

# Частотно-регульований електропривод в цукровій промисловості

**В.М. Кухар**, генеральний директор ТОВ «Фірма ТМА»

**А.Ф. Кравчук**, технічний директор ТОВ «Фірма ТМА»

**В.В. Охень**, провідний інженер-електрик з автоматизованого електроприводу ТОВ «Фірма ТМА»

В статті наведені принципи використання частотно-регульованих електроприводів в цукровій промисловості. Приведено метод отримання аналітичного визначення головної характеристики насосів та розрахунку системи «насос-трубопровід» для визначення максимальної кількості рідини, що перекачується. Наведені принципи і особливості використання частотно-регульованих електроприводів для ряду технологічного обладнання цукрового заводу.

Ключові слова: насоси, головна характеристика, аналітична форма головної характеристики насосів, частотно-регульовані електроприводи для технологічного обладнання.

В статье приведены принципы использования частотно-регулируемых электроприводов в сахарной промышленности. Приведен метод получения аналитического определения главной характеристики насосов и расчет системы «насос-трубопровод» для определения максимального расхода перекачиваемой жидкости. Приведены принципы и особенности использования частотно-регулируемых электроприводов для технологического оборудования.

Ключевые слова: насосы, главная характеристика насосов, математическая формула главной характеристики насосов, принципы использования частотно-регулируемых электроприводов для технологического оборудования.

Principles of use of variable frequency electric drives in sugar industry are described in the article. Method to get analytical determination of main characteristic of pumps and calculation of the «pump-pipeline» system to determine maximum flow of the pumped liquid is presented. General principles of use of variable frequency electric drives for production equipment are discussed.

Keywords: pumps, main characteristic of pumps, mathematical formula for main characteristic of pumps, principles of use of variable frequency electric drives for production equipment

## Частотно-регульований електропривод насосів

Використання частотно-регульованих електроприводів в цукровій промисловості започатковано в 80-х роках ХХ століття.

В числі перших частотно-регульованих електроприводів Запорізького електроапаратного заводу (ЗЕАЗ) було встановлено на насосах подачі сокостружкової суміші в колонний дифузійний апарат на Шрамківському цукровому заводі.

Перший частотно-регульований електропривод Запорізького електроапаратного заводу для бурякорізок був встановлений на Городенківському цукровому заводі за ініціативою головного енергетика В.І. Шабата.

З тих пір частотно-регульований електропривод в цукровій промисловості вдосконалювався, а його використання розширювалось.

Сьогодні практично відсутні технічні проблеми з використання таких електроприводів для різних насосів. Але проблеми ефективного використання таких електроприводів залишилися.

Для цукрової промисловості частотно-

регульований електропривод ефективний як в плані економії електроенергії, так і в плані використання його в якості інтелектуального виконуючого механізму в системах управління технологічними процесами.

При переробці цукрових буряків 65-70% споживаної електроенергії приходиться на транспортування технологічних продуктів насосами.

Існує дві групи перетворювачів: статичні перетворювачі частоти з проміжним контуром постійного струму і статичні перетворювачі частоти з проміжним контуром постійної напруги.

При виборі перетворювача необхідно користуватися критеріальними оцінками.

*До числа критеріальних оцінок можна віднести:*

- критерії, що виходять з вимог економії електричної енергії;
- критерії, що виходять з вимог технології;
- критерії, що виходять з технічних вимог;
- критерії, що виходять з вимог охорони навколишнього середовища.

Маючи за мету економити електричну енер-

гію, ми повинні враховувати витрати на купівлю перетворювача частоти, які різко зростають при зниженні потужності електропривода. Розподіл електроприводів цукрового заводу по кількості і потужності такий, що 10-15% електроприводів потужністю 132 кВт і більше споживають 50-60% виробленої турбогенератором електроенергії. До них можна віднести:

- електроприводи газових насосів;
- електроприводи насосів технічної води;
- електроприводи насосів оборотної води;
- електроприводи бурьянонасосів;
- електроприводи циркуляційних насосів соку;
- електроприводи живильних насосів парових котлів;
- електроприводи вентиляторів і димососів парових котлів;
- електроприводи насосів матеріальних потоків технологічних продуктів.

