

# Аналіз режимів напруги та засобів підвищення її в системах електропостачання цукрових заводів

*В.Є. Шестеренко, кандидат технічних наук, Національний університет харчових технологій*

*О.В. Данько, Національний університет харчових технологій*

*Розглянуто шляхи підвищення ефективності харчових виробництв за рахунок зниження технологічних втрат, викликаних неякісною напругою. Запропоновано спосіб підвищення якості напруги. Застосування напівпровідникових приладів дозволяє усунути ряд недоліків механічного перемикаючого пристрою (невисоку швидкодію, низький ресурс) і залишити основну його перевагу - синусоїдність форми кривої напруги. Можливість з допомогою напівпровідникових пристроїв здійснювати комутацію без спотворення синусоїди у момент переходу через нуль дозволяє усунути і такий суттєвий недолік механічних перемикачів - дискретність. Це дає змогу виконати стабілізатори напруги будь-якого ступеня точності, засновані на принципі дискретного регулювання перемиканням відпайок трансформатора без розриву струму та спотворення кривої напруги.*

*Ключові слова: напруга, електроенергія, електрообладнання, втрати енергії, регулятор напруги.*

*Рассмотрены пути повышения эффективности пищевых производств путем снижения технологических потерь, вызванных некачественным напряжением. Предложено способ повышения качества напряжения. Использование полупроводниковых приборов позволяет исключить ряд недостатков механических переключающих устройств (инерционность, низкий ресурс работы) и оставит основное его преимущество – синусоидальность формы кривой напряжения. Возможность с помощью полупроводниковых устройств производить коммутацию без искажения синусоиды в момент перехода через нуль позволяет исключить и такой важный недостаток механических переключателей как дискретность. Это позволяет создать стабилизаторы напряжения высокой точности на принципе дискретного регулирования переключением отпайек трансформатора без разрыва тока и искажения кривой напряжения.*

*Ключевые слова: напряжение, электроэнергия, электрооборудование, потери энергии, регулятор напряжения.*

*The ways of improving food production efficiency are studied by the reduction of process losses caused by defective voltage. The way to improve voltage quality is suggested. The use of semiconductor devices eliminates several disadvantages of mechanical switching device (low speed, low resource) and leaves its main advantage, i.e. sinusoidal nature of voltage curve form. The possibility of using semiconductor devices to perform switching without distortion sinusoid in the time of passing zero allows eliminating the major drawback of mechanical switches their discreteness. This allows to create voltage stabilizers of any degree of accuracy, based on the principle of discrete control by switching transformer unsolders without breaking the current and distorting voltage curve.*

*Keywords: voltage, power, electrical equipment, losses, voltage regulator.*

Більшість підприємств цукрової промисловості характеризуються компактністю, мають комбіновану систему електропостачання, тобто мають ТЕЦ і підключені до енергосистеми радіальною ЛЕП напругою 10...35 кВ. Добовий графік активної потужності відзначається суттєвою стабільністю. Дослідження, проведені працівниками НУХТ, показали, що в період переробки цукрових буряків навантаження протягом доби змінюється в межах 30% від максимального. Враховуючи вищевказані фактори проектувальники при реконструкції цукрових заводів в період 1970 – 1980 років не приділяли уваги регулюванню напруги, що призвело до росту втрат активної енергії та до погіршення якості напруги, оскільки електростанції заводів мають обмежені можливості регулювання напруги [2].

Відхилення напруги, зумовлені повільними процесами зміни навантажень у системі, справляють різний вплив на режим роботи окремих споживачів. Скажімо, тривале підвищення напруги на затискачах електричних двигунів - наймасовіших споживачів енергосистем – призводить до збільшення обертового моменту їх, зменшення ковзання й зростання втрат у сталі двигунів, збільшенню струму холостого ходу і, значить, зменшенню коефіцієнта потужності електродвигунів. Зниження напруги на затискачах електродвигунів призводить до зниження обертового моменту, збільшенню ковзання, зростанню струму статора й зменшенню терміну служби ізоляції електродвигунів [1, 2, 3, 4, 5].

