

**О.М.ПУПЕНА,**

**І.В.ЕЛЬПЕРІН,** кандидат технічних наук

Національний університет харчових технологій

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ**

*Наведені можливі шляхи вдосконалення існуючих автоматизованих систем управління БРУ, зокрема контурів управління епюраційною колоною, для забезпечення стабільно високої якості спирту при змінній якості бражки. Запропонований новий принцип управління епюраційною колоною, який базується безпосередньо на підтримці показників якості епюрату.*

**Ключові слова:** епюраційна колона, домішки, епюрат, головна фракція, модель UNIFAC (Дортмунд), підсистема адаптації.

*Представлены возможные пути усовершенствования существующих автоматизированных систем управления БРУ, в частности контуров управления епюрационной колонной, для обеспечения стабильно высокого качества спирта при изменении качества бражки. Предложен новый принцип управления епюрационной колонной, базирующийся непосредственно на поддержке показателей качества епюрата.*

**Ключевые слова:** епюрационная колона, примеси, епюрат, головная фракция, модель UNIFAC (Дортмунд), подсистема адаптации.

---

©О.М.Пупена, І.В.Ельперін, 2007

### **Актуальні проблеми в спиртовому виробництві.**

Основною проблемою сучасного спиртового виробництва є отримання харчового спирту *стабільно високої якості* за умови мінімально можливої собівартості кінцевого продукту. Шляхи вирішення цієї проблеми шукають, насамперед, в реконструкції брагоректифікаційної установки (БРУ) або зміни технологічних режимів,

які, як правило, супроводжуються збільшенням енерговитрат, тобто витрат пари на декалітр спирту. В умовах прогресуючого зростання цін на енергоносії, це призводить до суттєвого збільшення собівартості ректифікованого спирту, а економія палива стає ще більш актуальною.

При цьому існує досить потужний резерв вирішення поставленої проблеми – це вдосконалення систем автоматизованого управління БРУ, алгоритми та структура яких протягом тривалого часу практично не змінилися. Вони виконують функції стабілізації технологічних параметрів (в основному температури і тиску в різних точках БРУ), значення яких регламентуються. Широке використання в сучасних системах автоматизації мікропроцесорної техніки і програмно-технічних комплексів створило умови для вдосконалення існуючих систем автоматизації спиртового виробництва.

*Основною задачею модернізації систем управління БРУ є впровадження нових алгоритмів управління, які б дозволили не тільки підтримувати регламентовані значення технологічних параметрів, а й знаходити оптимальні режими її роботи.*

Розглянемо основні підходи, які можуть бути покладені в основу модернізації існуючих систем автоматизації на прикладі епюраційної колони. Для початку необхідно визначити умови нормального функціонування роботи епюраційної колони та забезпечення цих умов типовими контурами автоматизованого управління колони.

**Визначення технологічних режимів роботи епюраційної колони.** Епюраційна колона (ЕК) повинна забезпечити вилучення всіх головних та верхніх проміжних домішок, щоб їх концентрація в епюраті не перевищувала мінімальної:

$$x_{EIIi} \leq x_{EIIi}^{здн}, \forall i \in E, \quad (1)$$

де  $x_{EIIi}$  - концентрація і-ї домішки в епюраті;

$x_{EIIi}^{здн}$  - задана допустима концентрація і-ї домішки в епюраті;

$E$  - множина ключових для домішок ЕК .

Задача відгінної частини – випаровування домішок, а концентраційної – максимальна їх концентрація, з подальшим вилученням з головною фракцією (ГФ). Для управління роботою колони використовують такі канали управління:

- подача пари - степінь випаровування домішки;
- відбір ГФ (витрата води на дефлегматор) – степінь вилучення домішок з колони в ГФ;
- витрата води на гідроселекцію - степінь вилучення домішок з колони в ГФ.

Вплив на роботу колони наведених управляючих дій описав П.С.Циганков в своїй роботі [1]. Наведемо декілька основних моментів.

