

УДК 330.341

Н.В. Караєва, Л.О. Левченко, Я.М. Трохименко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ФОРМУВАННЯ СИСТЕМ ІНДИКАТОРІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Проаналізовано підходи щодо формування систем індикаторів сталого розвитку. Індикатори розроблено Комісією ООН зі сталого розвитку та міжнародними системами екологічних індикаторів.

Ключові слова: індикатори сталого розвитку, сталий розвиток, індекси СР, інтегровані індикатори

Постановка проблеми

Протягом тривалого часу економічний розвиток України супроводжувався незбалансованою експлуатацією природних ресурсів. Наслідки такої економічної діяльності продовжують негативно впливати на навколишнє середовище, що призводить до виснаження ресурсного потенціалу, зростання витрат на захист населення і територій, ліквідацію наслідків надзвичайних ситуацій та відтворення природної рівноваги.

Перехід на модель сталого розвитку (СР) – процес складний і тривалий. Труднощі обумовлені, з одного боку, протиріччями сучасного розвитку глобальної системи, а з іншого – динамізмом світових процесів, що ускладнює визначення тенденцій, які можуть принципово вплинути в найближчому майбутньому на ситуацію в світі.

Мета статті

Метою статті є аналіз існуючих підходів щодо формування системи індикаторів сталого розвитку та вибір найбільш оптимального для України.

Викладення основного матеріалу

Індикатор СР представляє інформацію про зміни в системі. Корисність індикатора залежить від

специфіки контексту, в якому він використовується. Згідно зі статтею 40 «Порядок денний на ХХІ сторіччя» [1], передбачається розробити індикатори СР, необхідні для того, щоб забезпечити обґрунтовані критерії ухвалення рішень на всіх рівнях, гарантуючи тим самим саморегулювання стійкості системи «природа – суспільство».

Розробка критеріїв та індикаторів СР здійснюється з використанням двох основних підходів:

– побудова інтегрального індексу на основі агрегованої оцінки стійкості (Aggregate Sustainability Measures – ASM);

– побудова системи часткових індикаторів стійкості (Sustainability Performance Indicators – SPI), кожен з яких відображає окремі аспекти СР.

Агрегованість зазвичай здійснюється на основі трьох груп показників: еколого-економічних, еколого-соціально-економічних і власне екологічних.

Як приклад наведемо систему вимірювань СР (табл. 1), запропоновану Інститутом прикладного системного аналізу та НАН України і МОН України [2;3].

З табл. 1 виходить, що кожен агрегований індекс обчислюється з використанням великої кількості індикаторів і наборів даних як кількісного,

Таблиця 1

Перелік для оцінки агрегованого індексу СР [2]

Аспект сталого розвитку	Тип агрегованого індексу	Кількість складових
Економічний (І _{ек})	І _к – індекс конкурентоспроможності	3 індикатора 47 наборів даних
	І _{ес} – індекс економічної свободи	10 індикаторів 50 наборів даних
Екологічний (І _е)	ESI – індекс екологічної стійкості	21 індикатор 76 наборів даних
Соціальний (І _с)	І _{кб} – індекс якості і безпеки життя	9 індикаторів
	І _{лр} – індекс людського розвитку	3 індикатора
	І _{кс} – індекс суспільства, яке засноване на знаннях	3 індикатора 15 наборів даних

так і якісного характеру. Індикатори вимірюються в різних одиницях і мають різні інтерпретації, тому згідно [2] значення індикаторів необхідно приводити до нормованої форми так, щоб їх зміни, як і зміни самих індексів, знаходилися в діапазоні від 0 до 1.

Інтегральний підхід до побудови агрегованого показника сталості найбільш повно реалізований в розробках ПРООН та іншими організаціями ООН [4;5]. Так, наприклад, Всесвітнім Банком для оцінки стійкості економіки визначена методика розрахунку показника "Дійсних заощаджень" (Genuine saving). Він визначає добробут країни більш широко, ніж національні рахунки. Мета показника – представити "вартість чистої зміни в цілому спектрі активів, важливих для розвитку: виробничі активи, природні ресурси, якість навколишнього середовища, людські ресурси й іноземні активи". Також, відповідаючи на пропозиції, що включені до Порядку денного на XXI століття, Статистичний відділ ООН в 1993 році випустив Керівництво з Національних рахунків [6], в якому була викладена Система комплексного екологічного та економічного обліку (СЕЕО). СЕЕО базується на врахуванні екологічного фактора в національних статистиках і спирається на корективу традиційних економічних показників за рахунок двох величин: оцінки вартості виснаження природних ресурсів і еколого-економічного збитку від забруднення. Основні етапи впровадження СЕЕО в практику обліку такі [6, с.145–146]:

- зіставлення рахунків ресурсів і використання;
- виявлення і збір даних про витрати на охорону навколишнього природного середовища (НПС);
- зіставлення рахунків виробничих природних активів;
- зіставлення рахунків природних ресурсів у фізичних одиницях;
- оцінка природних ресурсів;
- зіставлення рахунків вартісного обліку;
- складання рахунків екологічних активів у фізичних одиницях (факультативно);
- збирання даних про викиди за економічними секторами;
- розрахунок компенсаційних витрат за викидами;
- агрегування звичайних і екологічно скорегованих показників.

Основою екологічної трансформації національних рахунків є наступний показник – екологічно вивірений чистий внутрішній продукт (EDP Environmentally adjusted net domestic product). Корекція відбувається у два етапи. На першому етапі з чистого внутрішнього продукту віднімається вартісна оцінка виснаження природних ресурсів (вирубка лісу, добування нафти, мінеральної сировини та ін.). Далі із отриманого показника віднімається вартісна оцінка екологічного збитку в

результаті забруднення повітря, води, розміщення відходів, виснаження ґрунту, використання підземних вод.

Про необхідність розрахунку частини екологічних затрат в структурі ВВП під час формування і обґрунтування окремих частин державного бюджету України, а також включення вартісних показників охорони навколишнього середовища в систему національних рахунків і макроекономічного аналізу відмічається, наприклад, в роботі [7].

Слід відмітити, що проведені на основі цієї методики розрахунку для окремих країн показали величезну розбіжність традиційних економічних показників від екологічно скорегованих. Крім того, виявилися складними для використання на національному рівні, модулі СЕЕС, що пов'язані із вартісною оцінкою виснаження природних ресурсів, екологічного збитку, врахуванням впливу забруднення на здоров'я і т.д. Тому підходи до врахування екологічного фактору в національних рахунках продовжують активно розроблятися.

Другий підхід щодо формування індикаторів СР базується на побудові системи показників, що здатні відображати окремі аспекти СР – екологічні, економічні, соціальні та інституціональні. Варто відмітити дослідження Всесвітнього Банку: запропоновані індикатори в рамках щорічної доповіді Всесвітнього Банку "Індикатори світового розвитку" [5]. Зараз для оцінки розвитку світового співтовариства розроблено понад тисячі показників, за якими достатньо складно приймати рішення, судити про ступінь сталості територій. Необхідно ранжирувати системи індикаторів за рівнями пріоритетності. Прикладом такого підходу є методологія Комісії ООН із СР (1996, 2001) [8]. У 1996 році Комісією були виділені чотири області формування індикаторів: соціальна, економічна, екологічна й інституційна та було рекомендовано використати 134 індикатори. Далі цей список в 2001 році було зменшено до 57, і додалася класифікація за темами. Дана система індикаторів СР наведена в табл. 2.

Більшість систем міжнародних екологічних індикаторів включають три блоки показників: - екологічні індикатори впливу на навколишнє середовище; індикатори якісного стану під час даного рівня впливу; індикатори реагування – покращення сучасного стану навколишнього середовища, або регулювання впливу (табл. 3).

Індикатори змін і стану НПС відповідають на питання – які тенденції змін якісного стану природних ресурсів.

Індикатори антропогенного впливу, що викликає зміни природного середовища, відповідають на друге питання – пошук причини змін.

