

**МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ  
ГАЗОТУРБІННИМИ УСТАНОВКАМИ ПРИ МАНЕВРУВАННІ ЕЛЕКТРИЧНИМ  
НАВАНТАЖЕННЯМ**

М. М. Овчинников, О. С. Тарахтій

---

Національний університет «Одеська політехніка»  
1, Шевченка пр., м.Одеса, 65044, Україна  
Email: tichyk721@gmail.com

---

Розподілена генерація є однією з ключових тенденцій у розвитку енергетики України. Вона передбачає створення децентралізованих джерел енергії, які розташовані ближче до кінцевих споживачів, що дозволяє зменшити втрати при передачі енергії та підвищити енергетичну незалежність. Газотурбінні установки розглядаються як перспективне рішення для забезпечення стабільності енергосистеми України в умовах значних викликів, спричинених воєнними діями та руйнуванням критичної інфраструктури. У роботі розглянуто переваги використання газотурбінних установок для розподіленої генерації, зокрема їхню адаптивність до кризових ситуацій, а також змінення динамічних властивостей газотурбінних установок у перехідних режимах в залежності від номінальної потужності установки. Досліджено роботу систем керування газотурбінними енергетичними установками в умовах змінних електричних навантажень. На основі аналізу перехідних процесів в системах керування установками при маневруванні електричним навантаженням зроблено висновок, що найкращою практикою є використання регуляторів, налаштованих на мінімально допустиме навантаження, що забезпечить гнучкість та надійність енергетичної системи.

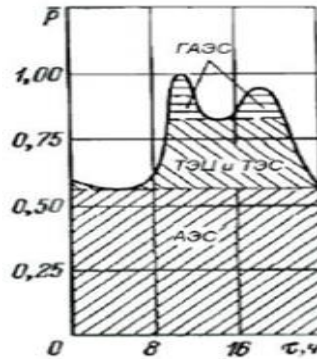
**Ключові слова:** Газотурбінна установка, змінні навантаження, стабілізація енергосистеми, розподілена генерація, система керування.

**Вступ.** Енергетична система України зазнала безпрецедентних втрат через військові дії. Руйнування великих генеруючих об'єктів та ліній електропередач, часті атаки на критичну інфраструктуру створили загрозу для енергетичної безпеки країни. В умовах, коли централізована генерація не здатна повною мірою забезпечувати стабільність постачання електроенергії, актуальним стає розвиток розподіленої генерації. Газотурбінні установки, завдяки своїй гнучкості та ефективності, можуть відіграти важливу роль у формуванні нової, стійкої енергосистеми України. У таких умовах в нашій енергосистемі з'являється нерівномірність між виробництвом та споживанням електричної енергії. Через це виникають значні труднощі, пов'язані із дефіцитом або профіцитом електроенергії в різних регіонах нашої держави. Одним із перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є розвиток розподіленої генерації, яка забезпечує гнучкість та надійність електропостачання. Газотурбінні енергетичні установки є достатньо маневровими і здатні працювати в умовах різких змін електричного навантаження, є можуть бути одним з основних елементів такої генерації. Отже, дослідження роботи і аналіз динамічних характеристик газотурбінних установок в умовах змінних електричних навантажень є особливо актуальною задачею в контексті відновлення та стабілізації енергосистеми України [1,2].

Руйнування великих енергетичних об'єктів унаслідок війни призвело до значного зниження доступної потужності для виробництва електроенергії. Це викликало необхідність швидкого впровадження нових рішень, здатних забезпечити енергопостачання в кризових умовах. Однак більшість традиційних підходів до генерації електроенергії потребують значного часу для відновлення. Розподілена генерація, яка базується на локальних джерелах енергії, здатна забезпечити більшу стійкість

енергосистеми. У цьому контексті газотурбінні установки мають низку переваг, але також стикаються з низкою перешкод, які потребують вирішення [1,2].

Також, слід відмітити, що у довоєнний час енергоблоки атомних електростанцій України в основному використовувалися для покриття базового навантаження у добовому графіку навантаження енергосистеми (рис.1). Ядерний реактор може працювати із заданою потужністю протягом тривалого часу тільки в тому разі, якщо на початку роботи має запас реактивності. Наразі маневрування потужністю реакторної установки здійснюється операторами в ручному режимі і тільки на вимогу диспетчерів енергосистеми. Таке виконання маневру є досить небезпечним, оскільки потребує врахування зміни багатьох нейтронно-фізичних і технологічних параметрів, а це, у свою чергу, може призвести до впливу людського фактору на безпеку АЕС [3].