Пар в колону необхідно подавати з розрахунку вилучення всіх домішок до її припустимої концентрації в епюраті. На степінь вилучення кожної з домішок впливає міцність бражного дистилляту, коефіцієнт випаровування та кількісний склад цієї домішки, а також конструктивні особливості колони. Коефіцієнт випаровування кожної домішки в свою чергу залежить від концентрації етанолу в суміші на тарілці. Таким чином для управління витратою пари з метою забезпечення умови (1) необхідно:

1. визначити розподіл етанолу по висоті колони для даної витрати пари, витрати та міцності епюрату;
2. визначити коефіцієнти випаровування кожної домішки по висоті відгінної частини колони;
3. визначити розподіл домішок по висоті колони;
4. Збільшити витрату пари у разі невиконання умови (1).

Такий порядок розрахунку справедливий за умови, що в концентраційній частині колони домішки, що випаровуються концентруються і практично повністю виводяться з ГФ. Для забезпечення такого режиму необхідно відбирати верхній продукт в кількості не менше

за необхідну. З іншого боку, при відборі головної фракції більше за необхідний мінімум - збільшуються втрати спирту. Очевидно кількість ГФ, яку необхідно відібрати, визначається з балансу колони по кожній домішці:

$$F_{ГФ} \cdot x_{ГФi} = F_{БД} \cdot x_{БДi} - F_{ЕП} \cdot x_{ЕПi}^{здн}, \forall i \in E, \quad (2)$$

де  $F_{ГФ}, F_{БД}, F_{ЕП}$  - витрати відповідно головної фракції, бражного дистиляту та епюрату;

$x_{ГФi}, x_{БДi}, x_{ЕПi}^{здн}$  - концентрації і-ї домішки відповідно у головній фракції, бражному дистиляті та задана (допустима) концентрація в епюраті.

Тобто величина відбору головної фракції – це максимальне значення відбору, серед визначених по балансовому відношенню за умовою (2) для кожної з ключових домішок.

Зміною подачі води на гідроселекцію (при наявності такої) можна досягнути необхідної ступені концентрації домішок по колоні для їх максимального вилучення і концентрації. Управління водою ведеться в залежності від конструктивних особливостей установки. В будь якому випадку її підбирають так, щоб максимізувати концентрацію домішок на верхній тарілці колони, тим самим мінімізувати необхідну кількість відбору ГФ.

**Аналіз типових схем автоматизованого управління епюраційною колоною.** На рис.1 представлена типова схема управління епюраційною колоною з використанням в якості вимірювальних сигналів непрямих показників процесу епюрації – температур та тисків у верхній та нижній частині колони. Стабілізацією тиску у нижній частині колони досягають необхідного парового потоку в колоні, а тиску у верхній частині колони (або температури води з дефлегматора) – стабільної роботи дефлегматора і конденсатора. При необхідності зміни витрати пари, оператор корегує заданий тиск у нижній

частині колони, а для відбору головної фракції – заданий тиск у її верхній частині.

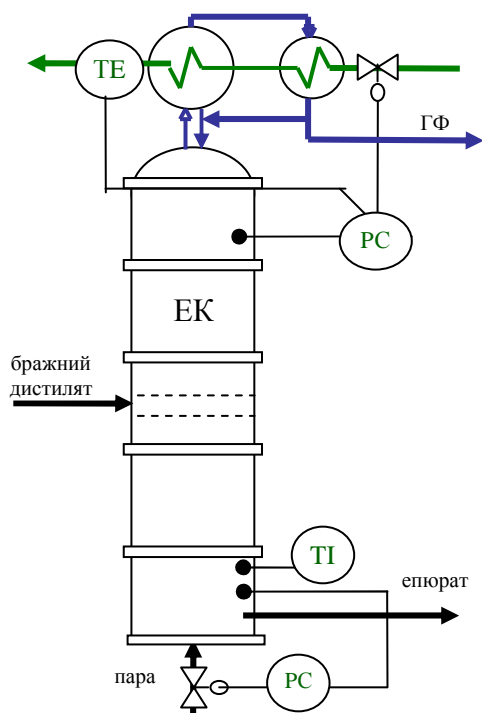


Рис.1. Типова схема управління епюраційною колоною

З точки зору динамічних характеристик описані контури мало інерційні [2], тому забезпечують систему якісними перехідними процесами. Однак, така система не реагує на зміну якості бражного дистиляту і, відповідно, не може забезпечити необхідну якість очищення епюрату. Крім того, оператор не має чітко визначеної інформації про розподіл домішок в колоні та в продуктах.