Індикатори, розроблені Комісією ООН із СР

Тема	Підтема	Індикатор
1	2	3
СОЦІУМ		
Рівність	Бідність	Процент населення, що мешкає нижче рівня бідності
		Індекс Джині про нерівномірність доходів
	Рівень безробіття	Рівень безробіття
	Гендерна рівність	Співвідношення середньої зарплати жінок до зарплати чоловіків
Здоров'я	Харчування	Стан харчування дітей
	Смертність	Дитяча смертність до 5 років
		Тривалість життя, прогнозована
	Санітарні умови	Процент населення, що забезпечене каналізацією
	Питна вода	Населення, забезпечене питною водою
	Охорона здоров'я	Процент населення, забезпечене медичною допомогою
		Вакцинація проти інфекційних дитячих захворювань
		Рівень поширення контрацептивів
Освіта	Рівень освіти	Діти, що отримують початкову освіту
		Дорослі з повною середньою освітою
	Грамотність	Грамотність дорослого населення
Забезпечення житлом	Умови проживання	Житлова площа на душу населення
Безпека	Кримінальна ситуація	Число криміногенних випадків на 100 000 населення
Населення	Зміна чисельності населення	Приріст населення
		Міське населення в офіційних і неофіційних поселеннях
НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ		
Атмосфера	Зміна клімату	Емісія парникових газів
	Зменшення озонового шару	Споживання сполук, що руйнують озон
	Якість повітря	Концентрація атмосферних забруднювачів у містах
Земля	Сільське господарство	Площа орних земель, а також земель, що постійно обробляються
		Використання добрив
		Використання пестицидів
	Ліси	Лісистість
		Вирощування лісів
Опустелення	Площа земель, що порушені в результаті опустелення	
Океани, моря і узбережжя	Прибережна зона	Концентрація забруднюючих речовин (ЗР) в прибережних зонах
		Процент населення в прибережній зоні
	Рибальство	Щорічний вилов основних видів риби
Прісна вода	Кількість води	Щорічне споживання підземних і поверхневих вод у % від загальнодоступної кількості води
		Якість води
Біорізноманіття	Екосистеми	Площа ключових екосистем
	Видове	Території, що охороняються у % від загальної площі
		Багатство ключових видів
ЕКОНОМІКА		
Структура економіки	Економічні показники	ВВП на душу населення
		Доля інвестицій у валовий внутрішній продукт (ВВП)
	Торгівля	Торговий баланс за продуктами виробництва і сервісу
	Фінансовий статус	Борг у % до валового національного продукту (ВНП)
Споживання і виробництво	Споживання матеріалів	Загальна офіційна допомога для розвитку у % від ВНП
		Інтенсивність використання матеріалів
	Використання енергії	Щорічне споживання енергії на душу населення
		Доля споживання енергії від поновлюємих джерел
		Інтенсивність використання енергії
	Виробництво і управління відходами	Виробництво муніципальних і промислових твердих відходів
		Виробництво небезпечних відходів
		Виробництво радіоактивних відходів
Використання перероблених відходів		
Транспорт	Віддаль переміщення на душу населення	
ІНСТИТУЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ		
Інституційні показники	Стратегія СР	Національні стратегії СР
	Міжнародне співробітництво	Реалізація глобальних угод
Інституційні можливості	Інформаційні	Кількість користувачів Інтернету на 1000 жителів
	Комунікаційна інфраструктура	Телефонні лінії на 1000 жителів
	Наука і технологія	Затрати на дослідження та розвиток в % від ВВП
	Підготовка до катастроф і ліквідація їх наслідків	Економічні і людські втрати від природних катастроф

Інтегровані індикатори системи “НПС — народне господарство”

Категорія	Показники впливу	Показники стану	Показники реагування
<i>Екологічні індикатори</i>			
Охорона якості води	Щорічний забір підземних вод доступного запасу % Регіональне споживання води на душу населення (споживача), л/добу Водосмість с/г, куб. м./тис. га сільгоспугідь в розрахунку на одиницю сільськогосподарського ВВП Водосмість промисловості, куб. м. в розрахунку на одиницю промислового ВВП	Запаси підземних вод, куб. м. Фекальне забруднення свіжої води Біохімічне споживання кисню свіжої води, БСК ₅ (20 ⁰ C).	Очистка стічних вод, % всього за типом обробки) Ціни на воду та водоспоживання для очистки побутових вод
Охорона морів і прибережних зон	Скид нафтопродуктів у прибережні води, т Надходження азоту, фосфору у прибережні води т/рік загального азоту і фосфору	Середньорічний вилов морських організмів, т Співвідношення середньорічного вилову морських організмів до максимального середньорічного вилову, %	Регуляція запасів вилову
Інтегральний підхід до планування і управління земельними ресурсами	Освоєння землі, тис. га С/г угіддя, % від загальної площі Площі під промисловою забудовою, % від загальної площі Площі природних рекреацій, % загальної площі	Площа деградованих і порушених земель, % загальної площі Площа радіаційно забруднених земель, % загальної площі Площі, що підлягають територіальній організації земель, % від загальної площі	Реформування земельних відношень, % власників і орендарів земель Рекультивування землі
	Землеємність с/госп. тис. на/одиницю с/г ВВП Землеємність промисловості, на/одиницю промислового ВВП		
Управління чутливими екосистемами: боротьба з запустелюванням та засухами	Населення, що проживає в посушливих районах, % Площа земель, що охоплені процесами опустелювання, кв. км і % від загальної площі	Національний середньомісячний індекс опадів, мм	
Управління чутливими екосистемами, стійкий розвиток гірських територій	Населення, що проживає в гірських районах, % Площа гірських районів, кв. км і % загальної площі	Площа небезпечних зон, % площі гірських регіонів Площа деградованих земель, % площі гірських регіонів	Площа захищених земель, % площі гірських регіонів
Екологічна безпека с/г	Застосування пестицидів, кг/га т.д.в./10 кв. км с/г угідь Застосування добрив, т.д.в./10 кв. км с/г угідь	Площа ріллі на душу населення, га Площа засолених і підтоплених земель, га та % с/г угідь	Витрати на охорону і відтворення земельного плодороддя, % від ВНП
Охорона лісів	Лісистість території, % Темпи відновлення лісів, га/рік	Площа лісів та її динаміка, га Запаси деревини, куб. м Споживання деревини на виробництво, %	Доля охороняємих лісів, % від загальної площі лісів Доля лісів, що підлягають управлінню, %
Збереження біорізноманіття	Площа заповідних територій, % загальної площі	Види флори і фауни, що охороняються, % від загальної чисельності видів	Площа захищених земель суші і прибережних зон, % загальної площі І за типами екосистем
Управління екологічними біотехнологіями		Регіональні і раціональні витрати на біотехнології, % від ВНП	Наявність національних програм та рекомендацій з розвитку біотехнологій

