

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ КОЕРЦИТИМЕТРІЇ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ СТАНІВ КОРПУСУ СУДНА

© Завальнюк О.П., 2012

Розглянуто можливість застосування методу коерцитиметрії для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна, який би ураховував невизначеність відносно миттєвого стану корпусу, вплив випадкових факторів, утому і старіння матеріалу суднових конструкцій. Проведено аналіз залежності коерцитивної сили і діючих напружень при статичному розтяганні плоских зразків конструкційних сталей, які найпоширеніші під час будівництва корпусів суден. Наведено результати вимірювання коерцитивної сили матеріалу суднових конструкцій під час експлуатації судна.

Ключові слова: міцність судна, напружено-деформований стан, неруйнівний контроль, метод коерцитиметрії.

In the article possibility of application of coercimetric method is considered for identification of the stress-strained states of hull, which would take into account a uncertainty in relation to the instantaneous state of hull, influence of casual factors, fatigue and senescence of material of ship constructions. The analysis of dependence of coercive force and operating stresses is carried out at static tension of flat standards of construction steels, which are most widespread at the construction of ship's hull. The results of measuring of coercive force of material of ship constructions during maintenance of ship are presented.

Key words: hull strength, stress-strained state, non-destructive control, coercimetric method.

Вступ

Судно – це складна інженерна споруда, яка для виконання свого призначення повинна володіти рядом якостей, зокрема міцністю. Корпус судна працює на межі двох стихій (води і повітря) і зазнає впливу навантажень, значення і напрям дії яких безперервно та випадково змінюються. Зв'язки корпусу, який являє собою складну порожнисту балку, беруть участь одночасно у декількох видах деформацій. З часом міцність зв'язків корпусу змінюється через неминучий знос, корозію, залишкові деформації. Причому ці зміни залежать не тільки від тривалості експлуатації судна, але і від особливостей конструкції корпусу та найбільше від умов експлуатації судна. Все це нерідко призводить до зростання кількості аварій на торговельних суднах, причиною яких у значній кількості випадків є порушення загальної міцності корпусу судна.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Нині почастишали випадки загибелі суден класу «ріка-море», які супроводжуються людськими жертвами та значними матеріальними збитками, а також завдають шкоди навколишньому середовищу. Підтвердженням цьому слугують численні випадки катастроф навалювальних суден (балкерів), що призначені для перевезення грудкових, зернистих і порошковатих вантажів без тари – навалом чи насипом [1].

Дослідження причин аварій навалювальних суден показують [2], що у 70 % випадків їх загибелі загальними були три чинники: судна мали вік не менше за 18 років, перевозили важкі мінеральні вантажі, потрапляла вода у вантажні приміщення під час поганої погоди. Основними причинами, що привели до загибелі суден, були сильна корозія і тріщини в конструкції вантажних

приміщень. Причини, що сприяли пошкодженню корпусу, – перенапруження через некоректне завантаження і фізичні пошкодження бічних конструкцій під час розвантаження.

Ще у 1994 р. з метою зменшення рівня конструктивних пошкоджень балкерів Комітет з безпеки на морі ІМО (International Maritime Organization) рекомендував [3] обладнати судна з повною вантажопідйомністю від 20 тисяч тонн системами моніторингу корпусу. Причому давачі механічних напружень корпусу судна повинні бути встановленими у його середній частині (на мідельшпангоуті) та у місцях, розміщених в $\frac{1}{4}$ довжини судна від носового та кормового перпендикулярів. Однак на сучасному етапі тільки деякі судна мають подібні системи моніторингу технічного стану корпусів.

Методи неруйнівного контролю, основані на вимірюванні коерцитивної сили, дуже поширені у багатьох галузях промисловості [4, 5, 6], бо коерцитивна сила – одна із структурно найчутливіших характеристик феромагнетних матеріалів. Їх відрізняє висока точність і достатня простота, можливість проведення вимірювань на локальних ділянках контрольованих об'єктів, висока чутливість до фазових перетворень, слабка залежність від геометричних розмірів об'єкта контролю тощо.

