

УДК 621.34:621.51

І. А. МАРИНИЧ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., О. Ю. СЕРДЮК, канд. техн. наук, ст. викл.  
Криворізький національний університет

## МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КОМПРЕСОРНОЮ УСТАНОВКОЮ З СТАБІЛІЗАЦІЄЮ ТИСКУ У ПОВІТРЯНІЙ МАГІСТРАЛІ

**Мета.** Метою даної роботи є розробка математичної моделі компресорної установки, яка включає в себе основні елементи системи: компресор, електродвигун та ресивер, що забезпечує стабілізацію тиску у повітряній магістралі та зниження енергоспоживання.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи теорії автоматичного керування для вибору і обґрунтування структури математичної моделі об'єкту керування, методи імітаційного і комп'ютерного моделювання, комп'ютерні інформаційні та програмні технології для підвищення якості керування об'єктом.

**Наукова новизна.** У роботі пропонується застосування допоміжних бібліотек MATLAB/Simulink, таких як SimPowerSystems та SimMechanics для побудови комбінованої моделі компресорної установки та створення на її основі системи візуалізації, яка дозволяє аналізувати різні режими роботи системи за допомогою зміни керуючих параметрів і графічного відображення результатів у режимі реального часу.

**Практична значимість** полягає у доцільності застосування пакету MATLAB/Simulink разом з бібліотекою SimPowerSystems для створення комбінованих моделей. Розроблена система керування та візуалізації дозволяє проводити моделювання різних режимів роботи системи шляхом зміни основних параметрів та одночасно візуально аналізувати отримані результати. Тому розроблена SCADA система може використовуватись при розробці та налаштуванні реальних систем.

**Результати.** На основі отриманих математичних моделей окремих складових, була складена загальна модель системи автоматичного керування компресорною установкою та промодельовано два режими роботи при прямому та плавному керуванні електродвигуном. Результати моделювання дозволили підтвердити припущення, що поступово збільшення тиску повітря після компресора відповідно до зростання тиску повітря у ресивері, то компресор не буде весь час працювати на максимальних обертах, а отже і не буде працювати на максимальній потужності і не буде витрачати зайву енергію. Тому можна зробити висновок що плавне управління оборотами електродвигуна можна застосовувати для зниження витрати електроенергії, що витрачається двигуном компресора, при цьому час досягнення потрібного рівня тиску в ресивері практично не змінюється.

**Ключові слова:** візуалізація, компресор, моделювання, ресивер, стабілізація, система керування, scada

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-64-70

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** Використання стисненого повітря у якості енергоносія зумовлено відносною дешевизною його вироблення і транспортування до місця призначення. Проте його виробництво не є настільки дешевим, як це може здатися, так як приблизно 5-15% електроенергії, що споживається під час вироблення стисненого повітря, витрачається на здійснення корисної механічної роботи[1]. Велика частина – 85% – це тепло, що виділяється компресором під час роботи. Це зумовлено зокрема тим, що методи керування виробництвом стисненого повітря і зберігання не завжди є раціональними, що призводить до зайвих витрат електроенергії.

Основні задачі автоматизація компресорів – забезпечення їх роботи з оптимальними техніко-економічними показниками та високою продуктивністю. При автоматизації процесу отримання стисненого повітря необхідно враховувати особливості конструкції, умови роботи і характеристики машин, які беруть участь у цьому процесі, як об'єкт автоматизації.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Сучасні компресори працюють з ефективністю, близькою до фізичної межі, і діапазон ефективності зазвичай становить не більше 10%. Це означає, що можливо різко знизити споживання електроенергії компресором, якщо розглядати не ідеальний компресор, що працює на 100% завантаження, а реальний компресор із завантаженням 20-80%. Основні резерви економії приховані в управлінні продуктивністю компресора. Крива графіка витрати стисненого повітря більшості виробничих установок коливається в залежності від часу доби, днів тижня або періодів економічного циклу[1]. Звичайні компресори не можуть точно відслідковувати коливання потреби в стисненому повітрі. Розроблено компресори із змінною швидкістю приводу, продуктивність яких може точно збігатися з витратою стиснутого повітря. Такі компресори здатні точно відслідковувати коливання витрати, змінюючи швидкість обертання приводного електродвигуна. Це головна особливість таких компресорів. Вони зменшують до мінімуму споживання енергії за рахунок того, що повністю припиняють споживати еле-

ктроенергію під час розвантаження. Це економить до 35% електроенергії, що означає економію до 22% всіх витрат за термін служби компресора. Не всі виробники використовують з частотними перетворювачами двигуни, спроектовані таким чином, щоб забезпечувати максимальну ефективність і надійність при використанні в широкому діапазоні (20-100%) завантаження компресора. Це важливо, тому що використання стандартних двигунів змінного струму обмежує робочі можливості компресора [2].