Тому при рішенні задачі економії електричної енергії необхідно починати з цих електроприводів.

Крім того, необхідно оцінювати кошти на установку такого електроприводу. Коли нас цікавить мінімізація коштів, то з досвіду фірми «ТМА» ми маємо такі рішення:

- частотний перетворювач розміщується біля насоса в шафі і по входу підключається до існуючого пускача насоса, а по виходу - до існуючого асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором;
- при реконструкції технологічних відділень проектується окремий розподільчий пункт споживачів електроенергії, в якому встановлюється частотний перетворювач в відповідності з вимогами до монтажу даного перетворювача.

Особливості установки для першого варіанту: якщо насос підключений до РП-0,4 кВ, а турбогенератор працює паралельно з РЕМ, то використання пускача обов'язкове;

- якщо використовується один частотний перетворювач для двох насосів, то переключення виконують за допомогою рубильників.

#### *Переваги першого варіанту:*

- зменшення кількості кабельної продукції;
- зменшення коштів на встановлення перетворювача.

#### *Недоліки:*

- включення і переключення приводів виконуються оперативним персоналом.

#### *Особливості другого варіанту:*

- проектується встановлення щитків місцевого управління електроприводами для реалізації задач дистанційного управління і обслуговування насосів в відповідності до правил техніки безпеки;

- проектується РП-0,4 кВ технологічних відділень заводу.

#### *Переваги другого варіанту:*

- для надійності електропостачання для технологічних відділень в РП-0,4 кВ виконують автоматичне включення резервного живлення;

- в РП-0,4 кВ ефективно реалізується система блокування електроприводів технологічного обладнання і насосів;

- в РП-0,4 кВ ефективно реалізується управління насосами за алгоритмами АСУ ТП;

- *реалізується новий модульний принцип електротехнологічного комплексу;*

- створюються умови для автоматичного управління матеріальними потоками;

- зменшується кількість кабельної продукції.

В цукровій промисловості ми маємо достатньо складну ситуацію в зв'язку з наявністю застарілих турбогенераторів малої потужності, які мають велике питоме споживання пари на 1 кВт/год. виробленої електроенергії. Крім того, при реалізації заходів зниження споживання пари на технологічні процеси і досягнення витрати пари 30-35% до ваги буряків, часто не виконуються заходи відповідного зниження питомої витрати електроенергії.

В результаті створюється надлишок пари після турбогенератора.

До того ж потужність електроприводів насосів на цукрових заводах перевищує проектну потужність в 1,5-2,0 рази, що приводить до зниження  $\cos\phi$  електроприводів.

Використовуючи частотно-регульовані електроприводи насосів, ми маємо можливість підвищувати  $\cos\phi$  електроприводів до 0,91-0,96. Тому величина  $\cos\phi$  залишається одним з важливих критеріїв економії електроенергії.

На цукрових заводах є також насосні агрегати з електроприводом постійного струму, наприклад, насоси сокостружкової суміші, яка перекачується з ошпарувача в колонний дифузійний апарат.

*Проста конструкція, низька вартість, висока надійність, малі кошти на обслуговування асинхронних електродвигунів є також ефективним критерієм для заміни тиристорного електроприводу насосів на частотно-регульований.*

При виборі частотних перетворювачів потрібно мати на увазі, що насоси відносяться до типу навантаження, який характеризується тим, що потужність змінюється в третій степені від числа обертів насоса, а момент – в другій степені. Витрата перекачуваного продукту пропорційна обертам насоса.

Для того щоб асинхронний двигун до номінальних обертів віддавав постійний момент обертання, необхідно підтримувати постійне намагнічування статорної обмотки, тобто підтримувати стабільність залежності

$$F = U_1 f_p \quad (1)$$

де:  $F$  – магнітний потік;

$U_1$  – напруга на статорі;

$f_1$  – частота поля статора.

Тому статичний перетворювач частоти пови-



Рис. 1. Характер впливу тиристорних перетворювачів на синусоїду напруги живлення

нен забезпечувати трьохфазну систему зі змінною частотою і напругою. Якщо відношення  $U_1/f_1$  підвищується по причині зниження частоти або підвищення напруги, то може виникнути небезпечний перегрів двигуна. При зниженні відношення  $U_1/f_1$  момент електродвигуна зменшується.

