\Pi(l)}$ , можно подстраивать параметры в операторе планирования  $P(\cdot)$ . В этом случае подстройка параметров будет осуществляться по соотношению  $w_k^{1\Pi(l)} = W1(\tilde{Y}_{k+1}^{\Pi(l)}, w_k^{1\Pi(l-1)})$ ,  $l = 1, 2, \dots$ ;  $W_k^{1\Pi(0)} = w_{k-1}^{1\Pi}$ ;  $W1(\cdot)$  – оператор, описывающий работу внутреннего адаптора;  $w_k^{1\Pi(l-1)}$  – параметры, полученные внутренним адаптором при формировании плана движения системы в прошлом периоде.

Параметры  $w_k^{1\Pi(l)}$  используются в уравнении для  $\chi_k$ , т. е. параметры  $w_k^{\Pi}$  заменяются на параметры  $w_k^{\Pi(l)} = (w_k^{2\Pi}, w_k^{1\Pi(l)})$  и по новому значению проводится имитационное моделирование. Практически вместо оператора  $\chi_k$  работает оператор  $\chi_k^{(l)} = P(y_k^{\Pi}, Q, w_k^{\Pi(l)})$ . Данный оператор при  $l=0$  совпадает с  $\chi_k$ . При выборе параметров внутреннего адаптора  $W1$  стремится увеличить средний эффект  $\Phi^u$ , получаемый при имитации функционирования системы:  $M(\Phi^u) = M(Q - \Pi^u)$ ;  $\Pi^u$  – потери, возникающие при функционировании и полученные по имитационной модели  $\tilde{y}_{k+1}^{\Pi(l)}$ . Значения параметров  $w_k^{1\Pi(l)}$ , обеспечивающих оптимум функционалу, наиболее полно приспособливают модель планирования к объекту управления, который характеризуется параметрами  $w^u$ . Так как все методы оценки параметров являются приближенными, то и план  $\chi_k$  будет настроен не на реальный объект  $\xi$ , а на объект  $\xi^1$ , близкий к  $\xi$ . Чтобы подстроить план к объекту  $\xi$ , внешний адаптор подстраивает помимо параметров  $w^u$  также параметры  $w_k^{2\Pi}$ . Подстройка этих параметров осуществляется по соотношению  $w_{k+1}^2 = W2(y_{k+1}^{\Pi}, w_k^2)$ .  $W2(\cdot)$  – оператор, описывающий работу внешнего адаптора. При выборе параметров внешний адаптор стремится оптимизировать выражение  $M(\Phi) = M(Q - \Pi)$ .

Наличие трех групп настраиваемых параметров  $(w^1, w^{2\Pi}, w^{2U})$  приводит к необходимости решения в адаптивных системах планирования трех типов задач поиска значений приведенных параметров. Для решения первой задачи вводится некоторая мера  $\mu(\{\tilde{y}_k\}, \{y_k\})$  оценки близости законов распределения выборок  $\{\tilde{y}_k\}$  и  $\{y_k\}$ , тогда эта задача, решаемая внешним адаптором, может быть представлена следующим образом: найти параметры настройки  $w^{2u}$ , решая задачу вида  $w^{2u} = \arg \min \mu(\{\tilde{y}_k\}, \{y_k\})$ ;  $w^{2u} \in W^{2u}$ . Вторая задача, решаемая

внешним контуром адаптаций, связана с выбором группы параметров  $w^{2\Pi}$  и формализуется следующим образом:  $w^{2\Pi} = \arg \max M(Q(\chi(w^{2\Pi})), \Pi)$ ;  $w^{2\Pi} \in W^{2\Pi}$ ;  $M(\cdot)$  – математическое ожидание. Третья задача настройки параметров решается внутренним адаптором. Настраиваются параметры  $w^1$  исходя из решения задачи вида:  $w^1 = \arg \max M(\Phi(\chi(w^1, w^{2\Pi}), w^{2\Pi}))$ ;  $w^1 \in W$ ;  $M(\cdot)$  – математическое ожидание величины  $\Phi$ , полученной по имитационной модели (имитационным реализациям плана).

В целом задачей адаптивной системы планирования движений является получение наиболее приемлемого плана работы системы.

Система приведенных соотношений является адаптивной системой планирования в классе  $\theta$  по отношению к целевому условию  $M(\Phi) = M(Q - \Pi)$ , если для любого  $\xi \in \theta$  и любого набора начальных значений настраиваемых параметров  $w_0^\Pi \in w^\Pi$  существуют такие  $t^*$  и  $l^*$ , при которых для любых  $t \geq t^*$  и  $l \geq l^*$  выполняется цель планирования [8].

Формальные соотношения, описывающие работу адаптивной системы регулирования представляются в виде сенсорного уравнения

$$\tilde{y}_v = \tilde{Y}(\tilde{\chi}_s^v, \tilde{u}_s^{v-1}, \chi_k, r_k^v, \varphi_v), \quad s \leq v \leq N; \quad (1)$$

$\tilde{Y}(\cdot)$  – оператор, отражающий работу подсистемы учета на этапе регулирования. Регулирующие воздействия, принимаемые в качестве задающих воздействий на интервале  $[\tau_v, \tau_m]$ ,  $\tau_m > \tau_{v+1}$ , определяются из следующего соотношения, взаимосвязанного с описываемыми далее процессами имитации и изменения параметров:  $\tilde{u}_v^{(n(l+1))} = U(\tilde{y}_v, w^{p(l)})$ , где  $U(\cdot)$  – оператор, используемый в соотношении  $u_v^n = \tilde{U}(\tilde{y}_v, w_v^p, \tilde{Q}_p)$ ;  $\tilde{Q}_p$  – потенциалных эффект, определяемый на этапе регулирования.