**Рис. 1.** Добове навантаження енергосистеми України:  $\tau$  – години доби;  $\bar{P}$  – споживана потужність

Проблеми використання газотурбінних установок. Газотурбінні установки здатні легко переходити на різні режими навантаження і мають значний потенціал для нівелювання вищевказаної проблеми енергетичної системи України. Їх основна перевага полягає у гнучкості та здатності до швидкого запуску, що дозволяє оперативно вводити їх в експлуатацію навіть у кризових умовах [2,3]. Це особливо важливо для регіонів, де централізована генерація недоступна через зруйновану інфраструктуру та дозволить полегшити роботу вітчизняних АЕС у маневрових режимах. Встановлення таких установок сприяє енергетичній автономії окремих територій, знижуючи залежність від централізованих мереж, які часто стають мішенню для атак. Питання використання газотурбінних установок для розподіленої генерації електричної енергії розглядаються як вітчизняними так і у зарубіжними авторами [4–13], що говорить про актуальність та великий інтерес цих типів установок.

Питання впровадження газотурбінних установок для створення розподіленої системи генерації, а також проблеми їх впровадження розглянуті у авторів [4–8]. З огляду вказаних літературних джерел можна зробити висновок, що найбільшу проблему для впровадження становить висока вартість обладнання та його інсталяції, що є значним бар'єром у контексті економічної кризи. Наступною, важливою, проблемою встановлення газотурбінних установок (ГТУ) в Україні є синхронізація роботи окремої газотурбінної установки з електромережею країни і необхідність модернізації розподільчого обладнання. Не менш суттєвим є дефіцит кваліфікованих фахівців, адже обслуговування таких систем потребує високого рівня технічної компетентності, яку через масову міграцію населення складно забезпечити [8].

Ще однією складністю є залежність від газових ресурсів. Незважаючи на потенціал альтернативного палива, більшість існуючих установок орієнтована на природний газ, що створює додаткові ризики, пов'язані з його ціною та постачанням. Крім того, пошкоджені газові магістралі та обмежена доступність до ресурсів у певних

регіонах ускладнюють їх експлуатацію. Екологічні виклики також потребують уваги, оскільки навіть сучасні ГТУ, хоча і екологічно чистіші за вугільні станції, все ще продукують викиди, які вимагають постійного моніторингу та регулювання [9–13].

Таким чином, незважаючи на значний потенціал газотурбінних установок у відновленні та модернізації енергетичної системи України, їх впровадження потребує вирішення технічних, економічних та екологічних проблем.

Особливості застосування газотурбінних установок для нівелювання нерівномірності добового навантаження. Як вже вказувалося вище, у даний час основним джерелом генерації електричної енергії в Україні – є атомні електростанції [2]. Різкі зміни навантаження для ядерних установок є, не тільки дуже несприятливими, а і небезпечними. Оскільки під час переведення енергоблоку з одного рівня потужності на другий відбувається часте переміщення регулюючої групи органів регулювання системи управління і захисту реактору, а це, у свою чергу, викликає швидке зношення і можливе руйнування цілісності оболонок ТВЕЛ реактора, а також скорочує ресурс оболонки реактора і вигорання палива [13,14]. З метою уникнення впливу цих негативних факторів при маневруванні використовують різні методи щодо забезпечення довговічності реактору і переустановлення тепловидільних збірок для подовження ресурсу. Але все це тимчасові міри, які впливають на надійність і стійкість роботи реактору [13]. Впровадження газотурбінних установок здатне знизити навантаження на енергоблоки атомних електричних станцій під час маневрування потужністю.

Для покриття пікових навантажень застосування ГТУ є доцільним. Це пояснюється тим фактом, що питома вартість газотурбінної установки в 1,5-2 рази менша за вартість великих паротурбінних установок (ПТУ), які мають більш високий ККД. До того ж, обслуговування газотурбінних установок значно простіше, а час пуску з холодного стану за умови відповідного конструктивного виконання становить 5-15 хв. А враховуючи характерні для пікових турбін числа годин роботи на рік (500-2000 год.) застосування ГТУ виявляється рентабельним навіть незважаючи на порівняно низький ККД (0,26-0,29) і без утилізації теплоти відхідних газів [5,13].

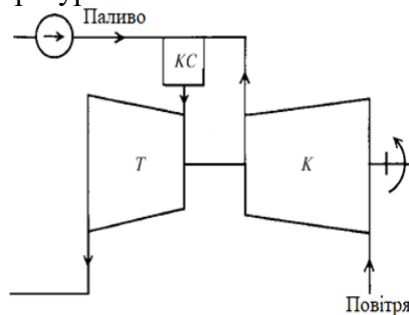
Зазвичай сучасні ГТУ, виконані за простою схемою, виробляють як універсальні агрегати, пристосовані для різних режимів роботи. При цьому змінюється, як правило, початкова температура газів перед турбіною, і для пікового використання, зважаючи на найменше число годин роботи на рік, ГТУ експлуатується при більш високих температурах газу після камери згоряння і, отже, більш високих потужності та ККД, ніж для напівпікових і базових режимів роботи.