Для покращення процесу регулювання, на деяких вітчизняних підприємствах стабілізують витрату

головної фракції корегуючим сигналом на завдання регулятора тиску, а також зміною витрати води на гідроселекцію. Тим не менше, завдання цим регуляторам оператор виставляє інтуїтивно, на основі даних лабораторії та власного досвіду.

В своїй роботі [2] М.Л. Мандельштейн запропонував схему з використанням автоматичного хроматографа, який повинен вимірювати концентрацію однієї ключової домішки в контрольній зоні колони. Тобто управління пропонується проводити безпосередньо по якісним показникам. Однак автор відмічає, що недоліком системи є інерційність каналу, вибірковість домішки, складність та велика вартість автоматичних хроматографів. Для управління витратою охолоджувальної води на дефлегматор та конденсатор в цій же роботі пропонується варіант з використанням витратоміра на конденсаті

головної фракції. Цей підхід дозволяє регулювати кількість відбору з епюраційної колони верхнього продукту разом з домішками.

З точки зору статички – існуючі системи автоматизації стабілізують заданий режим роботи колони як по паровим і рідинним потокам, так і по міцності епюрату. Однак вони не можуть забезпечити якість епюрату, тобто виконання умови (1), при суттєвій зміні якості бражного дистилляту. На сьогоднішній день функція корегування завдання регуляторам лежить на операторі, який слідкує за роботою установки і аналізує результати лабораторних аналізів продуктів. Із-за недостатньої кількості інформації про якісні показники продуктів в колоні, навіть досвідчений оператор не в змозі забезпечити підтримку стабільно високої якості епюрату. З іншого боку динамічні характеристики наведених каналів управління дозволяють з задовільною якістю компенсувати ряд збурень.

**Можливі шляхи вирішення задачі забезпечення стабільної якості епюрату.** Для забезпечення умови (1) необхідно змінити цільові функції контурів управління колоною, а саме:

1. управляти подачею пари для забезпечення умови (1);
2. управляти витратою головної фракції для забезпечення умови:

$$\begin{cases} F_{ГФ} \cdot x_{ГФi} \geq F_{БД} \cdot x_{БДi} - F_{ЕП} \cdot x_{ЕПi}^{здн}, \forall i \in E \\ F_{ГФ} \cdot x_{ГФет} \longrightarrow \min \end{cases}, \quad (3)$$

де  $x_{ГФет}$  - концентрація етанолу в головній фракції;

3. управляти витратою води на гідроселекцію для забезпечення умови (3).

Оскільки класичні підходи до управління ЕК як правило задовільні по динамічним показникам, то очевидно, що їх варто використати в складі каскадних систем або в складі систем з підсистемою підтримки прийняття рішень, де завдання (рекомендації) для існуючих регуляторів будуть формувати алгоритми на основі наведених цільових функцій.

Для побудови такої системи необхідними умовами є визначення витрат та якісних показників вхідних і вихідних продуктів та розподіл домішок по висоті колони. Альтернативою отримання інформації за допомогою пристроїв для якісного аналізу домішок можуть бути аналітичні залежності, побудовані на основі моделювання фазової рівноваги по трьохкомпонентній суміші (етиловий спирт–вода-домішка), якісного складу та витрат матеріальних потоків по колоні.

Таким чином, для реалізації автоматизованої системи управління з адаптацією до зміни якості бражного дистиляту необхідно вирішити наступні задачі:

1. розробити та реалізувати математичну модель ЕК для отримання статичних та динамічних характеристик ЕК і використання її в якості еталонної моделі для визначення параметрів стану ЕК;
2. розробити алгоритми управління якістю епюрату на основі еталонної моделі;
3. розробити структуру нової системи управління ЕК і вибрати шляхи її реалізації.