Изменяемые параметры  $w_v^p$  имеют четыре составляющие. Составляющие  $w_v^{1p}, w_v^{2p}$  на этапе регулирования остаются неизменными и численно равны тем значениям, которые были получены на этапе планирования. Параметры, входящие в  $\tilde{w}_v^{2p}$ , подстраиваются внешним адаптором (контуром адаптора) этапа регулирования, а  $\tilde{w}_v^{1p}$  – внутренним. Алгоритм работы внешнего адаптора этапа регулирования записывается как  $\tilde{w}_m^2 = w2(\tilde{y}_v, \tilde{w}_v^2)$ , где  $\tilde{w}2(\cdot)$  – оператор оценки настраиваемых параметров;  $\tilde{w}_m^2 = \{\tilde{w}_{v+1}^2, \dots, \tilde{w}_{v+m}^2\}$ ;  $\tilde{w}_v^2$  – параметры, изменяемые внешним адаптором этапа регулирования, которые делятся на параметры модели регулирования  $\tilde{w}_v^{2p}$  и параметры имитационной модели объекта регулирования  $w_v^{2u}$ . Алгоритм работы внутреннего адаптора этапа регулирования записывается в виде рекуррентного уравнения, взаимодействующего с параметром  $\tilde{U}_v^{(m(l+1))}$  и имитационными соотношениями:

$$\tilde{w}_{v+m}^{1p(l+1)} = \tilde{w}1(\tilde{y}_v, \tilde{y}_v^{\Pi(l)}, \chi^m, \tilde{w}_{v+m}^{1p(l)}); \quad \tilde{w}_{v+m}^{1p(0)} = \tilde{w}_v^{1p}. \quad (2)$$

Ниже рассматривается алгоритм динамического функционирования внутреннего адаптора системы регулирования параметров производства динасовых, карборундовых и форстеритовых огнеупоров [1], где сенсорное уравнение вида (1) и уравнение внутреннего адаптора (2) представлены нижеследующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -ax_1 + x_1^2 + x_1x_2; & x_1(0) &= d; \\ \frac{dx_2}{dt} &= -bx_2 + cx_1^2 + x_2^2; & x_2(0) &= g. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Исследование динамики регулирования параметров системы (3) проводится применительно к условиям линии приготовления массы (дозирование, перемешивание, подача массы в бункер прессы НРФ-2500) на основе виброприводов серии JVM. Для указанных механизмов линии коэффициенты системы уравнений (3) равны:  $a = -8$ ;  $b = -10$ ;  $c = 0.5$ ;  $d = 0.5$ ;  $g = 0.2$ .

Матричное уравнение для системы (3), как результирующее уравнение функций прогноза и коррекции для системы (2) представляется в виде

$$\frac{d[\bar{x}]}{dt} = [A]\bar{x} + [F]\bar{x} = \begin{bmatrix} -8 & 0 \\ 0 & -10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1^2 + x_1x_2 \\ 0.5x_1^2 + x_2^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где параметры  $x_1 = \omega_1^p$ ;  $x_2 = \omega_2^p$ ;  $x_1(0) = \omega_2^p$ ;  $x_2 = \omega_2^p$ .

Алгоритм построения регулирующего сигнала в соответствии с [6, 7] будет иметь вид

$$\bar{x}_{k+1} = [D] \left[ \bar{x}_k + \left( [E] - \frac{[A]h}{2!} \right) h [\bar{F}](\bar{x}_k, kh) \right], \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (5)$$

где [E] – единичная матрица; [A] – матрица спектра вариативности  $x_i$ .

Матрица управляющего параметра  $[Q(\vec{A}(h))]$  и вектор  $\vec{F}(x_0)$  равны

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.8 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.32 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.52 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix};$$

$$[F(x_0)] = \begin{bmatrix} 0.5^2 + 0.5 * 0.2 \\ 0.5 * 0.5^2 + 0.2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.350 \\ 0.165 \end{bmatrix};$$

$$Q(A(h)) = \left( [E] - \frac{[A(h)]}{2!} \right) h = \begin{bmatrix} 0.14 & 0 \\ 0 & 0.15 \end{bmatrix},$$

откуда искомым вектор уравнения динамики определится следующим образом

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= [D] \left[ \bar{x}_0 + \left( [E] + \frac{[A][h]}{2} \right) h [F(x_0)] \right] = \\ &= \begin{bmatrix} 0.52 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.14 & 0 \\ 0 & 0.15 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.350 \\ 0.165 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} 0.286 \\ 0.112 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для каждого шага вектор  $\bar{x}_2$  вычисляется по выражению

$$\bar{x}_2 = [D] \left[ \bar{x}_1 + \left( [E] + \frac{[A][h]}{2} \right) h [F(\bar{x}_1, kh)] \right] =$$

$$= \begin{bmatrix} 0.52 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} 0.286 \\ 0.112 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.14 & 0 \\ 0 & 0.15 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.113 \\ 0.005 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} 0.157 \\ 0.061 \end{bmatrix}$$

и далее управляющие сигналы равны

$$\bar{x}_3 = \begin{bmatrix} 0.084 \\ 0.0321 \end{bmatrix}; \quad \bar{x}_4 = \begin{bmatrix} 0.044 \\ 0.016 \end{bmatrix}; \quad \bar{x}_5 = \begin{bmatrix} 0.023 \\ 0.008 \end{bmatrix}; \quad \bar{x}_6 = \begin{bmatrix} 0.0004 \\ 0.0001 \end{bmatrix} \dots$$

По полученным значениям  $x_i$  строится переходная характеристика, представленная на рис. 1.