Робота ГТУ на часткових навантаженнях. Режими роботи газотурбінних установок (ГТУ) можуть змінюватися через ряд зовнішніх чинників. Одним із ключових аспектів є потреба адаптації потужності, яка виробляється установкою, до змін у споживанні електроенергії. Це характерно для автономних енергосистем, де ГТУ виконує функцію приводу для електричного генератора. Такий генератор працює в ізольованій мережі, забезпечуючи постачання електроенергії до споживачів. У таких умовах система повинна швидко реагувати на зміну навантаження, що створює особливі вимоги до стабільності й гнучкості роботи двигуна.

Другою важливою причиною, яка впливає на режими роботи, є зміни атмосферних умов. Температура повітря, що надходить до компресора, має вирішальне значення, оскільки вона впливає на густину повітря і, відповідно, на ефективність процесу стиску. У холодному кліматі зростає ККД, оскільки повітря стає густішим, тоді як у спекотних умовах продуктивність ГТУ може суттєво знижуватися. Крім того, атмосферний тиск і вологість також відіграють важливу роль у формуванні робочих характеристик установки.

Розглянемо принципи функціонування газотурбінного двигуна на прикладі одновальної установки, яка є найбільш розповсюдженою (рис. 2). Ця конструкція розроблена спеціально для приводу електрогенератора й забезпечує підтримання

стабільної частоти обертання ротора. Основна перевага одновальної схеми полягає у її простоті й компактності, що робить її ефективним рішенням для систем автономної генерації. Завдяки інтеграції сучасних технологій керування, такі установки здатні адаптуватися до зміни навантаження, водночас підтримуючи оптимальні параметри роботи навіть при зміні температури чи інших кліматичних факторів.



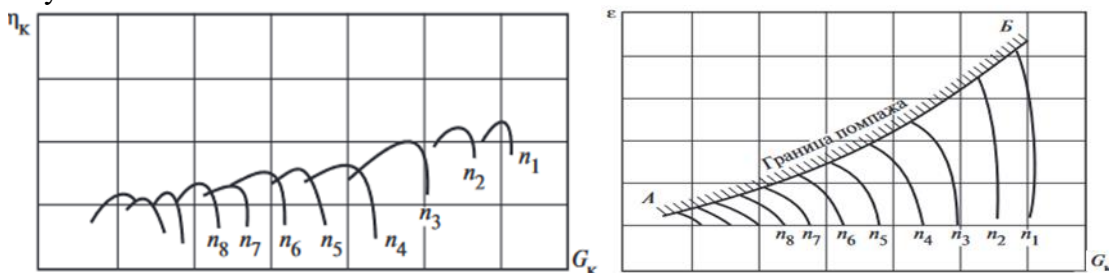
**Рис. 2.** Одновальна ГТУ: КС – камера згоряння; К – компресор; Т – турбіна

Для такого типу газотурбінних установок, за умов певних атмосферних умов і незмінних перетинів проточної частини компресора, камери згоряння та турбіни єдиним способом зміни навантаження є зміна витрати палива до камери згоряння.

Аналіз динамічних процесів при роботі ГТУ на часткових навантаженнях. Динамічні процеси, які виникають у газотурбінному двигуні під час зміни потужності, мають важливе значення для забезпечення його стабільної роботи. Розглянемо сценарій, у якому газотурбінна установка (ГТУ) працює в номінальному режимі, але виникає необхідність зменшити її потужність. Для цього здійснюється перекриття регулюючого клапана, що обмежує подачу палива до камери згоряння.

Зменшення витрати палива призводить до зниження температури продуктів згоряння на виході з камери. Це, у свою чергу, викликає падіння тиску газів перед турбіною, оскільки гази з меншою температурою і енергією створюють нижчий рівень тиску. Внаслідок цього зменшується і тиск повітря на виході компресора, оскільки обидва процеси тісно взаємопов'язані через конструкцію двигуна.

Однак частота обертання валу залишається постійною, що обумовлено специфікою роботи одновальних установок, розрахованих на підтримання стабільної частоти обертання генератора. Через це виникає ефект, за якого компресор змушений адаптуватися до нових умов. Згідно з витратною характеристикою компресора, що зображена на відповідних графіках (наприклад, рис. 3), зміна тиску впливає на пропускну здатність системи, і як наслідок, потік повітря через компресор дещо збільшується. Ці процеси відображають складну взаємодію між окремими компонентами ГТУ, такими як камера згоряння, турбіна й компресор. Зміна одного параметра запускає каскадний ефект, що охоплює всю систему. Для забезпечення стабільної роботи двигуна важливим є точне регулювання та оперативний контроль за його робочими параметрами, включаючи температуру, тиск і витрату повітря. Такі коригування здійснюються автоматизованими системами керування, які дозволяють підтримувати високу ефективність роботи навіть за умов зміни навантаження.