Охорона атмосфери	Національні емісії газів, що викликають парниковий ефект: CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, метан т/рік	Концентрація SO ₂ , CO, CO ₂ - оксидів азоту; - озону;	Загальні витрати на зменшення і контроль забруднення атмосферного повітря грн. (\$US)
	Національна емісія окислів сірки (SO _x) за сумою (SO ₂), т., або тис. т. per capita, або на одиницю ВВП, або на одиницю загального енергоспоживання Національні емісії антропогенних оксидів азоту NO _x за сумою (NO ₂) т., або тис. т. per capita, або на одиницю ВВП, або на одиницю загального енергоспоживання Споживання фористих сполук, що порушують озоновий шар, т	- метану; - макрочастин; - вуглецю; - тетрахлориду; - метил-хлороформу; - CFC – 11, 12, 22, 113; - токсичних сполук у повітрі населених; міськ, для CO мг/м (ppb) Глобальні зміни температури повітря Наземний рівень УФ радіації	Зниження викидів (1980-1996), % Доля державних витрат на охорону повітря, % Економічні і фінансові інструменти
Управління твердими відходами	Утворення промислових і муніципальних відходів, т per capita в рік Утворення побутових відходів кг per capita на добу Утворення відходів під час добування і збагачення корисних копалин	Збір і утилізація побутових (муніципальних відходів, т/одиночку ВВП на рік) Площі під твердими відходами, тис. га	Темпи скорочення відходів на одиницю ВВП, т/грн. рік Ступінь повторного і вторинного використання відходів, % Витрати на управління відходами, грн./одиночку ВВП
Управління токсичними хімічними речовинами	Емісії важких металів Емісії органічних сполук Використання токсичних пестицидів	Концентрація токсичних речовин в об'єктах та природних медіумах Концентрація важких металів у річковій воді	Зміна вмісту токсичних речовин у продуктах виробництва
Управління небезпечними відходами	Утворення небезпечних відходів в розрахунку на одиницю ВВП, т Імпорт, експорт небезпечних відходів, т	Площі земель під небезпечними відходами, кв. км	Загальні витрати на зміну та переробку відходів, грн. (\$US)
Соціальні індикатори			
Демографічна динаміка і стійкість	Темпи зростання населення, %	Загальна чисельність населення, тис. чол. Щільність населення, чол./кв. км	% населення, що пов'язане із біологічними або хімічними очисними спорудами % % з переробки відходів громадська думка
Охорона здоров'я населення	Чисельність населення, що проживає в екологічно небезпечних умовах, млн. чол.	Забезпечення якісною питною водою, %	Загальнонаціональні витрати на охорону здоров'я, % від ВВП
Підтримання екологічного стану людських поселень	Ступінь урбанізації. Кількість міст з населенням > 750 тис. чол. і % населення цих міст Емісії NO ₂ і SO _x в населених пунктах Щільність транспортних потоків - міських - національних	Вплив на населення забруднення повітря Шум Забруднення питної води	Озеленення населених пунктів Економічні, фінансові і регулятивні інструменти Витрати на водоочистку і зменшення шуму
Економічні індикатори			
Національна політика і міжнародна кооперація	ВВП per capita (на душу населення), грн. (\$US) Загальний промисловий ВВП, грн. (\$US) Загальний с/г ВВП, грн. (\$ US)	Доля промислових продуктів в загальному товарному експорті, %	Витрати на охорону навколишнього середовища, % від ВВП Витрати на контроль і зменшення забруднення, % від ВВП
Фінансові ресурси і механізми	Чисті ресурсні трансферти/GDP, %	Загальні зовнішні борги/ВВП, %	Сума нових і додаткових фондів для сталого розвитку з 1992 року, грн., (\$US)
Зміна структури споживання	Витрати на приватне споживання, грн. (\$US) Наявність енергетичних ресурсів, нафт. екв. Загальне споживання паливно-енергетичних ресурсів г/дж	Загальна енергоємність ВВП, нафт. Екв/млн. грн. Загальна електроємність ВВП, квт. Час/млн. грн. Загальна енергоємність промисловості	