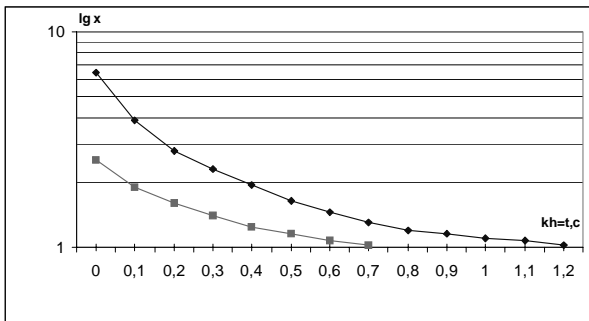


Рисунок 1

После принятия регулирующего воздействия (т. е. процесс адаптации по внутреннему контуру окончен) индекс  $l$  опускается. Поскольку на этапе регулирования возможны изменения плановой траектории на интервале  $[\tau_v, \tau_m]$ , то по аналогии с этапом планирования цель управления представляется в виде потенциального эффекта, получаемого на этапе регулирования  $\tilde{Q}$ , и потерь  $\tilde{\Pi}$ , обусловленных последующей на интервале  $[\tau_v, \tau_m]$  работой системы. Потенциальный эффект  $\tilde{Q}$  определяется на интервале  $[\tau_v, \tau_m]$  относительно траектории, полученной в результате расчета регулирующего воздействия  $\tilde{Q} \leq Q$ , т. е. целевое условие на этапе регулирования  $M(\tilde{\Phi}) = M(\tilde{Q} - \tilde{\Pi}) \rightarrow \max$  может приниматься в качестве цели адаптации во внешнем контуре на этапе регулирования. Аналогично этапу планирования при регулировании также осуществляется имитация реализации регулирующего воздействия, поэтому целью работы внутреннего адаптора этапа регулирования может быть использовано соотношение  $M(\tilde{\Phi}^u) = M(\tilde{Q} - \tilde{\Pi}^u) \rightarrow \max$ .

Формальные соотношения, обеспечивающие достижения цели  $M(\tilde{\Phi}^u)$  и модели системы регулирования, которые используются на этапе регулирования при имитации реализации регулирующих заданий на интервале  $[\tau_v, \tau_m]$ , аналогичны соотношениям для интервала  $[t_k, t_{k+1}]$ . Они имеют вид сенсорного уравнения  $\bar{y}_\lambda =$

$= \bar{Y}(x_s^\lambda, u_s^{\lambda-1}, \bar{X}_k, \bar{r}_{s,k}^\lambda, \varphi_\lambda)$ ;  $s \leq \tau$ ;  $k\lambda \leq m$ . Регулирующие воздействия определяются по соотношению  $u_\lambda = U(\tilde{y}_\lambda, w_\lambda^\lambda)$ ;  $\lambda \leq n \leq m$ . Работа имитационной модели объекта управления описывается уравнением  $\tilde{y}_{\lambda+1} = u(\tilde{y}_\lambda, u_{\lambda-1}, w_\lambda^\lambda)$ ;  $\tilde{y}_\lambda = \bar{y}_\lambda$ .

На основании вышеприведенных соотношений и общего алгоритма регулирования формальное определение адаптивных параметров системы регулирования координат сводится к следующему. Система уравнений для  $\tilde{y}_v - \bar{y}_{\lambda+1}$  будет адаптивной в классе  $\theta$  по отношению к целевому условию  $M(\tilde{\Phi})$  если для любого  $\xi \in \theta$  и любого  $w_0^p \in W^p$  существуют такие  $t^*$  и  $l^*$ , при которых для всех  $t \geq t^*$ ,  $l \geq l^*$  выполняются условия цели регулирования. Структурная адаптация выполняется при невозможности учета происходящих изменений средствами параметрической адаптации и заключается в изменении структуры системы управления относительно изменяющихся условий функционирования и классов моделируемых объектов управления. В данном случае могут быть выражены два подхода к решению проблемы структурной адаптации. Первый – выбор модели из фиксированного множества моделей, наиболее адекватно описывающей объект управления, второй – конструирование моделей с требуемыми свойствами, на основании некоторых элементарных составляющих модели. По сравнению с первым подходом второй обеспечивает более гибкую и точную настройку структуры системы управления к изменениям в объекте управления при минимальном участии специалистов в области проектирования систем управления. Количество объектов, к которым может адаптироваться система во втором случае значительно больше, чем в первом.

Структура системы управления будет являться двухконтурной. В первом контуре реализуются функции управления объектом, во втором осуществляется настройка структуры системы управления. Управляющее устройство первого контура включает системы планирования и регулирования, которые будут обладать свойствами параметрической адаптации.

Из вышеизложенного следует, что работа структурного адаптора идентична работе параметрического адаптора и она представима в виде обобщенного соотношения  $\text{PR}_{k+1} = WC(\psi_k, y_k, M, M^\Pi, I, \Sigma, D)$ , где  $WC(\cdot)$  – оператор структурного адаптора системы управления. Математическое обеспечение базируется на основе составляющих  $\text{PR}_{k+1}$ :  $\psi$  – набор признаков;  $M$  – модель системы;  $M^\Pi$  – база программных модулей;  $I$  – база информационных структур;  $\Sigma$  – граф межмодульных связей;  $D$  – база документации. Указанное обеспечение проверяется на адекватность  $\mu(\{\tilde{y}_k\}, \{y\}) \leq \bar{\mu}$ . В данном случае, если методами структурной адаптации не удастся достичь заданного уровня адекватности, то необходима доработка элементов исходных множеств  $\psi, M, M^\Pi, I, \Sigma, D$  неформальными методами.

Сложность процессов производства огнеупорных материалов преодолевается иерархическими подходами к построению энергоэкономической системы управления

технологическими процессами. Одним из таких подходов является реализация высокоэффективной адаптивной системы управления взаимодействующими производственными процессами, основными положениями которой являются следующие.

1. Взаимодействие подсистем в иерархической системе управления базируется на общесистемных принципах управления сложными системами. Сложность объекта приводит к необходимости организации иерархической структуры управления.

2. Временные соотношения в иерархической системе управления производством упорядочены снизу вверх, т. е. управленческие решения вышестоящей подсистемы не могут следовать чаще воздействий подчиненных подсистем.

3. В иерархической системе каждая подсистема наделена функциями стабилизации и координации.

4. Каждая подсистема иерархической системы базируется на алгоритмах параметрической и структурной адаптации.

5. Достижение цели планирования осуществляется процессами координации относительно общей цели системы.