**Рис. 3.** Графіки зміни характеристик багатоступінчастого компресора

Таким чином, динамічні процеси в газотурбінному двигуні демонструють необхідність узгодження всіх елементів установки для досягнення оптимальних показників продуктивності й довговічності роботи в умовах змінного режиму експлуатації. Це вимагає не тільки вдосконалення конструкції окремих компонентів, але й впровадження сучасних алгоритмів керування, які забезпечують адаптацію системи до нових умов у реальному часі. Зниження витрати палива в газотурбінній установці (ГТУ) з метою зменшення її потужності супроводжується низкою взаємозалежних процесів, які безпосередньо впливають на її робочі параметри та ефективність. Основним наслідком зниження подачі палива до камери згоряння є зменшення температури продуктів згоряння, які виходять з камери та надходять до турбіни. Це зниження температури обумовлює падіння тиску газів перед газовою турбіною, що є критичним для збереження її ефективної роботи. Водночас падіння температури й тиску впливає на поведінку компресора, змінюючи його робочий режим. Згідно з характеристиками таких установок, зменшення температури газів і тиску автоматично призводить до збільшення витрати повітря. Це пояснюється тим, що компресор прагне компенсувати зниження тиску для підтримання стабільності роботи установки в умовах зменшеної подачі палива. Зменшення температури газів на виході з камери згоряння означає зниження їхньої енергії, яка використовується для приведення турбіни в рух. Відповідно, двигун працює менш ефективно, а витрата палива на одиницю виробленої енергії може зрости. Це явище стає особливо критичним у системах, які повинні працювати на змінних навантаженнях, коли часті зміни потужності створюють додаткові навантаження на всі компоненти ГТУ. Коефіцієнт корисної дії ГТУ. У сучасних ГТУ активно використовуються системи керування, які дозволяють оптимізувати робочі параметри двигуна в реальному часі. Такі системи враховують температурні й тискові характеристики, а також потреби в потужності, забезпечуючи більш ефективну роботу установки навіть у складних умовах. Загалом, зменшення потужності ГТУ шляхом зниження витрати палива є технічно необхідним, але потребує ретельного балансу між робочими параметрами для мінімізації втрат ефективності. Цей процес ілюструє важливість комплексного підходу до управління та модернізації газотурбінних технологій.

Коефіцієнт корисної дії газотурбінної установки даного типу визначається залежністю:

$$\eta = \eta(T_c/T_a, \varepsilon, \eta_T, \eta_K) \quad (1)$$

де  $T_c$  – початкова температура газів перед турбіною;  $T_a$  – початкова температура повітря перед компресором;  $\varepsilon$  – відношення тисків в компресорі та газовій турбіні;  $\eta_T$  – ККД газової турбіни;  $\eta_K$  – ККД компресора. Цей вираз справедливий (з несуттєвими уточненнями) не тільки для номінального, але і для перехідного режиму. У розглянутому випадку всі параметри у виразі (1) змінюються таким чином, що це призводить до зниження ККД. Найсуттєвіший вплив на зниження ККД оказує зменшення початкової температури газів  $T_c$  і відношення тисків  $\varepsilon$ . Вплив цих параметрів на коефіцієнт корисної дії відображено на рис. 4.

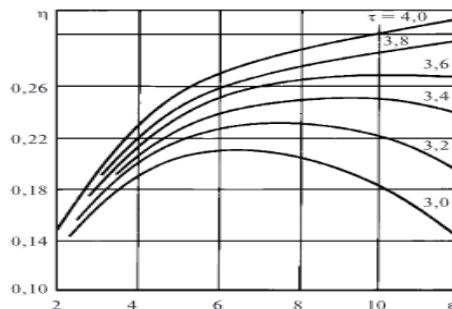


Рис. 4. Графік залежності ККД ГТУ від відношень тисків і температур

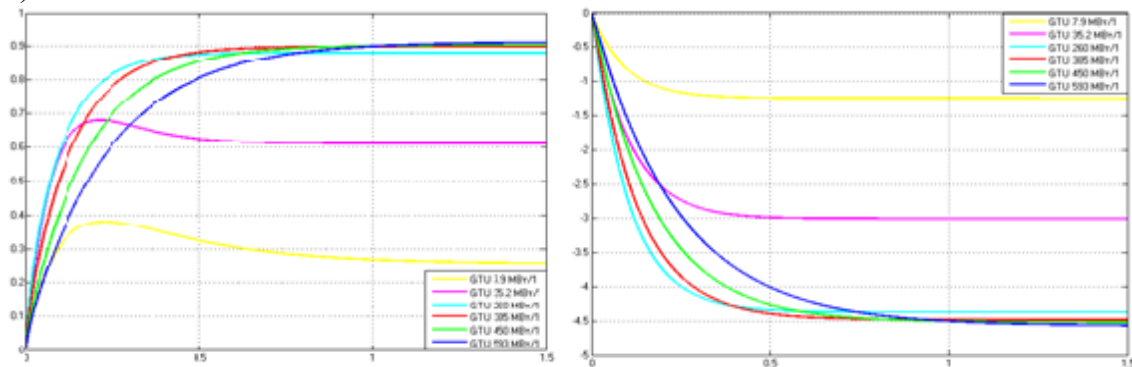
При часткових навантаженнях газотурбінної установки також знижуються значення коефіцієнтів корисної дії газової турбіни  $\eta_T$  і компресора  $\eta_K$ , що в цілому знижує ККД всієї установки ГТУ. Окрім зміни ККД газотурбінної установки, яке відбувається під час