А індикатори реагування, що характеризують способи екологічної політики, котрі регулюють появу та розвиток екологічних проблем, відповідають на питання – які засоби необхідно вжити з метою попередження погіршення або покращення існуючої ситуації.

За сучасних умов сфера статистики природних ресурсів та охорони довкілля України охоплює повітряний басейн, водні, земельні ресурси, лісовий та заповідний фонди, біологічне розмаїття флори і фауни, а система статистичних показників включає надходження шкідливих речовин у повітря від стаціонарних та рухомих джерел, скидання забруднених стоків у поверхневі водойми, утворення та розміщення токсичних відходів у довкілля, наявність та обсяги використання земельних, водних, рослинних, тваринних ресурсів. Сьогодні позитивним є реформування державних статистичних спостережень зі статистики охорони НПС, яке відбувається відповідно до Стратегії розвитку статистики України на період до 2012 року. Так, у 2005 році суттєвих змін зазнала система показників, за якими будуть проводитись державні статистичні спостереження економічної та екологічної діяльності у лісовому господарстві країни. Також підписання та ратифікація Україною багатьох протоколів в рамках Конвенції про транскордонне забруднення повітря на великій відстані, Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі надало поштовх проведенню робіт щодо удосконалення та розширення статистичного обліку викидів шкідливих речовин в атмосферу від стаціонарних та рухомих джерел забруднення.

Одним із головних кроків на шляху формування системи індикаторів СР є гармонізація підходів до створення системи національних технологічних, споживчих норм, екологічних індикаторів і стандартів на основі системи ISO–14000 як міжнародного стандарту впровадження ефективного екологічного менеджменту.

Показником соціально безпечного розвитку країни, відображенням її соціально-економічного стану є рівень демографічної безпеки (ДМБ), яка визначає стан захищеності основних життєво важливих демовідновлювальних процесів від реальних та потенційних загроз. Демографічні загрози – це тенденції, внаслідок виникнення і нарощування яких створюються негативні кількісні й якісні зміни в динаміці населення, що негативно впливають на розвиток країни. Рівень ДМБ може оцінюватися через інтегральні індикатори та систему додаткових показників, за допомогою яких здійснюється діагностика стану населення. Слід зазначити, що оцінка ДМБ не може відбуватись без пізнання співвідношення якості та кількості

населення, оскільки демографічні втрати і деформації структури населення негативно впливають на життєдіяльність суспільства, зокрема – на склад трудових ресурсів.

Висновки

З вищевикладеного можна зробити висновок, що існує безліч варіацій системи індикаторів, які характеризують рівень СР. Цілеспрямоване управління соціально-економічним розвитком з метою досягнення його сталого розвитку, встановлення нових екологічних і соціальних пріоритетів держави веде до зміни системи оцінок, за допомогою яких ухвалюються рішення. Не існує єдиної системи формування індикаторів сталого розвитку. Отож для України одним із головних кроків на шляху формування системи індикаторів СР є гармонізація підходів до створення системи національних технологічних, споживчих норм, екологічних індикаторів і стандартів на основі системи ISO–14000 як міжнародного стандарту впровадження ефективного екологічного менеджменту.