Потрібно також пам'ятати, що для вітчизняних серійних електродвигунів напруга обмежена 380 В, а частота 50 Гц. За порогом цих величин настає різке падіння моменту двигуна. При виборі привода насоса момент електродвигуна повинен бути більше моменту навантаження.

$$M = M_n + M_p, \quad (2)$$

а момент розгону  $M_p = J d\omega/dt$ ,

де:  $M$  – момент двигуна;

$M_n$  – момент навантаження;

$M_p$  – момент розгону;

$J$  – момент інерції;

$\omega$  – швидкість обертання.

При цьому час розгону для програмування роботи насоса ми можемо визначити по формулі:

$$t_p = \pi / 30 \cdot J \Delta n / M_p, \quad (3)$$

де:  $t_p$  – час розгону, с;

$\Delta n$  – різниця числа обертів, хв<sup>-1</sup>;

$J$  – момент інерції насоса, кг м<sup>2</sup>;

$M_p$  – момент розгону, Нм.

Момент обертання електродвигуна розраховується по формулі:

$$M = 9550 P / n, \quad (4)$$

де:  $P$  – номінальна потужність електродвигуна, кВт;

$n$  – номінальне число обертів електродвигуна, хв<sup>-1</sup>;

$M$  – момент електродвигуна, Нм.

При цьому, в залежності від типу перетворювача, розрахунковий момент електродвигуна необхідно збільшити на 10-15%. Це визвано тим, що напруга живлення електродвигунів заводу має значні відхилення форми синусоїди як від роботи тиристорних перетворювачів, так і від частотних перетворювачів. В більшій мірі на синусоїду напруги мережі живлення впливають статичні перетворювачі частоти з проміжним контуром з постійним струмом.

На рис.1 показаний характер зміни синусоїди напруги живлення від тиристорних перетво-



Рис. 2. Характер впливу частотних перетворювачів на синусоїду напруги живлення

рювачів, а на рис. 2 – від частотних перетворювачів.

Насос і трубопровід, що до нього відноситься, а також вентиля чи засувки, складають дві системи, які з'єднані послідовно. Вони завжди розраховуються на максимальне значення витрати. Головна характеристика насоса визначається залежністю між напором та витратою рідини, тобто  $H = f(Q)$ , яка заводом-виробником насосів надається в графічному вигляді. Але нас цікавить в більшій мірі залежність повного напору  $H_n$  від витрати перекачуваної рідини  $Q$  і числа обертів  $n$  робочого колеса насоса.

Ця залежність має вигляд [1,2]:

$$H_n = k n^2 + \ell n Q + m Q^2, \quad (5)$$

де:  $k, \ell, m$  – постійні коефіцієнти.

Для програмування роботи насоса, як в режимі індивідуальної роботи з регулятором перетворювача, так і в режимі роботи в системі контура управління АСУ ТП, ми повинні мати аналітичне вираження головної характеристики центробіжних чи інших насосів. З врахуванням теоретичної характеристики, аналітичну характеристику насоса апроксимують рівнянням:

$$H_n = H_0 + LQ + MQ^2, \quad (6)$$

де:  $H_0$  – напір насоса при  $Q = 0$ ;

$H_0 + LQ$  – теоретичний напір;

$MQ$  – загальні втрати напору в насосі.

Характеристика трубопроводу:

$$H_m = H_z + CQ^2, \quad (7)$$

де:  $H_z = H_2 - H_1 + (P_2 - P_1) / \gamma$  – статичний напір;

$H_2 - H_1$  – геометричний напір;

$(P_2 - P_1) / \gamma$  – різниця тиску на початку і в кінці системи;

$C = 8 \sum \xi / 3600^2 \pi^2 g d^4$  – коефіцієнт втрати напору в гідравлічних опорах;

$\sum \xi$  – сумарний коефіцієнт гідравлічного опору трубопроводу;

$d$  – діаметр трубопроводу.