Для контролю та ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна під час його експлуатації можна використовувати метод неруйнівного контролю з вимірюванням коерцитивної сили матеріалу несних суднових конструкцій, якими є горизонтальний киль, ширстречний стрингер, горизонтальна частина комінгсу люків.

Мета дослідження – аналізування можливості застосування методу коерцитиметрії для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна, який би урахував невизначеність відносно миттєвого стану корпусу, вплив випадкових факторів, утому і старіння матеріалу суднових конструкцій.

Результати досліджень

У суднобудуванні та судноремонті неруйнівний контроль застосовується досить тривалий час і слугує для виявлення мікроскопічних поверхневих, підповерхневих і внутрішніх дефектів без руйнування конструкцій чи деталей та за цією ознакою належить до методів дефектоскопії. Серед великого розмаїття методів неруйнівного контролю використовують капілярні, магнетні, вихорострумові, ультразвукові, рентгенівські та гамма-ізотопні. Однак застосування методів неруйнівного контролю для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна під час його експлуатації у реальному часі поки що не набуло великого поширення.

Одним з методів неруйнівного контролю, що дозволяє визначати напружені ділянки, є метод коерцитиметрії, оснований на кореляції між магнетними характеристиками і структурно-фазовим станом та характеристиками міцності сталей. Як параметр неруйнівного контролю механічних властивостей сталі, зокрема, використовується коерцитивна сила [4].

Коерцитивною силою називається напруженість зовнішнього магнетного поля, за якої намагнеченість у матеріалі, попередньо намагнеченому до насичення, дорівнює нулю. Вона визначається середньою величиною сил, що затримують необоротне зміщення границь між доменами (окремими мікрообластями феромагнетного матеріалу) при перемагнечуванні.

У загальному випадку можна сказати, що коерцитивна сила феромагнетиків (сталі) визначається усією сукупністю різних факторів [7]: величиною магнетної анізотропії (K_1), магнетострикцією (I_s), внутрішніми і зовнішніми механічними напруженнями (s), мірою насичення (J_s), факторами розмагнечування та граничними шарами між доменами (a, b, c):

$$H_c \approx f \left(a \frac{K_1}{J_s} + b \frac{I_s s}{J_s} + c J_s \right). \quad (1)$$

Основою контролю механічних напружень, що діють у сталевих конструкціях, за значеннями коерцитивної сили є магнетострикційний зв'язок між прикладеними напруженнями та зміщенням доменних границь [4].

Єдність природи намагнечування металу, пружно-пластичної деформації, накопичення пошкоджень і росту коерцитивної сили яскраво відображує моделювання процесу навантаження на зразках металу під час експлуатації в умовах складнонапруженого стану [6]. На рис. 1 наведено залежності коерцитивної сили H_c і діючих напружень σ при статичному розтяганні плоских зразків конструкційних сталей Ст3, Ст20, 09Г2С, які найпоширеніші під час будування корпусів суден. Під час безперервного розтягання стандартних зразків завтовшки 5–10 мм у пружній області кривої навантаження коерцитивна сила збільшується пропорційно до прикладеного напруження до величини $H_{c.m}$, що відповідає межі течкості s_m . В області течкості і знеміцнювання металу починається необоротна перебудова доменної структури за рахунок 90- і 180-градусних доменних границь.