**Розробка та реалізація математичної моделі ЕК.** На основі аналізу відомих методів та алгоритмів моделювання ректифікаційних колон, розроблені статичні та динамічні моделі типової епюраційної колони, які:

1. базуються на рівняннях матеріальних балансів;
2. використовують коміркову модель об'єкту, де тарілка – окрема ступінь досягнення фазової рівноваги;
3. враховують кінетику процесу по рівняннях фазової рівноваги з урахуванням ККД тарілки;
4. використовують розрахунок фазової рівноваги;
  - для статичної моделі – на основі модифікованого методу UNIFAC (Дортмунд) та віріального рівняння стану;

- для динамічної моделі – на основі апроксимаційних залежностей;
5. розроблені з припущенням, що розділювальна суміш – трикомпонентна;
6. вирішені з використанням:
- по етанолу – методу розрахунку від тарілки до тарілки;
  - по домішкам – принципу пропорційності.

Окремої уваги для моделювання коефіцієнтів активності компонентів в рідинній фазі при розрахунку фазової рівноваги заслуговує використання модифікованого методу UNIFAC (Дортмунд). Цей метод дозволяє з задовільною точністю розраховувати коефіцієнти активності для компонентів з дуже малою концентрацією (нескінченне розбавлення). Використання методу досліджене та описане в роботі [3].

**Розробка математичного та алгоритмічного забезпечення.** За допомогою створених моделей авторами досліджені статичні та динамічні характеристики типових ЕК по типовим ключовим домішкам. На основі їх аналізу розроблені алгоритми та структура основних контурів управління.

1. Контур управління витратою пари забезпечує виконання умови:

$$\begin{cases} x_{EПi}(F_{пару}) \leq x_{EПi}^{здн}, \forall i \in E \\ x_{EПi}(F_{пару}) = x_{EПi}^{здн}, \exists i \in E \\ P_{\min} \leq P_{низ}^{ЕК} < P_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

де  $P_{низ}^{ЕК}$ ,  $P_{\min}$ ,  $P_{\max}$  - відповідно плинний, мінімально та максимально припустимі тиски у нижній частині епюраційної колони. Із умови (4) визначено, що необхідною витратою пари повинна бути:

$$F_{пару} = \max(F_{пару_i}) \quad (5)$$

де  $F_{пару_i}$  - розрахована мінімальна витрата пари для забезпечення умови (1) для і-ї домішки.



Контур управління має каскадну структуру (рис.2), в якій головний регулятор забезпечує регулювання співвідношення витрат з коефіцієнтом:

$$K_{Fn} = \frac{F_{БД} + F_{ГВ}}{F_{пару}} \quad (6)$$

Вихід головного регулятора корегує завдання регулятора тиску у нижній частині колони. Розроблений алгоритм визначення  $K_{Fn}$  з використанням еталонної моделі статики.