роботи установки у перехідних режимах, а також на часткових навантаженнях, викликає інтерес стійкість перехідних процесів регулювання при роботі ГТУ на вказаних режимах. Динаміка ГТУ при роботі на часткових навантаженнях. Основним завданням системи управління ГТУ є забезпечення стабільної роботи двигуна при заданій потужності та постійній частоті обертання ротора, незалежно від змін у зовнішніх умовах. Для цього використовуються сучасні системи автоматичного регулювання, які аналізують робочі параметри в реальному часі й вносять необхідні коригування. Це дозволяє досягати високої надійності роботи навіть у найскладніших умовах. Системи управління та захисту сучасних газотурбінних установок повинні забезпечувати виконання кількох ключових завдань. По-перше, це автоматичне і дистанційне керування основними процесами, такими як запуск, регулювання навантаження та зупинка установки. По-друге, підтримка технологічних параметрів на розрахунковому рівні. А саме, забезпечення стабільної частоти обертання турбогенератора, контроль температури газів перед і після турбіни, регулювання активного навантаження генератора та підтримання режиму роботи компресора на безпечній відстані від межі помпажу. Окрім переліченого вище, системи автоматичного управління ГТУ повинні забезпечувати виконання функції захисту в разі аварійних ситуацій. Зокрема, це запобігання перевищенню допустимої частоти обертання ротора, критичному підвищенню температури газів на вході до турбіни, зниженню тиску мастила для підшипників, згасання факела у камері згоряння та наближенню до межі помпажу компресора.

У статті [16] представлена модель динаміки газотурбінної установки і результати моделювання динамічних властивостей ГТУ при часткових і номінальних навантаженнях. Математична модель ГТУ представляє собою систему диференціальних рівнянь, що описують динамічні властивості ГТУ під час дії основних збурень.

$$\begin{cases} B \frac{\partial \Delta \omega}{\partial t} + \Delta \omega = b_1 \Delta p_3 + b_2 \Delta t_3 + b_3 \Delta p_4 - b_4 \Delta p_2 - b_5 \Delta N_E; \\ T_p \frac{\partial \Delta p}{\partial t} + \Delta p = T_T \frac{d \Delta T_3}{dt} - k_T \Delta T_3 + k_m \Delta m_T + k_\omega \Delta \omega; \\ A \frac{\partial \Delta t_3}{\partial t} + \Delta t_3 = a_1 \Delta \omega + a_2 \Delta m_T + a_3 \Delta t_2 + a_4 \Delta t_T; \\ T_2 = T_1 \cdot k_{t_2}, \text{ де } k_{t_2} = 1 + \frac{\sigma_k^{0.28} - 1}{\eta_k}. \end{cases} \quad (2)$$

Вказана система диференціальних рівнянь включає три диференціальних рівняння, які описують характер зміни частоти обертання ротора ГТУ, зміну тиску у газових об'ємах ГТУ, а також зміну температури газів на виході з камери згоряння і, останнє, четверте, рівняння, описує зміну температури повітря після адиабатичного стискання у компресорі. В роботі також наведені значення коефіцієнтів моделі для ГТУ широкого діапазону потужностей і графіки перехідних процесів при зміні електричного навантаження (рис. 5).



**Рис. 5.** Зміна частоти обертання ротора ГТУ при змінненні електричного навантаження ( $\Delta N = \pm 10\%$ )

З представлених графіків частоти обертання ротору ГТУ видно, що найбільше

відхилення частоти спостерігається для газотурбінних установок середньої та великої потужності, причому, як при збільшенні, так і при зменшенні електричного навантаження.

Оскільки установки більшої потужності мають більшу інерційність, то із зростанням номінальної потужності газотурбінної установки динамічні властивості «погіршуються» з точки зору стабілізації частоти обертання ротора ГТУ.

Нижче будуть наведені графіки результатів моделювання перехідних процесів регулювання частоти обертання ротора ГТУ на номінальній і часткових електричних навантаженнях (75% і 50%).

Моделювання проводилося для оптимальних налаштувань регулятора, розрахованих окремо для кожного навантаження, а також за умови незмінних налаштувань регулятора і зміни електричного навантаження. У таблиці 1 наведені значення основних технологічних параметрів ГТУ, для якої проводилося моделювання.

**Таблиця 1.**

Номінальні значення технологічних параметрів ГТУ

Параметр \ $N_{Г}$	100%	75%	50%
$N_{Г}$ , МВт	4	3	2
$G_3$ , кг/с	10,38	7,35	6,57
$G_B$ , кг/с	10,1	8,32	5,58
$G_T$ , кг/с	0,206	0,166	0,117
$t_3$ , °C	1200	1200	1200
$t_4$ , °C	584	584	584

Аналіз якості керування ГТУ при зміні її електричного навантаження у широкому діапазоні. Проведено розрахунок коефіцієнтів диференціальних рівнянь моделі для навантажень 75% та 50%.