У разі тривалої роботи електродвигуна при зниженій напрузі, зокрема на 90% номінального значення, строк служби ізоляції двигуна зменшується на 18-20%, що істотно знижує продуктивність технологічних механізмів, які приводить у дію цей двигун.

Найбільший вплив відхилення напруги справляє на режими роботи нагрівальних приймачів електричної енергії. Наприклад, зниження напруги на затискачах всього на 5% від номінального значення збільшує час нагрівання в 1,5-2 рази. Таким чином, відхилення напруги є однією з найважливіших проблем в системах електропостачання промислових підприємств. Її вирішення є пріоритетним завданням при проектуванні систем електропостачання.

Найжорсткіші вимоги до якості напруги ставлять освітлювальні електроприймачі. Найкритичнішим параметром зміни напруги є термін служби ламп. Підвищення напруги на затискачах ламп розжарювання на 6% викликає зниження терміну служби на 50%. Для люмінесцентних ламп ця залежність відображена слабше. Проте, як підвищення, так і зниження напруги на їхніх затискачах небажане. У першому випадку відбувається інтенсивне розпилення оксидної речовини з електродів і перегрів ПРА, у другому - зміна тиску пари ртуті у колбі, що призводить до зниження терміну служби та нестійкого запалювання. Враховуючи, що вартість люмінесцентних ламп у 10 разів вища за вартість ламп розжарювання, навіть зниження терміну служби їх на 20-30% при підвищенні напруги на 10 % викликає значні народногосподарські збитки. У виробничих цехах з безперервним циклом при відхиленнях напруги на 7...11% потреба в лампах зростає в три рази.

Зниження напруги у ламп розжарювання на 1% викликає зменшення світлового потоку на 2,7%, у люмінесцентних ламп - на 1,25%. Зменшення світлового потоку, у свою чергу, призводить до погіршення санітарно-гігієнічних умов для працюючих і до зниження продуктивності праці.

Світлодіодні лампи – енергоекономічні джерела світла. Призначені для прямої заміни ламп розжарювання. Конструкція їх дозволяє не міняти електричну інфраструктуру підприємства. Лампи миттєвої дії після подачі напруги. Не випромінюють ультрафіолетові та інфрачервоні промені, в них відсутня ртуть. Лампи обладнані вбудованим пристроєм живлення – драйвером, основним елементом якого є напівпровідниковий перетворювач напруги, що також забезпечує гальванічний розв’язок з мережею живлення.

Лампи деяких фірм мають драйвер з функцією стабілізації напруги та струму. Ці лампи не чутливі до відхилень напруги в межах  $\pm 10\% U_{ном}$ .

Показники якості електроенергії (ПЯЕ) нормуються міждержавним стандартом ГОСТ 13109 – 97 [2], який був уведений в Україні 01.01.2000 р. Відхилення напруги визначається як різниця між фактичним усталеним  $U_y$  і номінальним  $U_{ном}$  значеннями напруги даної мережі

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \quad (1)$$

Норми ПЯЕ поділяються на нормально допустимі та гранично допустимі. Нормальні значення мають витримуватися з ймовірністю 0,95, тобто протягом 95% часу доби ПЯЕ не повинні виходити за межі стандарту. Протягом решти часу (5%) норми можуть бути вищими [2].

Нормально допустиме та гранично допустиме значення усталеного відхилення напруги в точках загального приєднання споживачів електроенергії до електричних мереж напругою 0,38 кВ та вище дорівнює відповідно  $\pm 5$  та  $\pm 10\%$  номінальної напруги електричної мережі. У післяаварійних режимах ПЯЕ не повинні виходити за межі гранично допустимих значень. Відхилення напруги 5% допускається для промислових споживачів у Великобританії та Італії [ 1 ].