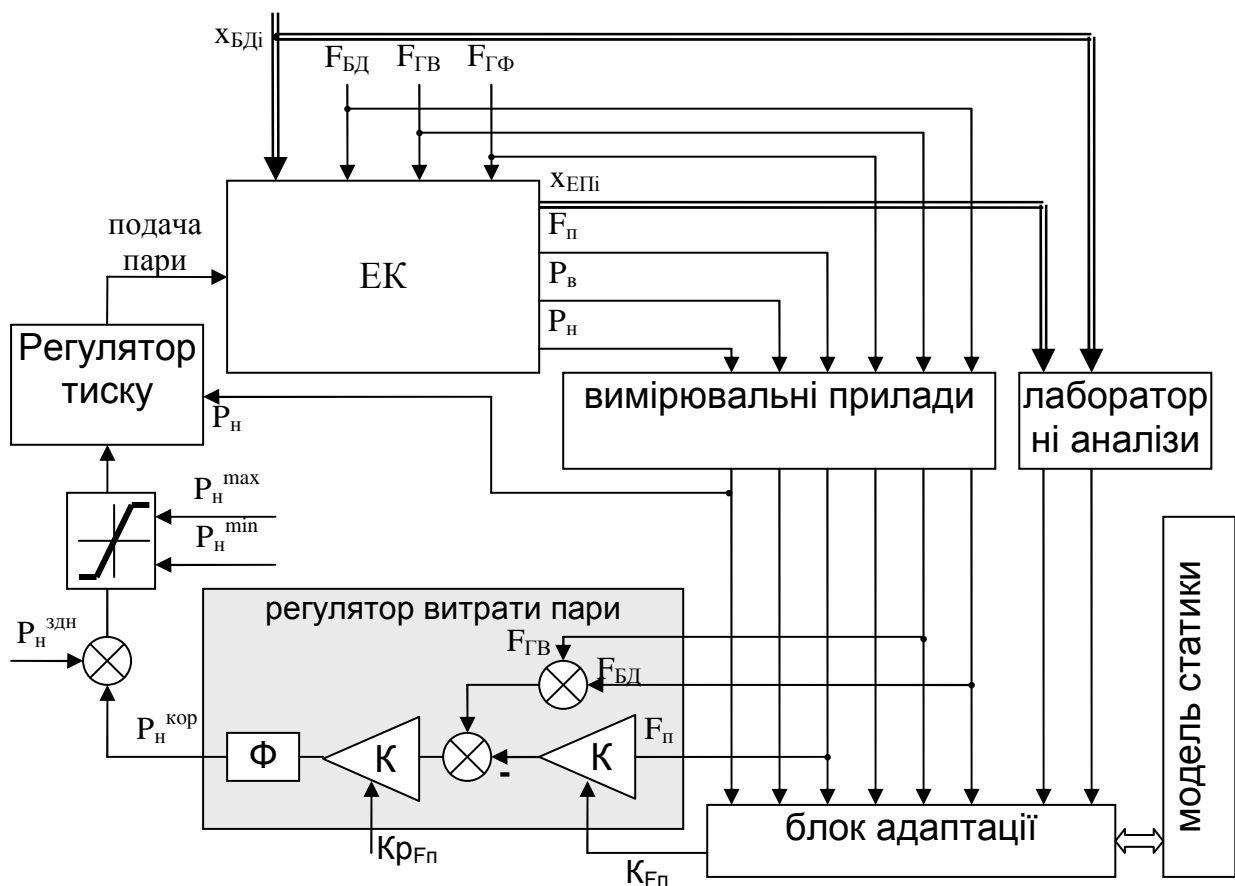


Рис. 2. Схема контуру управління подачею пари.

2. Контур управління витратою ГФ забезпечує виконання умови:

$$\begin{cases} F_{ГФ} \geq \frac{F_{БД} \cdot x_{БДi}}{x_{ГФi}}, \forall i \in E \\ F_{ГФ} = \frac{F_{БД} \cdot x_{БДi}}{x_{ГФi}}, \exists i \in E \end{cases} \quad (7)$$

Контур управління має каскадну структуру (рис.3), в якій головний регулятор забезпечує регулювання співвідношення витрат з коефіцієнтом:

$$K_{F_{ГФ}} = \max \left( \frac{F_{БДi}}{F_{ГФi}} \right), i \in E \quad . \quad (8)$$

Вихід головного регулятора корегує завдання регулятора тиску у верхній частині колони витратою води на дефлегматор-конденсатор. Розроблений алгоритм визначення  $K_{F_{ГФ}}$  з використанням еталонної моделі статики.