Список літератури

1. Порядок денний на XXI століття. Прийнятий на Конференції ООН з навколишнього середовища і розвитку, 3-14 червня 1992 р., Ріо-де-Жанейро, Бразилія. Офіційний веб-сайт Організації Об'єднаних Націй. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://www.unep.org/environmentalgovernance/>. – Назва з екрану.
2. Згуровський М.З. Сталій розвиток у глобальному і регіональному вимірах: аналіз за даними 2005 р./ М.З. Згуровський – К.: НТУУ «КПІ», 2006. – 84 с.
3. Згуровський М.З. Україна в глобальних вимірах сталого розвитку / М.З. Згуровський // Дзеркало тижня. – 2006. – № 19(598).
4. World Bank. World Development Report, 1993. – Washington D.C.: World Bank, 1993 – 175 p.
5. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. – New York: UN, 2001. – 319 p.
6. Комплексный экологический и экономический учет. Оперативное пособие // Департамент по экономическим и социальным вопросам. Стат. отдел. – (Методические исследования, Сер. F, №78) – Нью-Йорк: ООН, 2001. – 201 с.
7. Шостак Л.Б. Регулирование экономического роста в условиях природно-ресурсных ограничений / Л.Б. Шостак [под ред. Б.М. Данилишина]. – К.: СОПС Украины НАН Украины, 1998. – 320 с.
8. Напрямки роботи. Індикатори сталого розвитку. Офіційний веб-сайт Організації Об'єднаних Націй. [Електронний ресурс]. – Доступний з http://www.un.org/esa/dsd/dsd_aofw_ind/ind_index.shtml?utm_source=OldRedirect&utm_medium=redirect&utm_content=dsd&utm_campaign=OldRedirect. – Назва з екрану.

Стаття надійшла до редколегії 1.12.2011

Рецензент: д-р екон. наук, проф. В.В.Дергачова, в.о. завідувача кафедри менеджменту НТУУ «КПІ», Київ.

УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

УДК 62-533.6

С.В. Иносов, Т.Г. Соболевская, К.В. Сидун

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

СИНТЕЗ ДИНАМИЧЕСКОГО КОРРЕКТОРА ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

Предложена методика синтеза динамического корректора тепловой инерционности датчика температуры. Динамический корректор позволяет частично компенсировать тепловую инерционность датчика и улучшить быстродействие измерительного канала.

Ключевые слова: датчик температуры, динамическая коррекция, обработка сигналов, цифровые фильтры, оптимизация

Постановка проблемы

При вводе в управляющий компьютер аналогового сигнала последний преобразуется в поток действительных чисел (цифровой сигнал) в результате периодической выборки значений, считываемых с датчика. Инерционность датчика (например, тепловая инерционность датчика температуры) ограничивает быстродействие измерительного канала. Обработывая входной поток чисел специальной программой (динамическим корректором), можно частично компенсировать инерционность датчика, улучшить быстродействие измерительного канала и уменьшить динамические ошибки измерений.

Анализ последних исследований и публикаций

В связи с переходом к цифровой обработке сигналов в последнее время возросла актуальность исследований в области цифровой фильтрации сигналов и синтеза оптимальных цифровых фильтров разного назначения [1;2].

Цель исследования

Задачей данной работы является отработка методики синтеза динамического корректора датчика температуры. Синтез сводится к решению оптимизационной задачи. Критерием оптимальности принят минимум среднеквадратичной динамической погрешности измерения при скачке измеряемой величины (температуры). Основным ограничением является коэффициент усиления шумов измерения.

Изложение основного материала

Корректор представляет собой линейный инерционный стационарный (ЛИС) алгоритм фильтрации цифровых сигналов в реальном времени. Дискретная передаточная функция корректора в нерекурсивной форме имеет вид:

$$B_0 + B_1 \cdot z^{-1} + \dots + B_N \cdot z^{-N},$$

где z^{-1} – оператор запаздывания на один такт;

$B_0 - B_N$ – массив весовых коэффициентов корректора;

N – порядок корректора (для иллюстрирующего примера $N = 9$).

Программа динамического корректора работает в цикле. На каждом очередном такте осуществляется ввод входного значения X_0 от датчика температуры. После ввода соответствующего числа программа вычисляет и выдает выходное значение Y_0 (скорректированная температура) на данном такте как свертку (сумму попарных произведений) массива N предыдущих значений входа ($X_0 - X_N$), сохраненных в оперативной памяти, и массива весовых коэффициентов (констант) динамического корректора ($B_0 - B_N$).

Целью синтеза является нахождение численных значений весовых коэффициентов ($B_0 - B_N$), обеспечивающих оптимальную компенсацию инерционности датчика температуры. То есть синтез корректора реализуется как оптимизационная задача. Весовые коэффициенты корректора подбираются из условия минимума динамической погрешности измерительного канала. Постановка оптимизационной задачи следующая (рис. 1).