Для стабілізації частоти обертання ротора турбіни застосовується ІІІ регулятор. Збуренням є зниження навантаження на 10% від номінального. При цьому відхилення частоти електричного струму в енергосистемі України не повинно перевищувати значення  $0,2 \text{ с}^{-1}$  [17].

Для аналізу якості перехідних процесів (ІІІ) були прийняті такі показники як: перше динамічне відхилення ( $\Delta\omega_1$ ), величина перерегулювання ( $m = \Delta\omega_2/\Delta\omega_1$ ), ступінь загасання коливань ( $\psi = (\Delta\omega_1 - \Delta\omega_3)/\Delta\omega_1$ ) та час регулювання ( $t_p$ , при якому  $\Delta\omega \leq 5\%$  від  $\Delta\omega_1$ ).

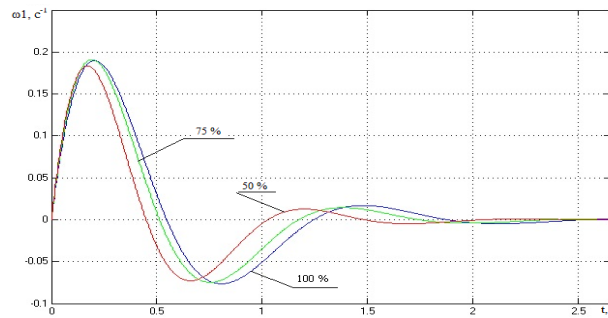
Вимоги до перехідного процесу:  $\Delta\omega_1 < 0,2 \text{ с}^{-1}$ ;  $m \approx 0,4$ ;  $\psi \geq 0,85$ ;  $t_p \leq 2 \text{ с}$ . Оптимальні налаштуваннями регулятора, які розраховані для кожного рівня навантаження, наведені в табл.2.

**Таблиця 2.**

Оптимальні налаштування регулятора для номінального і часткових навантажень ГТУ

Налаштування регулятора при навантаженні	100 %	75 %	50 %
Коефіцієнт посилення регулятора $K_p$ , % хр/с <sup>-1</sup>	0,02	0,04	0,06
Час іздрому регулятора $T_i$ , с	2,2	1,7	1,1

Результати моделювання системи керування ГТУ при вказаних навантаженнях наведені на рис.6.



**Рис. 6.** Перехідні процеси при оптимальних налаштуваннях регулятора для всіх рівнів навантаження ( $\Delta N = \pm 10\%$ )

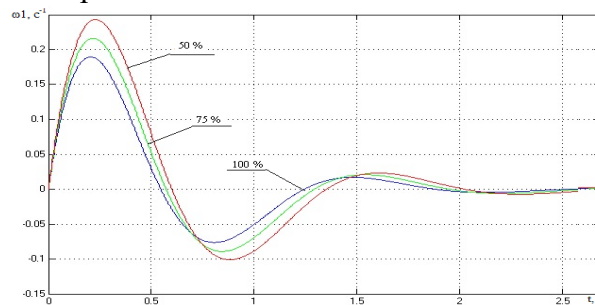
Розраховані показники якості перехідних процесів наведені у таблиці 3.

**Таблиця 3.**

Показники якості перехідних процесів при зміні навантаження

Показник ПП	$N_{\Gamma}$	100 %	75 %	50 %
Перше динамічне відхилення $\Delta\omega_1, \text{c}^{-1}$		0,190	0,187	0,183
Перерегулювання $m$		0,402	0,393	0,398
Ступінь згасання процесу $\psi$		0,91	0,92	0,93
Час регулювання $t_p, \text{c}$		1,7	1,5	1,3

З табл.3 видно, що  $\Delta\omega_1$  при зниженні навантаження зберігається практично однаковою і відповідає встановленим вимогам. Результати моделювання системи керування ГТУ при зміні навантаження і з регулятором, налаштування якого розраховані для 100% навантаження, наведені на рис.7.



**Рис. 7.** Перехідні процеси регулювання частоти обертання ротора при налаштуваннях регулятора для 100% навантаження ( $\Delta N = \pm 10\%$ )

Показники якості керування при регуляторі з налаштуванням на 75% навантаження наведені у табл. 4, з якої видно, що  $\Delta\omega_1$  при 75% і 50% навантаженні перевищило допустиме відхилення у  $0,2 \text{ c}^{-1}$  на, відповідно, 14 % і 28 %, що є неприпустимим. Також спостерігається збільшення часу регулювання.