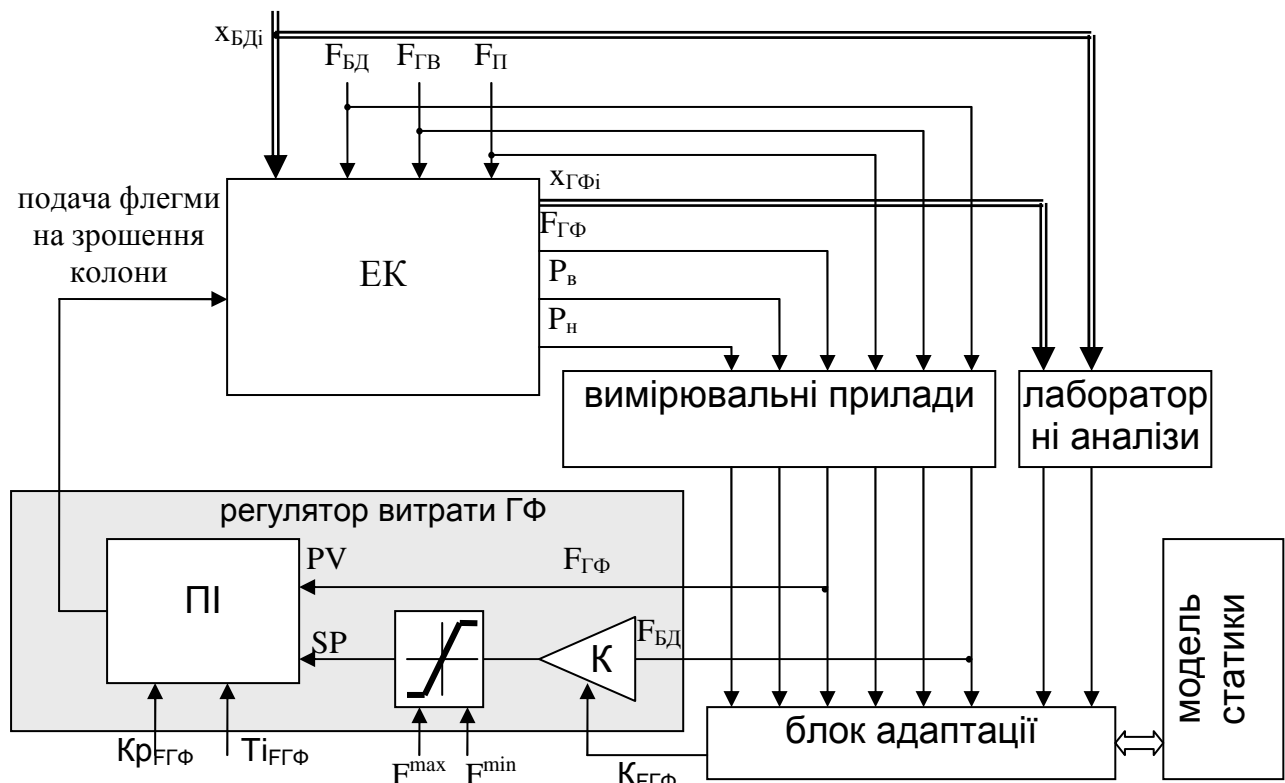


Рис. 3. Схема контуру управління витратою ГФ в каскаді з регулятором тиску верху колони.

### Розробка структури системи управління та шляхи її реалізації.

На основі розроблених алгоритмів та з урахуванням вимог до сучасних автоматизованих систем управління [4], зокрема врахування можливості поетапного впровадження та поступового нарощення системи, запропонована функціональна структура системи (рис.4) та шляхи її реалізації.