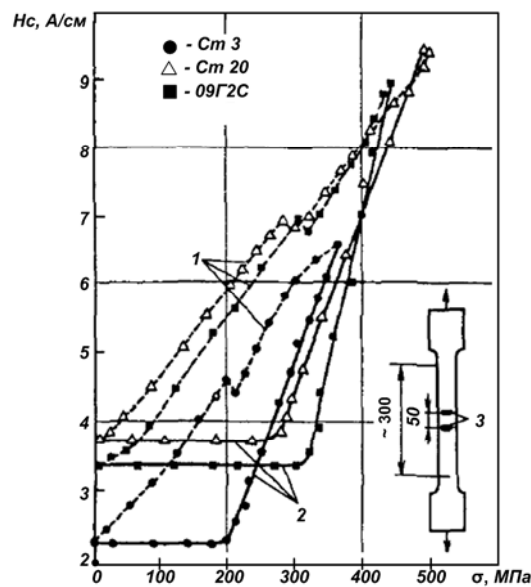


Рис. 1. Залежність коерцитивної сили і діючих напружень при випробовуванні зразків на розтягання: 1 – під навантаженням; 2 – після розвантаження; 3 – полюсні наконечники коерцитиметра

У разі підвищення навантаження в області необоротних деформацій зростання коерцитивної сили триває одночасно з формуванням нової доменної структури та активним нагромадженням пошкоджень у металі. Зміцнення металу на стадії передруйнування викликає остаточну перебудову доменної структури, зростання коерцитивної сили до максимальних значень (залежно від марки сталі) та супроводжується появою крихких мікротріщин на стиках і границях зерен. Після утворення і розкриття магістральної тріщини відбувається часткове зняття напружень у зоні розвитку тріщини і зниження коерцитивної сили. Максимальне значення $H_{c.ε}$ відповідає межі міцності металу $s_ε$. У разі ступінчастого навантаження та вимірювання коерцитивної сили після розвантаження зразка, коли магнітний параметр реагує тільки на залишкові (внутрішні) напруження і деформації, у пружній області коерцитивна сила залишається постійною, дорівнює вихідній, а після досягнення межі течкості вона зростає за лінійним законом. При цьому енергія, що витрачається на роботу руйнування металу, і максимальні значення коерцитивної сили в обох випадках практично однакові.

Отже, енергетична теорія руйнування дає змогу визначити базові параметри для контролю за станом металу магнетним методом за величиною коерцитивної сили (к.с.), а саме: H_{c0} – вихідне значення коерцитивної сили (у первинному ненапруженому стані значення коерцитивної сили є найменшим для кожної марки сталі); $H_{c.m}$ – відповідає рівню внутрішніх напружень, що дорівнюють межі течкості сталі s_m ; $H_{c.ε}$ – відповідає досягненню межі міцності сталі $s_ε$. У таблиці наведено механічні характеристики і відповідні їм значення коерцитивної сили для декількох конструкційних сталей (Ст 3, Ст 20, 09Г2С).

Механічні характеристики і коерцитивна сила конструкційних сталей

Марка сталі	Механічні властивості			Коерцитивна сила			
	Межа міцності s_b , МПа	Умовна межа течкості $s_{0.2}$, МПа	Відносне подовження d , %	Вихідне значення H_{c0}	Межі течкості $H_{c.m}$	Межі міцності $H_{c.b}$	Втомного стану $H_{c.yt}$
Ст 3	350	210	22	2.5	5.0	6.0	5.8
Ст 20	420	260	24	4.5	10.5	13.5	13.0
09Г2С	450	310	20	4.0	7.8	9.5	9.5

Треба також враховувати [8], що межі течкості й міцності та відповідні їм значення коерцитивної сили для матеріалу зварених конструкцій під дією навантажень дещо вищі, ніж для матеріалу плоских зразків.

Важливо для методу коерцитиметрії, що для кожної марки сталі існують свої величини коерцитивної сили у первинному ненапруженому стані H_{c0} , і в стані, еквівалентному напруженням на межі міцності $H_{c.b}$. Різниця $\Delta H_c = H_{c.b} - H_{c0}$ характеризує потенційний експлуатаційний ресурс металу. Залежно від поєднання експлуатаційних факторів та інтенсивності навантажень судна його ресурс може витрачатися з різною швидкістю. Тому цей процес можливо контролювати, вимірюючи величину коерцитивної сили металу, особливо у характерних зонах концентрації механічних напружень судових корпусних конструкцій.