6. Адаптивные системы управления в контуре координации с использованием подстройки по имитационным моделям должны обладать свойством рефлексии по отношению к подсистемам более низкого уровня.

#### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Материалы для электротермических установок / Н.В. Большаков, В.И. Бурцев, К.С. Борисанова и др.; Под ред. М.Б. Гутмана. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.

2. 50 лет деятельности в области информационных технологий и автоматизации: Харьков: ЗАО Тяжпромавто-матика, 2004. – 96 с.
3. Энергобережения в рыночных условиях / Материалы семинара: Київ, 31 березня – 1 квітня 2004р. – Київ: Укр. центр перепідготовки та навчання, 2004. – 223 с.
4. Предко М. Руководство по микроконтроллерам: Т.1. – М.: Постмаркет, 2001. – 416 с.
5. Предко М. Руководство по микроконтроллерам: Т.2. – М.: Постмаркет, 2001. – 488 с.
6. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Юнимедиа-стайл, 2002. – 832с.
7. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1975. – 528 с.
8. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 755 с.
9. Боровиков В. СТАТИСТИКА: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. – СПб: Питер, 2001. – 656 с.
10. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления / Пер. с англ. – М.: Наука, 1980. – 400 с.
11. Фомин В.Н. Фрадков А.А., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
12. Лингер Р., Миляс Х., Уитт Б. Теория и практика структурного программирования / Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 406 с.
13. Бутенин Н.В., Лунц Я.А., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. – СПб: ЛАНЬ, 1998. – 736 с.

Надійшла 20.04.2004

Після доробки 02.11.2004

*В роботі проводиться теоретичне обґрунтування методології побудови взаємозв'язаного дуального закону і моделей функціонування ієрархічних систем адаптивного керування виробництвом вогнетривких матеріалів на основі закону параметричної і структурної адаптації.*

*In this work the theoretical substantiation of decision methodology of constructing of the interconnected dual law and dynamic functioning models in hierarchical systems of fire-resistant materials production adaptive management is carried out on the basis of the law of parametrical and structural adaptation.*

УДК 62-83:621.313.333

Е. М. Потапенко, А. В. Соломаха, Е. Е. Потапенко

## КАЛИБРОВКА ДАТЧИКОВ ОДНОФАЗНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ДИНАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

*Синтезированы два фильтра для оценки неизвестного смещения нуля датчика, измеряющего синусоидальный сигнал. Разработан простой фильтр, позволяющий найти смещения нуля датчика без использования частоты сигнала. Проведено сравнение фильтров по объему вычислений. Работоспособность фильтров подтверждена численным моделированием.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Для качественного управления необходимо иметь точные датчики. Одной из самых распространенных ошибок датчиков является смещение нуля. Смещение нуля можно определить последовательной подачей двух

постоянных и равных по модулю сигналов, но с противоположными знаками. Путем алгебраического суммирования установившихся выходных сигналов получается удвоенное смещение нуля. Однако описанный способ калибровки требует введения специального калибровочного режима, и не применим в штатной работе системы, содержащей указанные датчики. В электросетях переменного тока измеряемые сигналы являются синусоидальными. В работе [1] для калибровки датчиков тока и напряжения двухфазных гармонических сигналов в штатном режиме были использованы сами рабочие сигналы и получены хорошие точностные характеристики.

Ниже предлагаются алгоритмы калибровки в штатном режиме работы системы при однофазном синусоидальном полезном сигнале.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На датчик подается синусоидальный сигнал. На его выходе вследствие наличия смещения нуля будет смещенная синусоида

$$y = x_0 + x_1, \quad (1)$$

где  $x_0, x_1$  – постоянная и гармоническая составляющие выходного сигнала  $y$ , т. е.  $x_1 = X \cos \omega t$ . Здесь  $\omega$  – частота выходного сигнала. Введем в рассмотрение новую переменную  $x_2 = X \sin \omega t$ . Тогда правую часть уравнения (1) можно описать следующей системой уравнений:

$$\dot{x}_0 = 0, \quad (2)$$

$$\dot{x}_1 = -\omega x_2, \quad \dot{x}_2 = \omega x_1. \quad (3)$$

Покажем, что система (2), (3) с измерением (1) является полностью наблюдаемой. При  $y \equiv 0$  система (1)–(3) принимает вид

$$0 \equiv -\omega x_2, \quad \dot{x}_2 \equiv \omega x_1,$$

откуда следует, что при  $|\omega| > 0$   $x_1 \equiv x_2 \equiv 0$ , а из (1) тогда следует  $x_0 \equiv 0$ . Это свидетельствует [2] о полной наблюдаемости системы (1)–(3). Следовательно, для этой системы можно построить наблюдатель для оценки переменных  $x_0, x_1, x_2$ .

### СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ 1

Наблюдатель для оценки переменных  $x_0, x_1, x_2$  имеет вид

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + L(C\hat{x} - y), \quad (4)$$

где

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{x}_0 \\ \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega \\ 0 & \omega & 0 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 1 \ 0], \quad L = \begin{bmatrix} l_0 \\ l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$l_0, l_1, l_2$  – коэффициенты передачи наблюдателя, индексом «^» обозначены оценки вектора  $x = [x_0 \ x_1 \ x_2]^T$ , который описывается уравнениями

$$\dot{x} = Ax, \quad (6)$$

$$y = Cx. \quad (7)$$

Вычитая из (4) (6) с учетом (7), получим уравнение ошибок наблюдателя  $\tilde{x} = \hat{x} - x$

$$\dot{\tilde{x}} = (A + LC)\tilde{x}. \quad (8)$$

Уравнение (8) имеет характеристическое уравнение

$$p^3 - (l_0 + l_1)p^2 + \omega(\omega + l_2)p - \omega^2 l_0 = 0. \quad (9)$$

В качестве стандартного характеристического уравнения примем уравнение

$$p^3 + a_1 \Omega p^2 + a_2 \Omega^2 p + \Omega^3 = 0, \quad (10)$$

где  $\Omega$  – частота, характеризующая быстродействие наблюдателя.