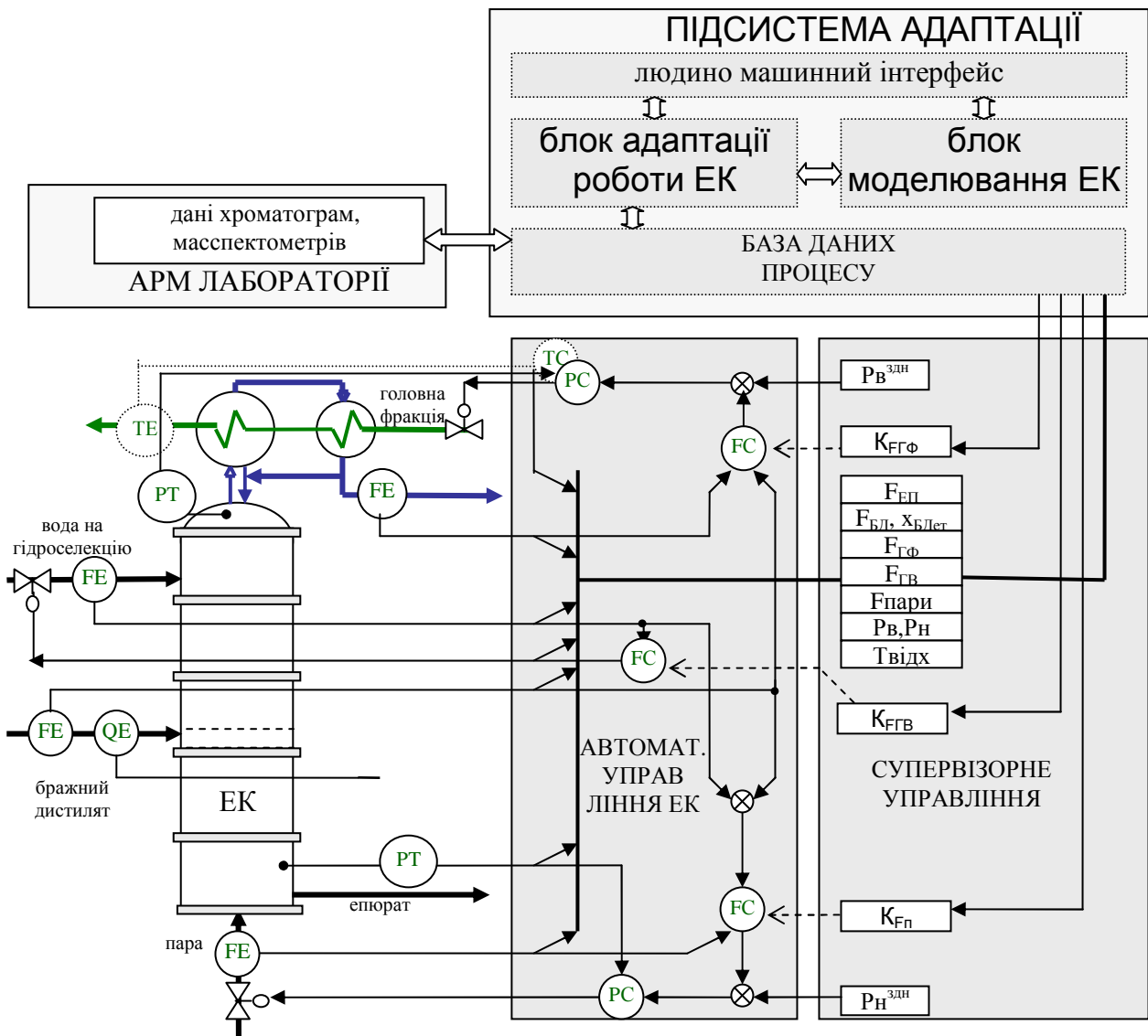


Рис.4. Функціональна схема управління якістю епюрату ЕК.

Вдосконалення існуючої системи автоматизації епюраційної колони заключається в виконанні наступних кроків:

1. забезпечення автоматичного вимірювання витрат головної фракції, бражного дистилату, пари та води на гідроселекцію; вимірювання лабораторними методами концентрацій домішок в бражному дистилаті, головній фракції, епюраті в проміжки часу між вивантаженнями бродильних чанів;

2. реалізація алгоритмів співвідношення витрат та їх зв'язку з типовими контурами управління ЕК в існуючих контролерах або регуляторах;

3. підключення розробленої підсистеми адаптації до існуючої системи через рівень супервізорного управління (SCADA/HMI) для формування коефіцієнтів регуляторам співвідношень.

Слід зазначити, що вдосконалення існуючої системи можливе тільки при наявності відкритого інтерфейсу з її боку. В якості стандартного відкритого інтерфейсу пропонується технологія OPC [5].

**Висновки.** Запропонований новий принцип управління БРУ для забезпечення стабільної якості спирту на прикладі контурів епюраційної колони. Розроблені нові схеми та алгоритми основних контурів ЕК, нова структура системи управління та шляхи вдосконалення існуючих систем. Запропоновані підходи можуть бути використані при автоматизації інших колон брагоректифікаційного відділення.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Цыганков П.С.* Ректификационные установки спиртовой промышленности. – М.: Легкая и пищевая промышленность., 1984. – 336 с.
2. *Мандельштейн М.Л.* Автоматические системы управления технологическим процессом брагоректификации. – М.: Пищевая промышленность., 1975 г. – 240 с.
3. *Пупена О.М.*, Використання модифікованого методу UNIFAC (Дортмунд) для розрахунку паро-рідинної рівноваги при моделюванні процесів ректифікації у виробництві харчового етилового спирту. // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2007, – №22. – С.61–63.
4. *Пупена О., Ельперін І.* Інтеграція систем управління. // Харчова і переробна промисловість. – 2005. – №1. – С. 9–11.
5. *Пупена О.М., Ельперін І.В., Ладанюк А.П.* Використання концепції OPC в сучасних системах автоматизації. // Автоматизація виробничих процесів. – 2003, – №1. – С.65–70.