**Таблиця 4.**

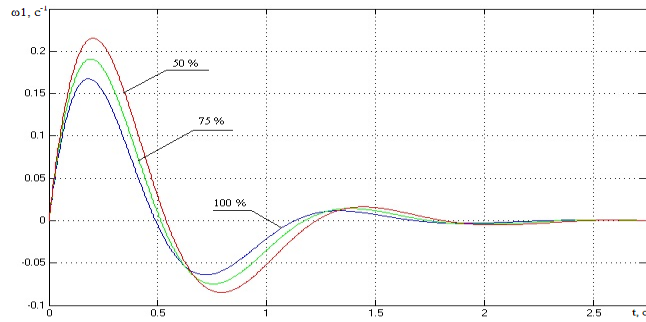
Показники якості перехідних процесів при 100% навантаженні

Показник ПП	$N_{\Gamma}, \%$	100 %	75 %	50 %
Перше динамічне відхилення $\Delta\omega_1, \text{c}^{-1}$		0,190	0,216	0,243
Перерегулювання $m$		0,402	0,41	0,41
Ступінь згасання процесу $\psi$		0,91	0,91	0,91
Час регулювання $t_p, \text{c}$		1,7	1,8	1,9

Результати моделювання системи керування ГТУ при зміні навантаження з



регулятором, налаштування якого розраховані для 75% навантаження, наведені на рис.8.



**Рис. 8.** Перехідні процеси регулювання частоти ротора ГТУ при оптимальних налаштуваннях регулятора для 75% навантаження

Показники перехідних процесів при оптимальних налаштуваннях регулятора для 75% навантаження наведено у таблиці 5.

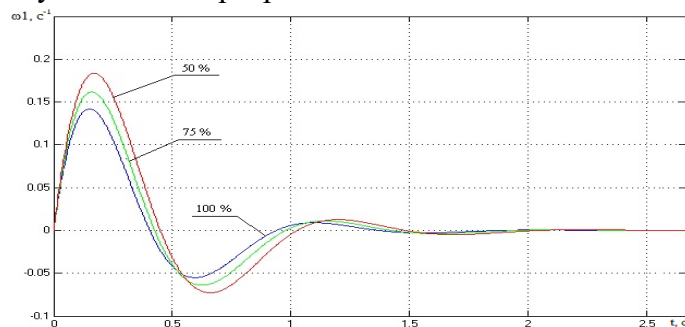
**Таблиця 5.**

Показники перехідних процесів при 75% навантаження

Показник ПП	$N_{Г}, \%$	100 %	75 %	50 %
Перше динамічне відхилення $\Delta\omega_1, c^{-1}$		0,167	0,186	0,215
Перерегулювання $m$		0,380	0,393	0,340
Ступінь згасання процесу $\psi$		0,93	0,92	0,92
Час регулювання $t_p, c$		1,45	1,5	1,6

Встановлені налаштування регулятора не забезпечують збереження частоти обертання  $\Delta\omega_1$  у заданих межах при 50 % навантаженні. У разі зростання навантаження якість регулювання підвищується через поліпшення динамічних властивостей ГТУ.

Результати моделювання системи керування ГТУ при зміні навантаження з регулятором, налаштування якого розраховані для 50% навантаження, наведені на рис.9.



**Рис. 9.** Перехідні процеси регулювання частоти при оптимальних налаштуваннях регулятора для 50% навантаження

Показники якості, розраховані для вищенаведених перехідних процесів при оптимальних налаштуваннях регулятора для 50% навантаження наведено у таблиці 6.

**Таблиця 6.**

Показники перехідних процесів при 50% навантаження

Показник ПП	$N_{Г}, \%$	100 %	75 %	50 %
Перше динамічне відхилення $\Delta\omega_1, c^{-1}$		0,142	0,162	0,183
Перерегулювання $m$		0,388	0,395	0,398
Ступінь згасання процесу $\psi$		0,94	0,93	0,93
Час регулювання $t_p, c$		1,2	1,25	1,3

З таблиці 6 видно, що при переході газотурбінної установки на навантаження 75 % і 100 % якість регулювання зростає. При навантаженні 100% відхилення  $\Delta\omega^1$  знижується на 22%, а при навантаженні 75% – на 11,5% через покращення динамічних властивостей ГТУ.

**Висновок.** У роботі встановлено, що при зниженні електричного навантаження газотурбінної установки у діапазоні від 100% до 50% змінюються її технологічні параметри, що негативно впливає на динамічні характеристики. Налаштування регулятора, які оптимізовані для роботи на 100% навантаження, не забезпечують належної якості регулювання частоти обертання ротора за умов 75% та 50% навантаження. Для досягнення оптимальних перехідних процесів у зазначеному діапазоні електричних навантажень бажано використовувати налаштування регулятора, які адаптовані до кожного конкретного режиму. У випадках частих змін навантаження від 100% до 50% слід застосовувати налаштування, оптимізовані для режиму 50% навантаження, щоб забезпечити стабільну роботу газотурбінної установки в усьому діапазоні.