З метою перевірки застосування методу коерцитиметрії для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна здійснено експериментальні вимірювання коерцитивної сили матеріалу несних судових конструкцій (конструкційна сталь Ст 3) з використанням коерцитиметра КРМ-Ц-К2М (структуроскопа) на теплоході «Сибирский-2101».

Принцип роботи структуроскопа [6] оснований на обчисленні коерцитивної сили за вимірюваним струмом компенсації залишкової магнетної індукції у замкнутому магнетному колі магнетопроводу і контрольованої конструкції чи стандартного зразка (під час калібрування).

У цикл вимірювання входять:

- магнетна підготовка тривалістю до 3 с;
- компенсація залишкової намагненості тривалістю до 3 с;
- обчислення коерцитивної сили тривалістю до 2 с;
- індикація та сигналізація результатів вимірювання.

У процесі магнетної підготовки область досліджуваної конструкції між полюсними наконечниками магнетної системи перетворювача (рис. 2) періодично намагнетчується до насичення імпульсами струму з амплітудою не менше ніж 3 А.

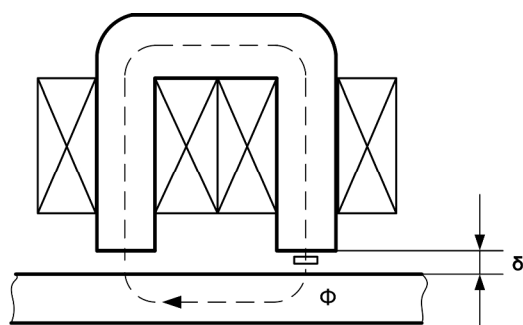


Рис. 2. Перетворювач коерцитиметра (Φ – магнетний потік; $\delta=1,5$ мм – проміжок)

Далі здійснюють автоматичну компенсацію поля залишкової намагненості, щоб звести її до 0. Контроль залишкової намагненості здійснює вбудований у магнетопровід перетворювач Холла. За величиною струму компенсації обчислюється коерцитивна сила.

Блок-схему приладу КРМ-Ц-К2М наведено на рис. 3. Перетворювач структуроскопа являє собою магнетну систему, яка замикається контрольною феромагнетною конструкцією. П-подібний магнетопровід виконано з магнетом'якого пластинчастого матеріалу. На магнетопроводі розташовані котушки для намагнетчування контрольованої конструкції і компенсації поля залишкової індукції. Нуль-індикатором індукції магнетного поля вибрано перетворювач Холла, який розміщено у проміжку магнетопроводу.