Більшість електроприймачів може працювати і за інших значень відхилення напруги, але при цьому спостерігатимуться відчутні народногосподарські збитки.

Активна потужність, що споживається асинхронним двигуном

$$P_{Ад} = (K_3 P_{ном} + \Delta P_{ном}) (1 + K_p) \quad (1)$$

$$K_p = (11,84K_3^3 - 18,25K_3^2 + 3,9K_3)(\delta U)^3 + (-2,67K_3^3 + 9,5K_3^2 - 3,08K_3 + 1)(\delta U)^2 + (-2,35K_3^3 + 1,55K_3^2 - 0,81K_3)\delta U \quad (2)$$

$$\text{при } K_3 = 1 \quad (3)$$

$$K_p = -2,51(\delta U)^3 + 4,75(\delta U)^2 - 0,75\delta U. \quad (4)$$

Додаткові питомі витрати при експлуатації асинхронних двигунів

$$3 = 3_l(\delta P + \delta P_n) + \frac{0,2533KV}{8760} \delta Q - \gamma \delta P_n, \quad (5)$$

де 3 – вартість  $1кВт \cdot год.$ ,  $\delta P$  – додаткові втрати в двигуні,

$\delta P_n$  - додаткове споживання енергії двигуном внаслідок зміни частоти обертання ротора.

$$\delta_n = \frac{n - n_{ном}}{n_{синхр}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де n - частота обертання при напрузі U та  $K_3 \neq 1$ ;

$n_{\text{ном}}$  - частота обертання при  $U=U_{\text{ном}}$ ,  $n_{\text{синхр}}$  - синхронна частота.

Таким чином, зниження напруги призводить до суттєвого збільшення втрат активної енергії, до перегрівання двигунів і скорочення терміну служби їх.

Технологічні збитки визначаються за характеристиками конкретних машин. Чутливі до відхилень напруги автоматизовані виробництва, насоси та інше. При зниженні напруги на 7 % технологічний процес подовжується на 40...60%.

Відхилення напруги призводять до зміни продуктивності насосів.

Економічні характеристики насосів моделює рівняння

$$Z = c\delta U + k(\delta U)^2, \quad (6)$$

де  $c = -87 \cdot 10^{-3} \text{ грн/кВт} \cdot \text{год}$ ;  $k = -345 \cdot 10^{-3} \text{ грн/кВт} \cdot \text{год}$ .

Відхилення напруги впливають на характеристики перетворювачів енергії. При підвищенні напруги збільшується кут регулювання, що призводить до зменшення коефіцієнта потужності перетворювача.

Реактивна потужність конденсаторних батарей пропорційна квадрату напруги, тому зниження напруги у мережі викликає різке зменшення виданої конденсаторами реактивної потужності і, як наслідок, підвищення споживаної реактивної потужності з зовнішньої мережі й додаткове збільшення втрат напруги. Вказані явища призводять до лавиноподібного зниження напруги й до масового вимкнення двигунів. При цьому спостерігаються такі види народногосподарських збитків: брак продукції, скорочення терміну служби обладнання і застосування понаднормових робіт для до випуску продукції.

В системах електропостачання цукрових заводів автори виявили закономірності, що відрізняються від енергосистем. Так, в енергосистемах зниження напруги призводить до зменшення споживання енергії. На цукрових заводах, де основним споживачем є асинхронний двигун, зниження напруги в допустимих межах (10%  $U_{\text{ном}}$ ) призводить до збільшення струму в двигунах і додаткового завантаження генератора ТЕЦ.

Втрати потужності у системах електропостачання підприємств залежать від відхилень напруги й визначається за виразом:

$$\Delta P = \beta^2 \Delta P_{\text{нав.ном}} \left( \frac{100}{100+V} \right)^2 + P_{\text{х.ном}} \left( \frac{100}{100+V} \right)^2, \quad (7)$$

де  $\Delta P_{\text{нав.ном}}$ ,  $P_{\text{х.ном}}$  - втрати відповідно навантажувальні та холостого ходу при номінальній напрузі;  $V$  - відхилення напруги, (позначення для економічних розрахунків).