#### Список літератури

1. Цьогоріч Україна значно збільшить кількість газотурбінних та біогазових установок. *Укрінформ*. 2024. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3685024-cogoric-ukraina-znacno-zbilsit-kilkist-gazoturbinnih-ta-biogazovih-ustanovok-ekspert.html>
2. Криволап К. Українська енергосистема 2023-2024: проблеми, виклики та перспективи. URL: <https://rubryka.com/blog/ukrayinska-energostema>
3. Кисельова Н.І., Погребний Я.С., Беглов К.В. Розробка автоматичної системи регулювання потужності енергоблока АЕС із ВВЕР-1000 у режимі Н. *Вчені записки ТНУ ім. Вернадського*. 2018. Т. 29(68). Ч.1. №6. С. 167–170.
4. Franco A., Casini M., Viazzo S. Gas turbines in distributed energy systems: Role, challenges, and benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. V.119. Article 109575. P. 65. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109575
5. Gulen S.C. Gas Turbines for Electric Power Generation. Cambridge University Press, 2022. P. 350.
6. Hale J., Kelly M. Opportunities and Challenges in the Gas Power Sector during Energy Transition. *Energy Policy*. 2021. Article 112435. P. 156-171. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.112435
7. Gasore G., Ahlborg H., Ntagwirumugara E., Zimmerle D.. Progress for On-Grid Renewable Energy Systems: Identification of Sustainability Factors for Small-Scale Hydropower. *Energies*. 2023. V.14(4). P. 826–846. DOI: 10.3390/en14040826
8. Проблеми встановлення газотурбінних установок – синхронізація з мережею, модернізація розподільчого обладнання. URL: <https://interfax.com.ua/news/economic/1033532-amp.html>
9. Любименко О.М., Штепа О.А. Дослідження умов роботи та витрати палива для газотурбінної установки. *Наукові праці ДонНТУ. «Електротехніка і енергетика»*. 2020. №2(23). С.65–69. URL: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2020-2-65-69>
10. De Robbio R. Micro Gas Turbine Role in Distributed Generation with Renewable Energy Sources. *Energies*. 2023. V.16. P. 704. URL: <https://doi.org/10.3390/en16020704>
11. Feng D., Xiang Y., Yang J., Liao K.i, He Z. A Gas Turbine Dynamic Model Considering Power Error Correction for Distributed Cogeneration System. *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*. 2019. Beijing, China <https://doi.org/10.1109/iSPEC48194.2019.8975095>.
12. World Energy Outlook 2023. URL: [www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023](http://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023)
13. Gasore G., Ahlborg H., Ntagwirumugara E., Zimmerle D. Progress for On-Grid Renewable Energy Systems: Identification of Sustainability Factors for Small-Scale Hydropower in Rwanda. *Energies*. 2021. V.14(4). P. 826. URL: <https://doi.org/10.3390/en14040826>
14. Todortsev Yu.K., Foshch T.V., Nikolskyi M.V. Analiz metodiv upravlin-nia potuzhnistiu

- enerhobloka z vodo-vodianym reak-torom pry manevruvani. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. 2013. №8(66). P. 3–10. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.19134>
15. Pelykh S.N., Maksimov M.V., Gontar R.L. Principles of controlling fuel-element cladding lifetime in variable VVER-1000 loading regimes. *Atomic Energy*. 2012. No. 4(112). P. 241–249.
  16. Yavorskyi O., Tarakhtii O., Maksymov M., Kryvda V. Model of gas turbine plant with concentrated parameters for analysis of dynamic properties patterns. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023. V.9. No.2. P.105–118. URL: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.02.105>
  17. ГОСТ 13109-97. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення: [Введ. 01.01.2000]. Вид. офіц. Київ, 1998.

## SIMULATING THE OPERATION OF GAS TURBINE CONTROL SYSTEMS DURING ELECTRIC LOAD MANEUVERING

M. M. Ovchinnikov, O. S. Tarakhtiy

National Odesa Polytechnic University  
1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine  
Email: [tichyk721@gmail.com](mailto:tichyk721@gmail.com)

Distributed generation is one of the key trends in the development of Ukraine's energy sector. It involves the creation of decentralized energy sources located closer to end consumers, which allows reducing losses during energy transmission and increasing energy independence. Gas turbine plants are considered as a promising solution for ensuring the stability of the Ukrainian energy system in the face of significant challenges caused by military operations and the destruction of critical infrastructure. The paper considers the advantages of using gas turbine plants for distributed generation, in particular their adaptability to crisis situations, as well as changes in the dynamic properties of gas turbine plants in transient modes depending on the nominal power of the plant. The operation of gas turbine power plant control systems under variable electrical loads is studied. Based on the analysis of transient processes in plant control systems during electrical load maneuvering, it is concluded that the best practice is to use regulators configured for the minimum permissible load, which will ensure the flexibility and reliability of the energy system.

**Keywords:** Gas turbine plant, variable loads, power system stabilization, distributed generation, control system.