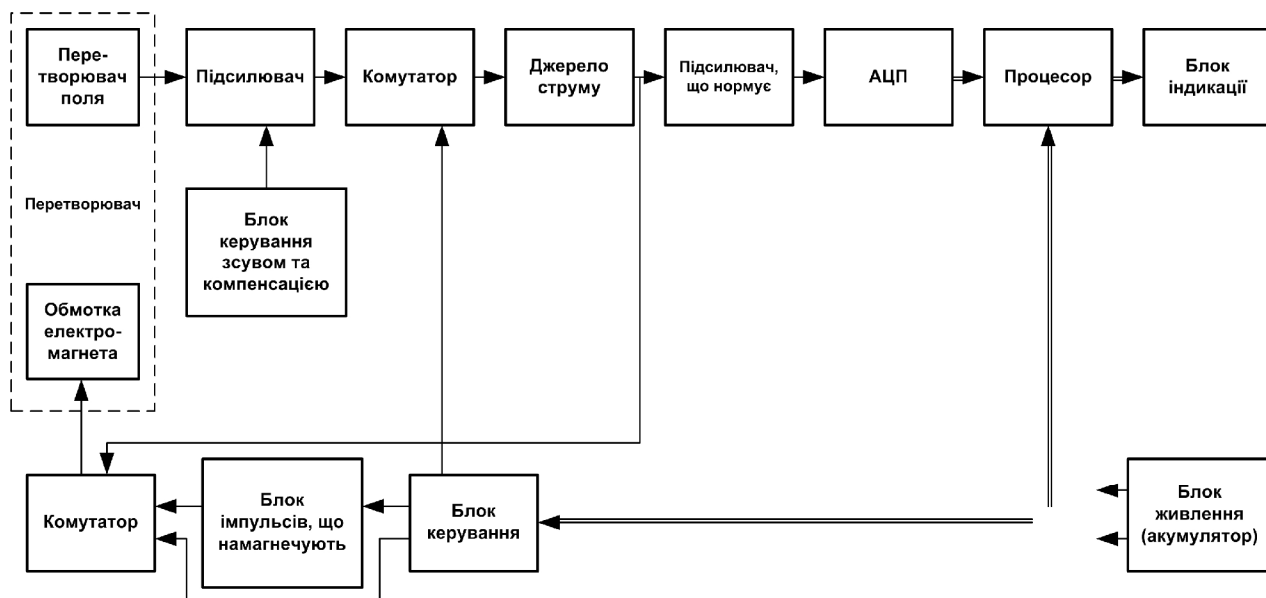


Рис. 3. Блок-схема приладу КРМ-Ц-К2М

Експериментальні дослідження на теплоході «Сибирский-2101» виконано під час ремонту судна та після ремонту під час вантажних операцій. Під час експерименту відбувалося вимірювання коерцитивної сили матеріалу комінгсу люка – верхньої площини балки.

Аналізуючи отримані результати вимірів під час ремонту судна, встановлено, що:

1. Утомні явища коерцитиметром простежуються на всій довжині судна на обох бортах.
2. Області максимальних значень коерцитивної сили дещо зміщені в ніс від міделя (135 шпангоут), а також збігаються з районами $\frac{1}{4}$ довжини судна від носового і кормового перпендикулярів.
3. Криві результатів вимірювань стану подовжніх елементів набору корпусу (комінгсів) теплоходу «Сибирский-2101» показують, що місця підвищеного зносу корпусу майже збігаються з місцями, рекомендованими ІМО для встановлення давачів механічних напружень.

Вимірювання під час вантажних операцій виконувалися на кожному етапі завантаження судна:

- 1 етап – прихід судна в баласті на термінал завантаження зернових (рис. 4, а);
- 2 етап – завантаження трюму № 4 (437 т) і частково трюму № 3 (150 т) (рис. 4, б);
- 3 етап – завантаження трюмів № 4 (437 т) і №3 (460 т) (рис. 4, в);
- 4 етап – повне завантаження всіх чотирьох трюмів: № 1 (455 т), № 2 (457 т), № 3 (460 т), № 4 (437 т) (рис. 4, г).

Результати вимірювань коерцитивної сили (поперечні складові) комінгсів лівого борту на теплоході «Сибирский-2101» під час завантаження подано на рис. 5.

Візуальний огляд, проведений на теплоході «Сибирский-2101», підтвердив наявність дефектів у судових конструкціях, виявивши, зокрема, деформацію стояків фальшборту в області з'єднання їх з головною палубою в районі 135 шпангоута правого і лівого бортів; розрив вертикальної стінки комінгса люка в районі 100-110 шпангоутів правого борту; розриви настилу головної палуби в районі 110 шпангоута правого борту, що зумовлює напруженість цих ділянок.