Для знаходження постійних величин в рівнянні (6) використовуються паспортні дані характеристик насосів, що нас цікавлять. По методу найменших квадратів визначаємо ці величини. Наприклад, для насоса 8НДв рівняння має вигляд:

$$H_n = 88,7 + 0,0337 Q - 0,000047 Q^2 \quad (8)$$
 3 рівнянь (6) і (7) визначаємо витрату перекачуваної рідини [2]:

$$Q = [L \pm \sqrt{L^2 - 4(C-M)(H_z - H_\rho)}] / 2(C-M) \quad (9)$$

При від'ємному значенні підкорінного виразу характеристики насосу і трубопроводу несумісні. Таким чином, визначивши фактичний напір і продуктивність насосного агрегату, вирішується задача стабільної роботи насосу в діапазоні регулювання обертів.

Необхідно замітити, якщо максимальне значення витрати рідини знаходиться значно нижче розрахункової робочої точки насосу, то необхідно використовувати інші способи економії електроенергії.

При розрахованому напорі і витраті перекачуваної рідини потужність електродвигуна визначається по формулі:

$$P = (Q H_n \rho g) / 3600 \eta \quad (10)$$

де:  $Q$  – витрата рідини, що перекачується насосом, м<sup>3</sup>/г;

$H_n$  – напір, м;

$\rho$  – густина рідини, кг/дм<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення сили тяжіння, 9,81 м/с<sup>2</sup>;

$\eta$  – к.к.д. насосу;

$P$  – потужність електродвигуна, кВт.

Розрахувавши витрату перекачуваної рідини при даному напорі та відповідну енергію на перекачку рідини, визначають питомі витрати електроенергії на перекачку 1 м<sup>3</sup> рідини за годину.

Враховуючи те, що витрата рідини пропорційна обертам даного насосу, частотний перетворювач можна використати для контролю потоку, наприклад, оборотної води, чи масових потоків продуктів цукрового виробництва при відсутності витратомірів.

Ця залежність успішно використовується при організації контура регулювання витрати різних технологічних рідин на базі частотного перетворювача в якості інтелектуального регулятора і виконуючого механізму. Тому частотно-регульований електропривод насосів стає одним із основних інтелектуальних елементів АСУ ТП.

Характерне значення зниження споживання електроенергії для насосів з частотно-регульованим електроприводом складає 25-40 % від встановленої потужності.

### Частотно-регульований електропривод центрифуг

На цукрових заводах для фуговки утфеля першої ступені кристалізації використовують центрифуги циклічної дії. В залежності від продуктивності центрифуг потужність приводних електродвигунів знаходиться в діапазоні 110-315 кВт.

*До переваг частотно-регульованого електроприводу центрифуг відносяться:*

- використання короткозамкнутих асинхронних електродвигунів;
- плавний розгін центрифуги від завантаження до вивантаження цукру, що створює умови для мінімального зношення механічної частини центрифуг;
- ліквідуються пікові навантаження по струму на турбогенератор;
- знижуються експлуатаційні витрати; мінімальна складова реактивного струму;
- малий рівень шуму;
- розгін і гальмування по обмеженому максимально допустимому моменту обертання; віброблокіровка центрифуги;
- автоматика повторного включення при відключенні мережі живлення;
- використання безконтактного управління роботою центрифуги;
- рекуперативний режим роботи групи центрифуг;
- можливість використання електроприводів з напругою 6,3 кВ.

Такі переваги мають сучасні центрифуги фірм ВМА, Вускау-Wolf (Німеччина) і Fives-Cail (Франція).

При розрахунку потужності електродвигуна потрібно мати на увазі, що момент двигуна складається з 70% моменту прискорення і 30% моменту навантаження.

*При 20 циклах за годину для центрифуги з завантаженням 1750 кг утфелю маємо такий режим роботи в часі:*

- завантаження – 10 секунд;
- розгін – 45 секунд;
- центрифугування - 40 секунд;
- гальмування -45 секунд;
- вивантаження цукру - 40 секунд;
- момент інерції порожнього барабана - 780 кгм<sup>2</sup>;
- момент інерції заповненого утфелем барабана - 1480 кгм<sup>2</sup>;
- момент інерції барабана після фуговки - 1230 кгм<sup>2</sup>;
- середній момент інерції - 1355 кгм<sup>2</sup>;
- число обертів при фуговці - 1000 хв<sup>-1</sup>;
- число обертів при вивантаженні цукру - 90 хв<sup>-1</sup>;
- число обертів при завантаженні утфелю - 150 хв<sup>-1</sup>.