Экспериментально полученная переходная функция X (реакция на единичный скачок температуры в виде потока чисел) канала измерения

пропускается через корректирующий нерекурсивный ЛИС фильтр з произвольными начальными значениями весовых коэффициентов B_0, B_1, B_2, \dots . Полученная скорректированная переходная функция Y сравнивается с идеальной реакцией (задержанный на 1-2 такта единичный скачок). Задержка должна быть минимальной, но не меньше реального запаздывания реакции датчика, иначе идеал, к которому мы стремимся, будет физически нереализуемым.

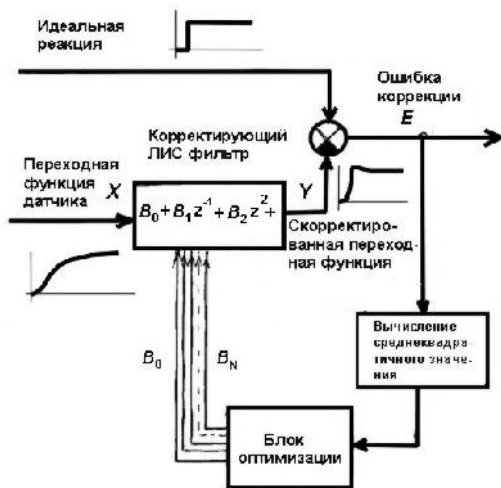


Рис. 1. Схема синтеза динамического корректора

Разность между идеальной и реальной переходными функциями является динамической ошибкой коррекции E . Для динамической ошибки вычисляем среднеквадратическое значение. Это и будет критерий оптимизации, который мы стараемся минимизировать. Блок автоматической оптимизации подберет весовые коэффициенты так, чтобы достичь минимума среднеквадратичной ошибки динамической коррекции.

При оптимизации учитывается следующее ограничение. Корректор компенсирует инерционность за счет форсировки переходных процессов, следовательно он усиливает случайные шумы измерения. Коэффициент усиления «белого шума» K вычисляется через весовые коэффициенты по формуле:

$$K = \frac{\sqrt{B_0^2 + B_1^2 + \dots + B_N^2}}{B_0 + B_1 + \dots + B_N}$$

Чем сильнее форсировка, тем лучше быстроедействие, но тем больше усиливаются случайные шумы, которые всегда присутствуют в границах точности канала измерения. Усиление шума приведет к реальному уменьшению точности измерения. Поэтому коэффициент усиления шума нужно ограничить. Численное значение допустимой

верхней границы для коэффициента K можно принять в диапазоне от 2 до 5, в зависимости от имеющегося запаса точности канала измерения. Это и будет основное ограничение при оптимизации.

Кроме того, сумма весовых коэффициентов $B_0 + B_1 + \dots + B_N$ корректора (то есть его статический коэффициент передачи) должна равняться единице. Это будет дополнительное ограничение при оптимизации.

Задача оптимизации решалась с помощью электронных таблиц EXCEL. Ниже приводятся результаты синтеза динамического корректора датчика температуры для иллюстрирующего примера. В результате оптимизации получена такая весовая функция динамического корректора (рис. 2).

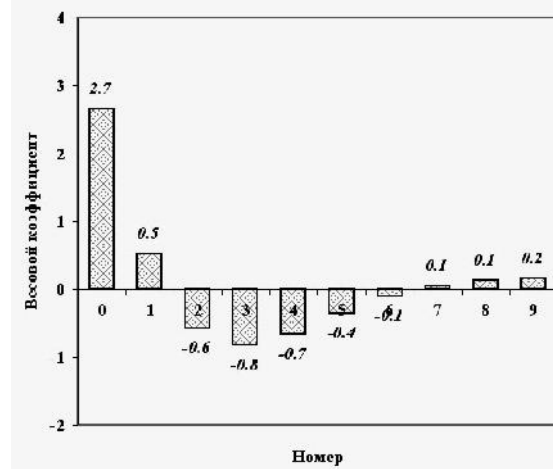


Рис. 2. Весовая функция динамического корректора (массив весовых коэффициентов)

Синтезованный корректор действительно обеспечивает уменьшение инерционности канала измерения (рис. 3). Переходная функция канала измерения (реакция на единичный скачок температуры) с корректором значительно ближе к идеальной. Длительность переходного процесса уменьшилась в три раза.