В случае биномиального распределения корней

$$a_1 = a_2 = 3. \quad (11)$$

В случае распределения корней по Баттерворту

$$a_1 = a_2 = 2. \quad (12)$$

Приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях  $p$  в уравнениях (9) и (10), найдем

$$l_0 = -\frac{\Omega^3}{\omega^2}, \quad l_1 = \frac{\Omega^3}{\omega^2} - a_1 \Omega, \quad l_2 = \frac{a_2 \Omega^2}{\omega} - \omega. \quad (13)$$

Уравнение наблюдателя (4) в дискретном виде будет выглядеть так:

$$x_0[k] = (x_0[k-1] + l_0 T_0 (x_1[k] - y[k])) / (1 - l_0 T_0),$$

$$x_1[k] = (x_1[k-1] - T_0 \omega [k] x_2[k] + l_1 T_0 (x_0[k] - y[k])) / (1 - l_1 T_0),$$

$$x_2[k] = x_2[k-1] + T_0 \omega [k] x_1[k] + l_2 T_0 (x_0[k] + x_1[k] - y[k]). \quad (14)$$

### СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ 2

Для уменьшения порядка наблюдателя подставим  $x_1$  из (1) в (3). С учетом (2) получим

$$\dot{y} = -\omega x_2, \quad (15)$$

$$\dot{x}_2 = \omega(y - x_0), \quad (16)$$

$$\dot{x}_0 = 0. \quad (17)$$

Уравнение (15) можно рассматривать как измерение  $z$  переменной  $x_2$  для системы (16), (17), т. е.

$$z = -\omega x_2, \quad (18)$$

$$z := \dot{y}. \quad (19)$$

Систему (16)–(18) можно представить в виде

$$\dot{q} = A_q q + B_q y, \quad (20)$$

$$z = C_q q, \quad (21)$$

где

$$q = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad A_q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}, \quad B_q = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}, \quad C_q = [0 \ -\omega]. \quad (22)$$

Для системы (20), (21) построим наблюдатель в виде

$$\dot{\hat{q}} = A_q \hat{q} + B_q y + L_q (C_q \hat{q} - z), \quad (23)$$

где  $L_q = [l_{q1} \ l_{q2}]^T$  – матрица коэффициентов передачи наблюдателя. Подстановка  $z$  из (21) в (23) и вычитание из полученного уравнения (20), дают уравнение ошибок на-блюдателя

$$\dot{\tilde{q}} = (A_q + L_q C_q) \tilde{q}. \quad (24)$$

Уравнению (24) соответствует характеристическое уравнение

$$p^2 + \omega l_{q2} p - \omega^2 l_{q1} = 0. \quad (25)$$

В качестве стандартного уравнения примем уравнение

$$p^2 + a_{q1} \Omega_q p + a_{q2} \Omega_q^2 = 0, \quad (26)$$

где  $\Omega_q$  – частота, характеризующая быстродействие на-блюдателя.

Приравнивая коэффициенты при равных степенях  $p$  в уравнениях (25) и (26), найдем

$$l_{q1} = -a_{q2} \frac{\Omega_q^2}{\omega^2}, \quad l_{q2} = a_{q1} \frac{\Omega_q}{\omega}. \quad (27)$$

Для моделирования наблюдателя подставим  $z$  из (19) в (23). Тогда

$$\dot{\hat{q}} = A_q \hat{q} + B_q y + L_q (C_q \hat{q} - \dot{y}). \quad (28)$$

С целью устранения необходимости дифференцировать выходной сигнал  $y$ , примем обозначение

$$\hat{q} + L_q y = r \Rightarrow \hat{q} = r - L_q y. \quad (29)$$

С учетом обозначения (29) уравнение (28) принимает вид

$$\dot{r} = ((A_q + L_q C_q)r + [B_q - (A_q + L_q C_q)L_q])y. \quad (30)$$

Уравнение (30) в скалярном виде выглядит так:

$$\dot{r}_1 = \omega l_{q1} (-r_2 + l_{q2} y), \quad (31)$$

$$\dot{r}_2 = \omega [-r_1 - l_{q2} r_2 + (1 + l_{q1} + l_{q2}^2) y]. \quad (32)$$

Характеристическое уравнение системы (31), (32) имеет вид (25). При  $l_{q2} = 2\text{sign}\omega$ ,  $l_{q1} = -1$  уравнение (25) принимает вид

$$D(p) = (p + |\omega|)^2 = 0. \quad (33)$$

Система (31), (32) в дискретном виде выглядит так:

$$\begin{aligned} r_1[k] &= r_1[k-1] + \omega[k] T_0 l_{q1} (l_{q2} y[k] - r_2[k]), \\ r_2[k] &= \frac{(r_2[k-1] + \omega[k] T_0 ((1 + l_{q1} + l_{q2}^2) y[k] - r_1[k]))}{(1 + \omega[k] T_0 l_{q2})}, \end{aligned} \quad (34)$$

где  $T_0$  – такт счета.

По уравнениям (1), (34) составлена программа моделирования на ПЭВМ. На рис. 1 представлены результаты моделирования с частотой  $\omega = 50c^{-1}$ ,  $X = 1$ ,  $x_0 = 0,5$ . В со-

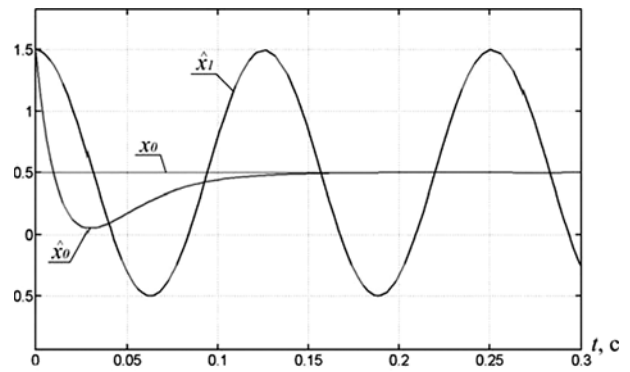


Рисунок 1

ответствии с рис. 1 время калибровки составляет 0,14 с. Как видно из (33), при заданных  $l_{q1}, l_{q2}$  время калибровки пропорционально  $\omega$ .