Момент прискорення  $M_y = 3,14 / 30 \cdot 1355 \cdot (1000 - 150) / 45 = 2680$  Нм.

*Особливості центрифуг з частотно-регульованим електроприводом:*

- обмін енергією при заторможуванні однієї центрифуги і розгін другої проходить в шині постійного струму;
- шина постійного струму має живлення від 2-х випрямлячів, один з яких працює в режимі очікування.

Подальший розвиток електроприводів центрифуг пов'язаний із створенням нових типів елек-

тродвигунів з метою зниження питомого споживання електроенергії до 0,8-1,2 кВт/год. на 1т утфеля.

Технологічна необхідність регулювання обертів ротора безперервнодіючої центрифуги полягає в тому, що в'язкість утфелю 2-ї і 3-ї ступеней кристалізації не стабільна.

При максимальних обертах ротора виникає ситуація, коли міжкристальний розчин відділяється на частині сита, а далі цукор перетирається на ситі в малі пилінки. Регулюючи оберти ротора центрифуги і завантаження, ми визначаємо в кожній ситуації оптимальний режим роботи центрифуг, за допомогою частотного перетворювача.

### Жомові преси

Використання частотно-регульованого електроприводу жомових пресів базується на:

- технологічній необхідності регулювання продуктивності і вмісту сухих речовин в жомі;
- узгодження продуктивності заводу і жомпресового відділення;
- технічна вимога підвищення  $\cos \phi$  електропривода.

Проблемним в розрахунку частотно-регульованих електроприводів жомових пресів є відсутність залежності «число обертів – вміст сухих речовин в жомі». Тому необхідні дослідження цієї проблеми. В сьогоденній практиці фірма «ТМА» використовує експериментальні дані

вмісту сухих речовин при різних обертах шнеків та інші технічні рішення.

### Дифузійні апарати

Електропривод колонного дифузійного апарату відноситься до приводів з механічним з'єднанням валів електродвигунів. Крім того, кінематична схема приводу колонного дифузійного апарату, наприклад, типу КД2-А30, включає коливальні елементи другого і третього порядків, що потрібно враховувати при розробці приводу.