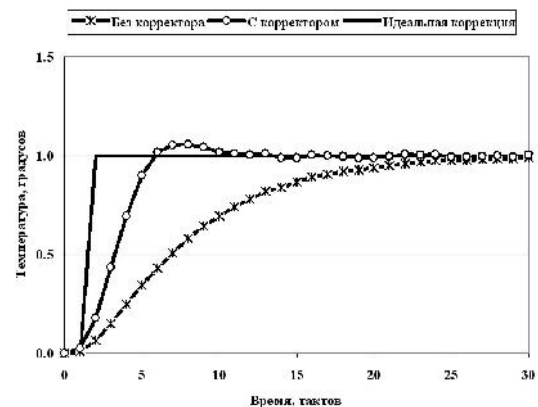


Рис. 3. Переходная функция канала измерения без корректора, с корректором и идеальная

Но эффект уменьшения инерционности достигается ценой увеличения уровня шумов измерения в 3 раза. (Эта величина была принята в качестве ограничения при решении оптимизационной задачи). Эффект усиления шумов четко виден на графике «хвоста» переходной функции в увеличенном масштабе (рис. 4).



Рис. 4. «Хвост» переходной функции канала измерения с корректором и без него

Мерой эффективности динамической коррекции является уменьшение реальной инерционности канала измерения. Это уменьшение можно независимо оценить, например, величиной запаздывания, которое канал измерения вносит в медленно изменяющиеся процессы. В качестве примера можно использовать равномерное увеличение температуры (рис. 5).

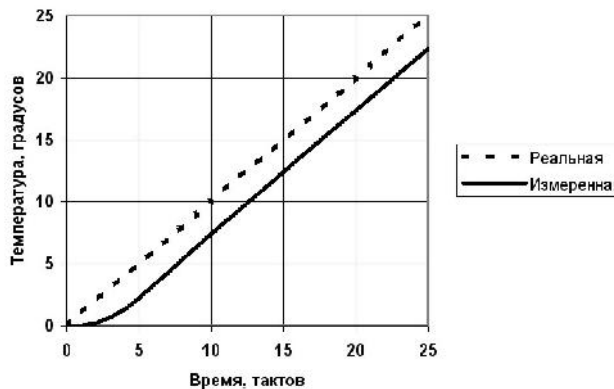


Рис. 5. Реакция канала измерения с корректором на равномерное увеличение температуры

Динамический корректор уменьшает указанное запаздывание с 8 до 2.5 тактов, но за счет увеличения уровня шумов в канале измерения в 3 раза (рис. 6). Принятый вариант является компромиссным. Дальнейшее уменьшение запаздывания неоправданно, так как сопровождается резким увеличением шумов. Полностью устранить запаздывание физически невозможно. Компромиссная зависимость между

запаздыванием в канале измерения и коэффициентом усиления шумов приведена на рис. 6.

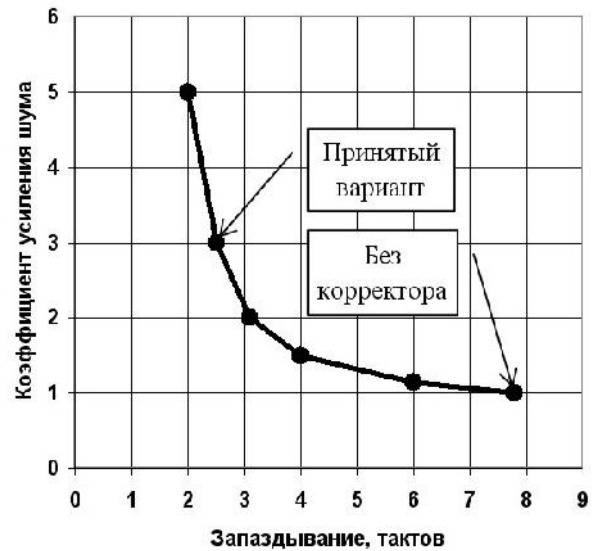


Рис. 6. Компромиссная зависимость между запаздыванием в канале измерения и коэффициентом усиления шумов

Выводы

Динамический корректор позволяет частично компенсировать инерционность датчика и улучшить быстродействие измерительного канала.

Синтез динамического корректора – это результат компромисса между повышением быстродействия и усилением шумов измерения.

Порядок динамического корректора N рекомендуется выбирать в 2 – 3 раза меньше длительности переходного процесса датчика (в тактах).

Список литературы

1. Гольденберг Л.М. и др. *Цифровая обработка сигналов.* – М.: Радио и связь, 1985. – 307с.
2. Гутников В.С. *Фильтрация измерительных сигналов.* – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 189с.

Статья поступила в редколлегию 6.11.2011

Рецензент: М.В Мислович, д-р техн. наук, проф. завідувач науковим відділом Інституту електродинаміки НАН України.