### СИНТЕЗ ФИЛЬТРА

Пропустим измерение (1) через звено с передаточной функцией

$$W_1(p) = \frac{T_1 p}{T_1 p + 1}, \quad (35)$$

в результате чего получим оценку полезного сигнала  $\hat{x}_1$

$$\hat{x}_1 = W_1(p) y. \quad (36)$$

Числитель функции (35) устраняет постоянную составляющую ( $x_0$ ), а знаменатель позволяет интегрировать сигнал без учета начальных условий. Вычитая (36) из (1) получим оценку смещения нуля датчика

$$\hat{x}_0 = y - \hat{x}_1. \quad (37)$$

Заметим, что чем ниже частота сигнала  $x_1$ , тем больше колебательность оценки (37), поэтому возникает необходимость фильтровать  $\hat{x}_0$ . В результате будем иметь

$$\hat{x}_{0f} = \frac{1}{T_2 p + 1} \hat{x}_0. \quad (38)$$

Для того, чтобы сохранить фазу входного сигнала  $y$  неизменной, вычтем (38) из (1), получим оценку полезного сигнала  $x_1$

$$v = y - \hat{x}_{0f}. \quad (39)$$

Алгоритм (35)–(39) в дискретном виде будет выглядеть так:

$$\begin{aligned} \hat{x}_1[k] &= T_1 (\hat{x}_1[k-1] + y[k] - y[k-1]) / (T_1 + T_0), \\ \hat{x}_0[k] &= y[k] - \hat{x}_1[k], \\ \hat{x}_{0f}[k] &= (T_0 \hat{x}_0[k] + T_2 \hat{x}_{0f}[k-1]) / (T_2 + T_0), \\ v[k] &= y[k] - \hat{x}_{0f}[k]. \end{aligned} \quad (40)$$

Было проведено моделирование уравнений (1), (40) с теми же исходными параметрами, что и для наблюдателя 2. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

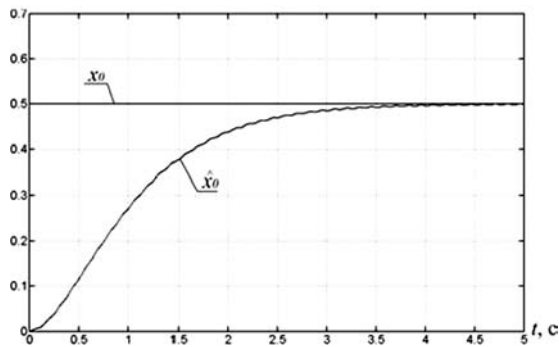


Рисунок 2

Результаты сравнения синтезированных алгоритмов по количеству математических операций сведены в табл. 1.

Таблица 1

Алгоритм	Количество операций сложения (вычитания)	Количество операций умножения (деления)
(14)	9	9
(34)	5	8
(40)	5	6

Как видно из табл. 1, объем вычислений алгоритма наблюдателя (34) по сравнению с алгоритмом (14) меньше примерно в 1,5 раза. Достоинствами разработанного фильтра (40) являются его наименьший объем вычислений и то, что нет необходимости знать частоту входного сигнала, а его недостаток – низкое быстродействие по сравнению с алгоритмами наблюдателей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы два фильтра (наблюдателя) для оценки неизвестного смещения нуля датчика, измеряющего синусоидальный сигнал. Произведено сравнение наблюдателей по объему вычислений. Объем вычислений во втором наблюдении в 1,5 раза меньше. Разработан простой фильтр, позволяющий найти смещение нуля датчика без использования информации о частоте сигнала. Работоспособность фильтров подтверждена численным моделированием. Сравнение результатов рис. 1 и рис. 2 показывает, что наблюдатель 2 имеет большее быстродействие, чем фильтр. Но поскольку в штатном режиме дрейф смещения нуля имеет большую постоянную времени, то оба результата можно считать удовлетворительными.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Оценка двухфазных неопределенных сигналов при наличии погрешностей датчиков // Электротехника (Россия). – 2004. – № 6. – С. 55–57.
2. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. – М.: Мир, 1977. – 650 с.

Надійшла 26.04.2004

Після доробки 10.11.2004

*Синтезовано два фільтри для оцінки невідомого зсуву нуля датчика, що вимірює синусоїдальний сигнал. Розроблено простий фільтр, що дозволяє знайти зсув нуля датчика без використання частоти сигналу. Зроблено порівняння фільтрів за обсягом обчислень. Працездатність фільтрів підтверджена чисельним моделюванням.*

*Two filters for an estimation of unknown zero creep of the gauge had been synthesized. The simple filter allowing to find a zero creep of the gauge without using the frequency of a signal is developed. The comparison of the observers on volume of calculations is done. Digital modelation approved efficiency of synthesized observers.*

---

# АВТОРЫ НОМЕРА

*Авраменко Валерий Павлович*

доктор технических наук, профессор Харьковского национального университета радиоэлектроники

*Алипов Илья Николаевич*

кандидат технических наук, доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники

*Алипов Николай Васильевич*

доктор технических наук, профессор Харьковского национального университета радиоэлектроники

*Афонин Юрий Сергеевич*

студент магистратуры Запорожского национального технического университета

*Бодянский Евгений Владимирович*

доктор технических наук, профессор Харьковского национального университета радиоэлектроники

*Бондарев Виктор Павлович*

кандидат физико-математических наук, доцент Запорожского национального технического университета

*Вершина Александр Иванович*

кандидат технических наук, доцент Запорожского национального технического университета

*Воропай Алексей Юрьевич*

аспирант Запорожского национального технического университета

*Второв Евгений Петрович*

кандидат технических наук, доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники