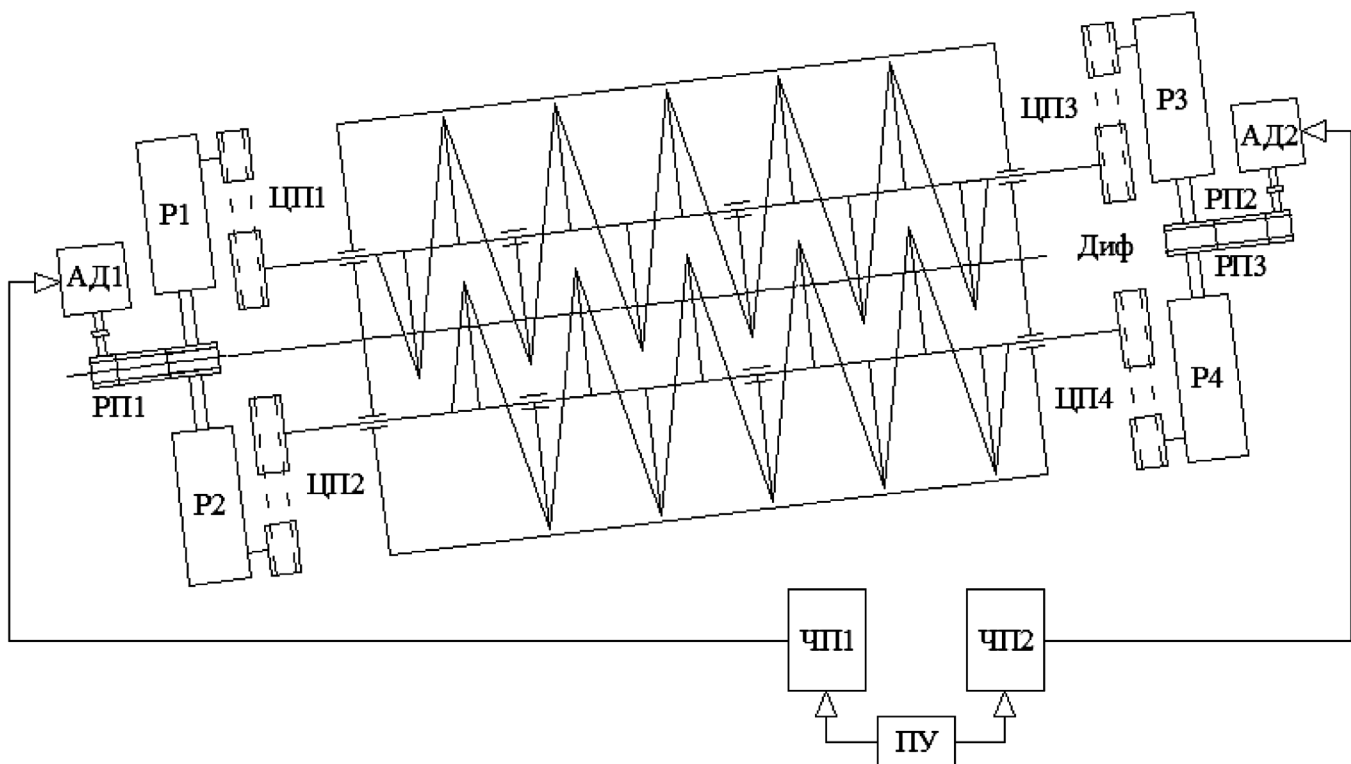
Фірма ТМА першою перевела електропривод постійного струму колонного дифузійного апарату на частотно-регульований асинхронний електропривод на Карламанському цукровому заводі в 2007 році (Росія). Надалі частотно-регульовані електроприводи колонних дифузійних апаратів впроваджені на цукрових заводах: ТОВ «Агро XXI», ТДВ «Шамраївський цукровий завод», ПАТ «Червонський цукровик».

При механічному з'єднанні валів двох електродвигунів в статичному режимі кутова швидкість буде однаковою, а результаивний момент дорівнюватиме:

$$M = M_1 + M_2 = M_{k1} / \omega_{01} (\omega_{01} - \omega) + M_{k2} / \omega_{02} (\omega_{02} - \omega)$$

$$\text{або } M = |\beta_1| (\omega_{01} - \omega) + |\beta_2| (\omega_{02} - \omega),$$

де:  $M_{k1}$ ,  $M_{k2}$ ,  $\omega_{01}$ ,  $\omega_{02}$ ,  $|\beta_1|$ ,  $|\beta_2|$  відповідно моменти короткого замикання, кутові швидкості холостого ходу, модулі жорсткості механічних характерис-



**Рис. 3.** Кінематична схема частотно-регульованого електроприводу апарата ДС-12  
РП1, РП2, РП3 - ремінна передача, АД1, АД2 - асинхронні двигуни, Р1, Р2, Р3, Р4 - редуктори, ЦП1, ЦП2, ЦП3, ЦП4 - ланцюгова передача, ЧП1, ЧП2 - частотні перетворювачі, Диф - диференціал, ПУ - пульт управління.

## ТЕХНІКА

тик електродвигунів. Механічна характеристика такого електроприводу визначається рівнянням:

$$\omega = [\omega_{01}|\beta| + \omega_{02}|\beta|] / (|\beta_1| + |\beta_2|) - |M| / (|\beta_1| + |\beta_2|)$$

Виходячи з цього рівняння, ми повинні відмітити деякі ускладнення в реалізації синхронного обертання валів при використанні асинхронних електродвигунів.