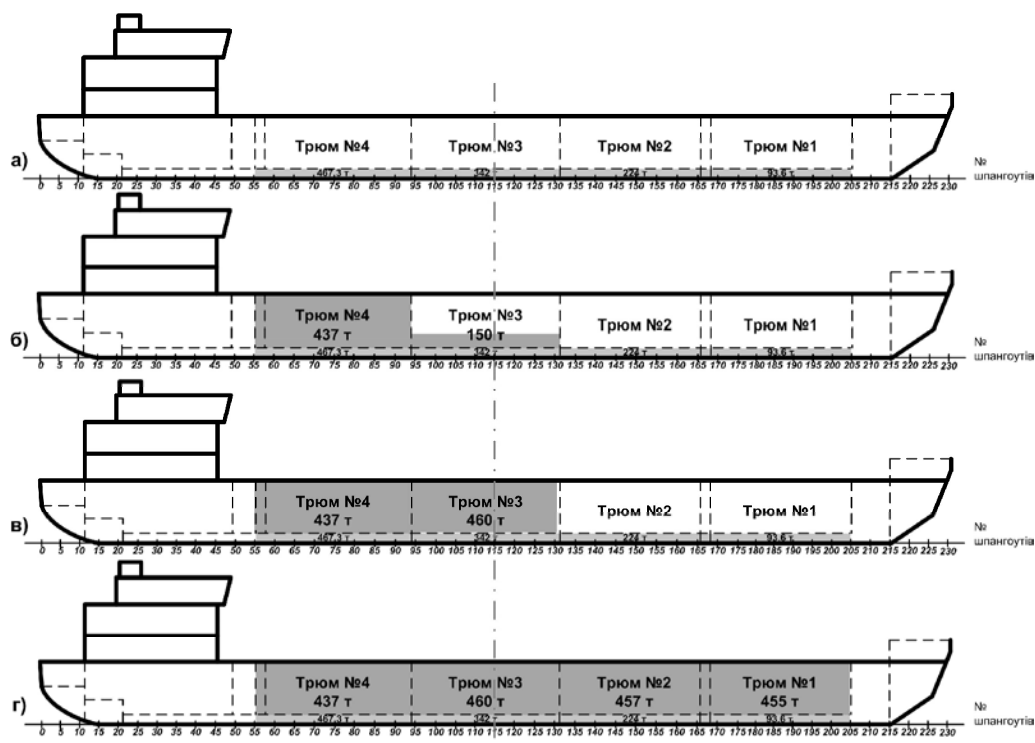


Рис. 4. Схеми завантаження теплоходу «Сибирский-2101» при вимірюваннях:
а – 1 етап; б – 2 етап; в – 3 етап; г – 4 етап

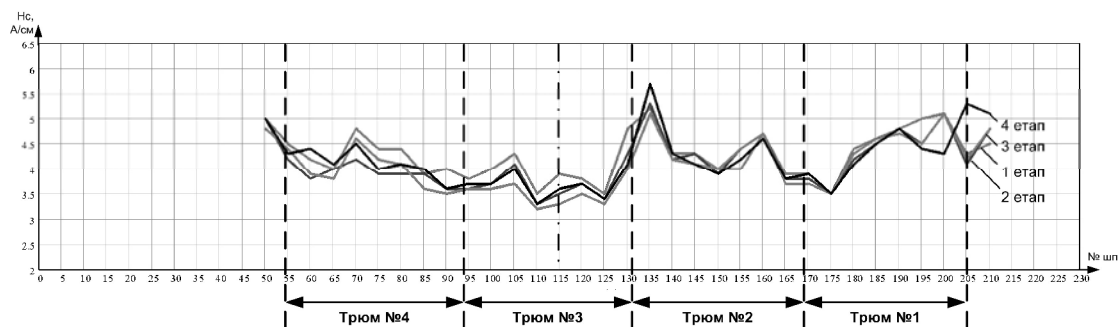


Рис. 5. Результати вимірювань коерцитивної сили (поперечні складові) комінгсів лівого борту
на теплоході «Сибирский-2101» під час завантаження

Результати вимірювань коерцитивної сили на досліджуваному судні під час ремонту та експлуатації, а також їх порівняння з підсумками візуального огляду свідчать про можливість застосування методу коерцитиметрії для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна, який ураховує невизначеність відносно миттєвого стану корпусу, вплив випадкових факторів, утому і старіння матеріалу суднових конструкцій.