*Гапоненко Николай Прокопович*

кандидат технических наук Запорожского национального технического университета

*Гостев Владимир Иванович*

доктор технических наук, заведующий кафедрой Государственного университета информационно-коммуникационных технологий, г. Киев

*Гребенник Игорь Валериевич*

кандидат физико-математических наук, доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники

*Григорьев Андрей Викторович*

аспирант Донецкого национального университета

*Долгов Виктор Иванович*

доктор технических наук, профессор Харьковского национального университета радиоэлектроники

*Дубровин Валерий Иванович*

кандидат технических наук, доцент Запорожского национального технического университета

*Евсеева Людмила Григорьевна*

кандидат физико-математических наук, докторант Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

*Жуков Леонид Александрович*

кандидат технических наук, доцент Сибирского государственного технологического университета

*Журавлев Владимир Николаевич,*

кандидат технических наук, доцент Запорожского национального технического университета

*Завалин Алексей Анатольевич*

аспирант Одесского национального политехнического университета

*Зенькович Анатолий Александрович*

магистр Одесского национального политехнического университета

*Зиненко Игорь Иванович*

ассистент Запорожского национального технического университета

*Кабак Владислав Семенович*

кандидат технических наук, декан Запорожского национального технического университета

*Калачева Вероника Валериевна*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Харьковского университета воздушных сил

*Каргин Анатолий Алексеевич*

доктор технических наук, заведующий кафедрой Донецкого национального университета

---

*Карпуков Леонид Матвеевич*

кандидат технических наук, доцент Запорожского национального технического университета

*Касьян Константин Николаевич,*

кандидат технических наук, доцент Запорожского национального технического университета

*Касьян Николай Николаевич*

кандидат технических наук, декан Запорожского национального технического университета

*Киричек Галина Григорьевна*

ассистент Запорожского национального технического университета

*Крищук Владимир Николаевич*

кандидат технических наук, заведующий кафедрой Запорожского национального технического университета

*Кунгурцев Алексей Борисович*

кандидат технических наук, доцент Одесского национального политехнического университета

*Лукьянова Валентина Петровна*

ведущий инженер Национального Научного Центра "Харьковский Физико-технический институт"

*Намлинский Антон Александрович*

аспирант Запорожского национального технического университета

*Невлюдов Игорь Шакирович*

доктор технических наук, заведующий кафедрой Харьковского национального университета радиоэлектроники

*Неласая Анна Викторовна*

ассистент Запорожского национального технического университета

*Новотарский Михаил Анатольевич*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института математики НАН Украины

*Онуфриенко Владимир Михайлович*

кандидат физико-математических наук, декан Запорожского национального технического университета

*Опанасенко Владимир Николаевич*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института кибернетики НАН Украины

*Орлов Вадим Владимирович*

ведущий инженер Физико-технического института низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины

*Орловский Игорь Анатольевич*

кандидат технических наук, доцент Запорожского национального технического университета

*Осадчий Владимир Владимирович*

ассистент Запорожского национального технического университета

*Пица Дмитрий Макарович*

доктор технических наук, проректор Запорожского национального технического университета

*Потапенко Евгений Евгениевич*

младший научный сотрудник Запорожского национального технического университета

*Потапенко Евгений Михайлович*

доктор технических наук, профессор Запорожского национального технического университета

*Прохорец Светлана Ивановна*

инженер-исследователь Национального Научного Центра "Харьковский Физико-технический институт"

*Пулов Роман Дмитриевич*

аспирант Запорожского национального технического университета

*Пьянков Владимир Павлович*

кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой Запорожского национального технического университета

*Работнов Александр Евгеньевич*

аспирант Севастопольского национального технического университета

*Решетникова Наталья Владимировна*

аспирант Красноярского государственного технического университета

*Романенко Сергей Николаевич*

кандидат физико-математических наук, доцент Запорожского национального технического университета

*Романова Татьяна Евгеньевна*

доктор технических наук, старший научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

*Рыбин Вадим Олегович*

старший преподаватель Запорожского национального технического университета

*Самойлик Сергей Сергеевич*

инженер-конструктор ГП ЗМКБ "Прогресс" им. А.Г. Ивченко

*Самойлин Евгений Александрович*

адъюнкт Ростовского военного института ракетных войск

*Самоквит Светлана Алексеевна*

аспирант Запорожского национального технического университета

*Сенашова Мария Юрьевна*

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск

*Сидоров Виктор Николаевич*

соискатель Северодонецкого технологического института Восточноукраинского национального университета имени В. Даля

*Слипченко Александр Николаевич*

младший научный сотрудник Харьковского национального университета радиоэлектроники

*Соломаха Александр Викторович*

аспирант Запорожского национального технического университета

*Тимошенко Ирина Григорьевна*

аспирант Института кибернетики НАН Украины

*Фарафонов Алексей Юрьевич*

аспирант Запорожского национального технического университета

*Флора Валентин Данилович*

кандидат технических наук, доцент Запорожского национального технического университета

*Хажмурадов Манан Ахмадович*

доктор технических наук, начальник отдела Национального Научного Центра "Харьковский физико-технический институт"

*Хиль Михаил Иванович*

кандидат технических наук, заведующий кафедрой Северодонецкого технологического института Восточноукраинского национального университета имени В. Даля

*Цурихин Алексей Вячеславович*

стажер-преподаватель Харьковского государственного экономического университета

*Чернобородов Михаил Петрович*

аспирант Запорожского национального технического университета

*Чернобородова Наталья Петровна*

ассистент Запорожского национального технического университета

*Чугай Андрей Михайлович*

аспирант Института проблем машиностроения НАН Украины им. А.Н. Подгорного

*Чумаченко Виталий Павлович*

доктор физико-математических наук, профессор Запорожского национального технического университета

*Шило Галина Николаевна*

кандидат технических наук Запорожского национального технического университета

*Шостак Богдан Алексеевич*

ведущий инженер ООО "Торговый дом "Агротехника"

*Штефан Татьяна Александровна*

ассистент Запорожского национального технического университета

*Шушляпин Евгений Андреевич*

доктор технических наук, профессор Севастопольского национального технического университета

# ДЛЯ СВЕДЕНИЯ АВТОРОВ

Журнал "Радіоелектроніка. Інформатика. Управління" предназначен для публикации наиболее значимых научных и практических результатов исследований ученых высших учебных заведений и научных организаций.