Найбільш складною проблемою є реалізація частотно-регульованого електроприводу дифузійного апарату типу DC-12. Проблема полягає в тому, що крім редукторів, ми маємо специфічну ремінну і ланцюгову передачі. Класичний підхід рішення задачі синхронного обертання валів апарата не дає оптимального результату. В перехідних процесах коливання ведуть до механічного зношення приводу.

Фірма «ТМА» має декілька рішень цієї проблеми. Перший асинхронний частотно-регульований електропривод дифузійного апарату типа ДА-3Т з чотирма мотор-редукторами на кінцях валів апарата впроваджений в 2005 році на цукровому заводі ВАТ «НИКА» (Росія). Авторами цієї розробки являються співробітники фірми «ТМА» В.М. Кухар, В.А. Песков, А.Ф. Кравчук, В.В. Охтень, Б.Б. Вара. Розробка запатентована в Україні. Аналогічний електропривод впроваджений фірмою «ТМА» на ВП «Глобинський цукровий завод».

Відомі рішення асинхронного електроприводу дифузійних апаратів типу DC-12 як в Україні, так і в інших державах. Серед них є як досконалі, так і недосконалі рішення. Сьогодні є актуальною розробка частотно-регульованого електроприводу апарата типу DC-12 продуктивністю 4000-4200 тонн буряків на добу з технологією живлення апарата жомопресовою водою та конденсатом. При цьому дещо змінюється конструкція шнеків та виконується модернізація інших складових апарата. Розробка фірми «ТМА» має декілька варіантів реалізації приводу апарата в залежності від типу електродвигунів, блоків контролю, захисту та управління. Для прикладу на **рис.3** показана кінематична схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу апарата DC-12 при продуктивності апарата 3000-3500 тонн буряків на добу. При цьому, розглянемо вимоги до такого приводу:

- забезпечення стабільних моментів на кінцях валів шнеків при заданому діапазоні регулювання обертів;
- забезпечення синхронного обертання валів;
- забезпечення плавного пуску приводу при максимальному навантаженні, наприклад, після зупинки апарата;
- забезпечення руху шнеків без ривків і пульсацій;
- забезпечення захисту приводу від поломок та несинхронності обертів;

- забезпечення захисту шнеків і приводу від порушень технологічного регламенту роботи апарата;

- контроль обертів і навантаження електроприводів

- забезпечення узгодженої роботи АСУ ТП і електроприводу апарата.

Ці вимоги є загальними як до тиристорного так і до частотного електроприводу.

Однією з причин виникнення пульсацій шнеків апарата є некваліфіковане налагодження як тиристорного так і частотного електроприводів.

Фірма «ТМА» працює над створенням приводів апаратів з використанням самих сучасних електродвигунів.

Частотно-регульований електропривод дифузійних апаратів типу А1-ПД2-С20 і А1-ПД2-С30 включає чотири асинхронні двигуни і технічних проблем в реалізації не має. Але технологічні проблеми, що впливають на роботу електроприводу існують. Про них відомо з непоодиноких випадків поломки апаратів і приводів.

### Вентилятори

При зміні об'ємної витрати повітря чи газів існує три способи регулювання:

- дросельною заслінкою;
- вихровим пристроєм, що закручує потік;
- зміною обертів ротора.

З енергетичної точки зору при дроселюванні для зниження витрати повітря чи газу енергія, яку споживає вентилятор, розсіюється у вигляді тепла на дросельному органі і втрачається. Вихрові пристрої більш ефективніші дросельних регуляторів з енергетичної точки зору.

Регулювання витрати газу чи повітря зміною обертів димососу чи вентилятора з енергетичної точки зору дає найкращий результат тому, що витрата пропорційна числу обертів і енергія не втрачається без виконання роботи.

Впровадження нового ефективного електроприводу в цукровій промисловості розширюється. Необхідні теоретичні розробки як приводів, так і законів управління які визначають їх максимальну ефективність і масове впровадження. ■

### Список використаних джерел

1. Байбаков О.В., Зеєгофер О.Н. Гидравлика и насосы.// М.-Л: 1957. – 321 с.
2. J. Merkl. Energiteinshfnung mit drehzahlregelbaren Drehstromantrieben in der Zuckerindustrie. / Zuckerindustrie. – 1985.-№110. – S 1082-1089.