Знизити збитки можна шляхом регулювання напруги [1, 6], оскільки забезпечити допустимий режим напруги тільки генераторами ТЕЦ неможливо.

Необхідно застосовувати додаткові регульовальні пристрої, причому закони регулювання напруги мають установлюватися з умов забезпечення найекономічнішої спільної роботи джерел реактивної потужності, електричних мереж та електроприймачів. Найперспективнішим є метод регулювання шляхом дії на напругу і на реактивну потужність. При цьому пристрої керування регулятором напруги та КУ мають бути взаємозв'язані чи навіть змонтовані в одному блоці. Необхідність застосування регульовальних пристроїв у мережі визначається, виходячи з одержання максимально можливих передбачуваних втрат напруги у мережах при допустимих відхиленнях напруги на затискачах приймачів [1, 6].

При регулюванні напруги на шинах ТЕЦ режим напруги змінюється по всій системі електропостачання. Цей метод називається централізованим регулюванням. Централізоване регулювання дає позитивні результати тільки в тому випадку, коли всі приймачі однорідні, однак якщо електроприймачі не однорідні, регулювання ведеться по групі більшої потужності. Для інших електроприймачів необхідно використовувати локальні регулятори. Через те що на ТП застосовуються трансформатори з ПБЗ, режим напруги на шинах 0,4 кВ суттєво залежить від добавки напруги в центрі живлення. У зв'язку з цим, при під'єднанні до ТЕЦ лінії, що живить різномірні споживачі, для забезпечення належної якості напруги в електроприймачів, графіки навантаження яких відрізняються від графіка основної групи споживачів, необхідно використовувати засоби місцевого регулювання напруги. У процесі експлуатації слід найповніше і найекономічніше використовувати наявні засоби регулювання - конденсаторні установки (КУ). Можливості КУ в області регулювання напруги дуже обмежені і різко залежать від параметрів мережі та навантажень. І все-таки на сьогодні КУ є практично єдиним місцевим регулятором напруги у багатьох пунктах мережі. Тим більше, що використання їх для цілей регулювання напруги не потребує додаткових капітальних затрат, оскільки конденсаторні батареї встановлені для підвищення коефіцієнта потужності.

Проте найперспективнішим є метод регулювання шляхом дії на напругу і на реактивну потужність. При цьому пристрої керування регулятором напруги та КУ мають бути взаємозв'язані чи навіть змонтовані в одному блоці. Необхідність застосування регульовальних пристроїв у мережі визначається виходячи з одержання максимально можливих передбачуваних втрат напруги у високо- та низьковольтній мережах при допустимих відхиленнях напруги на затискачах приймачів.

Розглянемо умови, при яких виконуються вимоги діючого в Україні стандарту ГОСТ 13109-97. Будемо при розрахунку режиму напруги розглядати тільки 2 точки в системі електропостачання: А – це



найближчий електроприймач, В – найбільш віддалений електроприймач. По верхньому допустимому значенню +5%  $U_{ном}$  перевіряється тільки найближча точка, в якій втрати напруги найменші.

По нижньому допустимому значенню - 5%  $U_{ном}$  перевіряється тільки найбільш віддалена точка В - точка, в якій втрати напруги найбільші.