Висновки

Для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна можна застосовувати метод неруйнівного контролю з вимірюванням коерцитивної сили, який дає змогу отримати кількісну оцінку щодо напружено-деформованих станів та утому металу корпусу за всією довжиною судна.

Необхідно продовжити експериментальні дослідження щодо вимірювання коерцитивної сили матеріалу корпусних конструкцій на судах різних типів та віку на тихій воді, в умовах хвилювання, під час вантажних і баластних операцій, у стані ремонту тощо з метою порівняння отриманих результатів експерименту з побудованою надалі математичною моделлю процесу завантаження-розвантаження (баластування-дебаластування) судна.

Грунтуючись на отриманих результатах вимірювань, а також на адекватній математичній моделі, доцільно створити систему моніторингу загальної міцності судна під час його експлуатації. Здобуті експериментальні дані дають змогу визначити оптимальну схему розташування давачів по корпусу

судна та періодичність їх опитування у розроблюваній системі моніторингу, яка допоможе запобігти аваріям, пов'язаним із втратою міцності корпусу через перевищення допустимих навантажень.

1. Офіційний сайт Російського морського реєстра судноплавства // XII семінар Російського морського реєстра судодводства «Качественное судодводство: стандарт XXI века. Безопасность и защита морской среды: грядущие перемены» (Санкт-Петербург, октябрь–2009). – Режим доступу до сайту: <http://www.rs-head.spb.ru/>. 2. Офіційний сайт Міжнародної асоціації власників суховантажних суден (INTERCARGO). *Casualty Report 2009*. – Режим доступу до сайту: <http://www.intercargo.org/>. 3. Офіційний сайт Міжнародної морської організації. *MSC/Circ.646. Recommendations for the fitting of Hull Stress Monitoring Systems, 06.06.1994*. – Режим доступу до сайту: <http://www.imo.org/>. 4. Матюк В.Ф. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии / В.Ф.Матюк, В.Н. Кулагин // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – Минск, 2010. – № 3. – С. 4–13. 5. Безлюдько Г.Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом / Г.Я. Безлюдько // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – К., 2003. – № 2. – С. 20–26. 6. Попов Б.Е. Магнитная диагностика и остаточный ресурс подъемных сооружений / Б.Е. Попов, В.С. Котельников, А.В. Зарудный, Е.А. Левин, Г.Я. Безлюдько // *Безопасность труда в промышленности*. – Москва, 2001. – № 2. – С. 44–49. 7. Гаврилов А.Н., Чижиков В.Ю. *Технология магнитных элементов для приборов, средств автоматики и вычислительной техники*. – М: Энергия, 1974. – 232 с. 8. Головешкин Ю.В. *Третья проблема строительной механики корабля (нормирование прочности)* / Ю.В. Головешкин, Н.И. Тузлукова. – СПб.: Судостроение, 1999. – 154 с.

УДК 681.516.52:664.123.4

Н.М. Луцька, Н.А. Засць

Національний університет харчових технологій

СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОЛОННОЮ ДИФУЗІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ В УМОВАХ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

© Луцька Н.М., 2012

Розглянуто теплообмінну частину колонної дифузійної установки цукрового виробництва, математична модель якої має 10 координат стану та 4 управління. Синтезований модальний багатовимірний регулятор за координатами стану та за допомогою теорії ймовірності досліджено вплив параметричної невизначеності об'єкта на якість та стійкість перехідних процесів.

Ключові слова: колонна дифузійна установка, модальний регулятор, робастна стійкість, невизначеність, температура.

We consider the heat exchange portion diffusion column settings sugar production, a mathematical model which has 10 coordinates state and 4 controls. Synthesized multi-modal regulator of the coordinates and using probability theory the influence of parametric uncertainty of the object on the quality and stability of transients.

Key words: columnar diffusion plant, modal control, robust stability, uncertainty, temperature.

Вступ

Процес дифузії в цукровому виробництві є одним з найважливіших технологічних процесів, в результаті якого відбуваються якісні зміни вихідної сировини з деякими втратами цукру у відходах,