Журнал включен в перечень научных изданий Украины, в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук.

Статьи, опубликованные в журнале, реферируются в реферативных журналах и базах данных ВИНТИ (Россия) и "Джерело" (Украина). Рефераты статей размещаются на web-сайте Запорожского национального технического университета (<http://www.zntu.edu.ua/RIC>).

Журнал издается два раза в год и распространяется по подписке в Украине. Подписной индекс 22914.

**Последовательность размещения материала статьи:** индекс УДК, название статьи, инициалы и фамилия автора(ов), аннотация, текст, перечень ссылок. Рукопись статьи должна быть подписана всеми авторами.

## Текст статьи

Принимаются статьи на русском, украинском и английском языках. Размер статьи до 0,5 авторского листа.

## Структура статьи

Редакционная коллегия принимает к рассмотрению только научные статьи, которые содержат такие необходимые элементы: постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими заданиями; анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, и на которые опирается автор; выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья; формулирование целей статьи (постановка задачи); изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов, выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

## Требования к оформлению

Статьи принимаются набранные в редакторе Word for Windows (v.6 и выше).

Параметры страницы:

- размер бумаги - А4(210x297);
- ориентация - книжная;
- шрифт - Times New Roman Сур, размер - 12pt;
- междустрочный интервал - полуторный;
- верхнее поле - 20мм, нижнее - 20мм, левое - 25мм, правое - 15мм.

## Аннотация

Аннотация является обязательной и подается в начале статьи на русском, украинском (для граждан Украины) и английском языках. Объем аннотации не должен

превышать 40 слов.

## Рисунки

Рисунки помещаются в тексте и подаются в отдельных файлах (формат .TIF с разрешением не менее 200 dpi). Рисунки нумеруют и подписывают внизу.

## Таблицы

Заголовки таблиц размещаются по центру.

## Формулы

Формулы выполняются с помощью встроенного в Word for Windows редактора Microsoft Equation. Формулы нумеруют в круглых скобках справа:

$$Z(\Theta) = 101 \log \left( \frac{y^2}{s} \right) \quad (3)$$

Формулы большого размера записываются в несколько строк.

## Перечень ссылок

Перечень ссылок в конце рукописи подается языком оригинала и составляется в порядке упоминания ссылок в тексте и в соответствии со стандартом на библиографическое описание. Ссылки на литературу в тексте обозначаются цифрой в квадратных скобках.

**В сведениях об авторах** необходимо привести фамилию, имя, отчество(полностью), место работы, должность, ученую степень, рабочий и домашний адрес, телефоны, e-mail.

## В редакцию журнала необходимо представить:

- 1) распечатанный текст статьи в 2-х экземплярах;
- 2) экспертное обоснование о возможности опубликования;
- 3) сведения об авторах;
- 4) сопроводительное письмо-ходатайство из организации, где была выполнена работа;
- 5) название статьи, фамилии, имена и отчества авторов на английском языке;
- 6) дискета 3,5" с текстом документа, файлами рисунков, данными о статье на английском языке и сведениями об авторах в формате Word for Windows (v.6 и выше). Файлы можно выслать электронной почтой в виде заархивированных (ZIP-архиватором) файлов.

*Статьи, которые не отвечают указанным требованиям, не принимаются к рассмотрению.*

*Рукописи и дискеты не возвращаются.*

**Адрес редакции:** 69063, г. Запорожье,

ул. Жуковского, 64, ЗНТУ, редакция журнала "PIU"

Тел.: (0612) 63-09-99,

(0612) 69-85-00 - редакционно-издательский отдел

(0612) 69-82-19 - главный редактор

(0612) 63-09-99 - зам. главного редактора

Факс: (0612) 64-22-74

E-mail: [rvv@zntu.edu.ua](mailto:rvv@zntu.edu.ua), [TQM@zntu.edu.ua](mailto:TQM@zntu.edu.ua)

Запорізький національний технічний університет  
Інститут безперервної освіти  
Навчальне відділення "Освіта для бізнесу"

**Шановні друзі!**

**Запрошуємо на програми підготовки та перепідготовки  
з нижченаведених напрямків:**

- Система міжнародних розрахунків при виконанні зовнішньо-економічної діяльності.
- Захист інформації в системах телекомунікацій.
- Програмування в середовищі Delphi.  
(можлива дистанційна форма навчання - з використанням Internet)
- Системи керування базами даних на прикладі СУБД Informix.  
(можлива дистанційна форма навчання - з використанням Internet)
- Фінансовий менеджмент.
- Ціноутворення та аналіз діяльності підприємства.
- Управління персоналом.
- Протокол ділового спілкування.
- Менеджмент організацій.
- Маркетинг: модне слово чи філософія бізнесу?
- Комп'ютерне проектування в системі AutoCAD.
- Бухгалтер, головний бухгалтер фірми.

Тривалість програм – від 1 до 4 міс.

Для навчальних груп підприємств розробляються навчальні програми  
з напрямків діяльності кафедр університету.

---

Адреса: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського 46, оф. 616  
Тел./факс (0612) 64-29-59, тел. (0612) 69-83-51  
e-mail: [business-school@zntu.edu.ua](mailto:business-school@zntu.edu.ua)  
[www.zntu.edu.ua](http://www.zntu.edu.ua)

*Що відрізняє сильну фірму від слабкої, так це  
насамперед кваліфікація її персоналу, його знання,  
мотивація і спрямованість.*

*П. Друккер*