Розрахунок відхилень напруги в системах електропостачання ведеться не в абсолютних одиницях [В], а у відносних [%] . Відхилення напруги в характерних точках А (найближча до ТП) та В (найвіддаленіша від ТП)

$$\delta U_A = \delta U_{ТЕЦ} - \Delta U_{ЛЕП_{ВН}} - \Delta U_{ТТТ} + E_{ТТТ} \leq \delta U^+ \quad (8)$$

$$\delta U_B = \delta U_{ТЕЦ} - \Delta U_{ЛЕП_{ВН}} - \Delta U_{ТТТ} + E_{ТТТ} - \Delta U_{ЛЕП_{НН}} \geq \delta U^-$$

Як локальний регулятор на цукрових заводах в освітлювальних мережах можна використати звичайні знижувальні трансформатори, включивши їх як вольтодобавочні трансформатори (ВДТ). Перемикаючи обмотки однофазного ВДТ можна отримати три добавки напруги.

**Приклад.** Використаємо, як вольтодобавочний, трансформатор потужністю  $S_{ном} = 0,25\text{кВ} \cdot \text{А}$  , напругою 220/12В, добавка – 12В;

$$I_{номВДТ} = \frac{S}{U} = \frac{250}{12} = 20,8\text{А} \quad S_{номВДТ} = 220 \cdot 20,8 = 4,6\text{кВ} \cdot \text{А}$$

**Висновок:** До такого ВДТ можна підключити 46 ламп потужністю 100Вт.

Трифазний вольтодобавочний трансформатор може забезпечити п'ять добавок напруги.

В системах електропостачання цукрових заводів, при відсутності високовольтних двигунів, можна використати систему напруг 660/380 В. Розглянемо переваги цієї системи:

1. Струм в провіднику менший, ніж при напрузі 380 В і тому скорочуються витрати провідниково-го матеріалу.
2. Якщо переріз не змінювати, то зменшуються при цьому втрати енергії в 3 рази.
3. Зростає номінальна потужність двигунів.
4. Перехід на напругу 660 В можна здійснювати без заміни електричної мережі, оскільки більшість кабелів мають ізоляцію, що витримує напругу 1000 В.
5. Вартість трансформаторів ТП на напругу 660 В нижча, ніж на 380 В .
6. Зменшуються струми короткого замкнення в цеховій мережі.

**Висновки**

1. На цукрових заводах зниження напруги викликає збільшення струму навантаження, що веде до перегрівання генераторів ТЕЦ.
2. При погіршенні якості електроенергії зростають електромагнітні та технологічні втрати. Електромагнітні втрати електроенергії проявляються у зростанні втрат потужності та енергії, у зменшенні терміну служби обладнання. Технологічні втрати включають в себе зменшення продукції, зниження якості продукції, випуск неякісної продукції. Технологічні збитки складають до 90...92% усіх збитків і, як правило, приховані в собівартості продукції.
3. Зниження напруги у ламп викликає зменшення світлового потоку, що в свою чергу, призводить до погіршення санітарно-гігієнічних умов для працюючих і до зниження продуктивності праці. Додаткові затрати на поліпшення освітленості завжди окупляться, і дорого коштує «погане освітлення».
4. Світлодіодні лампи деяких фірм мають драйвер з функцією стабілізації напруги та струму. Ці лампи не чутливі до відхилень напруги в межах  $\pm 10\% U_{ном}$ . Проведені дослідження на діючих цукрових заводах показали необхідність застосування засобів захисту світлодіодних ламп від імпульсів перенапруги. В цьому напрямі автори і направляють основні зусилля в подальшій роботі.

**Список використаних джерел**

1. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник.- Вінниця: Нова Книга, 2011. - 656 с.
2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.01.2000. - К. : Изд-во стандартов, 1998; Госстандарт Украины, с доп. и попр. 1999. - 31 с.
3. Шестеренко В.Є., Шестеренко О.В. Електропостачання промислових підприємств. – Київ : 2013. – 424 С.
4. V. Shesterenko , I. Sydorhuk, *Reactive power compensation in the combined system of sugar refinery electricity* // Ukrainian food journal, Volume 2, Issue 1, 2013, с. 116-122.
5. Шестеренко В.Є. Оптимізація систем електроспоживання промислових підприємств. – Київ: ЧП «Глана», 2001. – 214 с.