У роботі [3] проводиться дослідження в напрямку створення оптимальної системи керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів газоперекачувальних агрегатів (ГПА). Наведено теоретичне узагальнення наукової задачі, яка включає розробку нового методу оптимального керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів ГПА і на цій основі синтезовано систему керування, програмне забезпечення якої реалізує розроблені алгоритми. Проведений аналіз відомих методів оптимізації роботи газотранспортних мереж показав, що переважна більшість робіт присвячена вибору оптимальних режимів роботи трубопроводів і практично не розглядались питання оптимального керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів ГПА, виходячи із їх поточного стану.

У роботі [4] розглядається спосіб підвищення ефективності вироблення стисненого повітря за допомогою його очищення при всмоктуванні, та уже стисненого. Фазові переходи в повітрі і його перетворення в багатозфазну суміш є причинами різкого зниження загальної ефективності пневматичних систем, що виражається в збільшенні гідравлічного опору повітропроводних мереж, зниження тиску і витрати повітря для пневматичних систем і утворення твердих фаз, які здобувають роль шкідливих домішок. Також важливість очищення стисненого повітря полягає у тому, що забруднене повітря знижує довговічність пневмоприладів у 4-8 разів, а вихід з ладу через дану проблему складає до 85% від загального числа відмов. Для очищення повітря на вході в компресор поряд з такими параметрами, як тонкість очищення, робочий тиск, стабільність роботи, гідравлічний опір і ресурс роботи фільтроелементів, необхідно враховувати тип компресора. Результатами роботи є розроблена математичка модель компресорної станції з урахуванням зміни параметрів стисненого повітря під дією різних факторів, виконано підбір фільтрувальних елементів для повітря, що всмоктується, та стисненого повітря, що вже знаходиться у системі.

У роботі [5] розглядаються способи підвищення енергоефективності компресорних установок за рахунок оптимізації споживання. До питань, які порушуються у роботі, належать розрахунок термодинамічних процесів у компресорі, які залежать від положення його клапанів, розрахунок елементів пар тертя циліндро-поршневої групи компресора для переведення його на безмастильний режим, використання частотного керування електродвигуном для регулювання продуктивності компресора. Розглядається система змащування компресорних установок, яка є важливою для експлуатації компресорів, так як змащування зменшує зношування рухомих частин і знижує втрати на тертя, підвищує герметичність і охолоджує поверхні тертя. Для вирішення проблеми безпечної економічної експлуатації поршневих компресорів пропонується проводити переведення цих компресорів на роботу без змащення циліндрів і сальників. З розрахунків, наведених у роботі, випливає висновок, що є необхідність стабілізації тиску у мережі повітропостачання в межах його мінімального рівня з метою підвищення енергоефективності компресорної установки шляхом зниження витрати та вироблення стисненого повітря.

Виходячи з результатів приведених вище робіт, робиться висновок, що автоматизація процесів керування та моніторингу стану компресорних установок та мережі повітропостачання призводить до підвищення показників енергоефективності роботи установок з виробництва стисненого повітря, зокрема здатність стабільного підтримання тиску у мережі, також знижується енергоспоживання компресорних установок.

**Постановка задачі.** Завданням цієї роботи є розробка моделі системи керування компресорною установкою з метою досягнення економії енергії та стабілізації тиску у повітряній магістралі. Виконання цієї задачі потребує дослідження поведінки системи при керуванні стандартними методами, та з використанням засобів автоматизації, визначенням їх переваг перед стандартними методами. Для дослідження поведінки системи та її елементів необхідно створити математичну модель, яка поєднує у собі основні елементи, такі як компресор, асинхронний двигун, ресивер.

**Викладення матеріалу і результатів.** Переваги автоматизації у раціональному використанні можливостей компресорів та контроль за багатьма важливими параметрами, які впливають на якість повітря, яке стискається. Так витрати на виробництво стисненого повітря можна скоротити приблизно на 20% без втрат у продуктивності.

Підтримання необхідного тиску у мережі забезпечується роботою компресора в необхідних діапазонах, підтриманням необхідного тиску у ресивері для компенсації навантаження на пневматичну мережу та витоків повітря через її пошкодження [2, 6, 7].

Продуктивність компресора залежить від його обертів. Вал електродвигуна напряму з'єднаний з валом компресора, тому необхідно забезпечити керування обертами електродвигуна. Найбільш ефективний спосіб керування асинхронним електродвигуном є зміна частоти напруги живлення. З цією метою буде використовуватися частотний регулятор, для якого необхідно створити оптимальний алгоритм керування. Функціональна схема автоматизації розробляється на основі усієї системи повітропостачання, схема якої наведена на рис. 1. Схема компресорної установки складається із забірної фільтри, компресора з електромотором, охолоджувача, фільтри вологовіддільника, ресивера, манометра, кранів пневмоліній, що йдуть до споживачів.

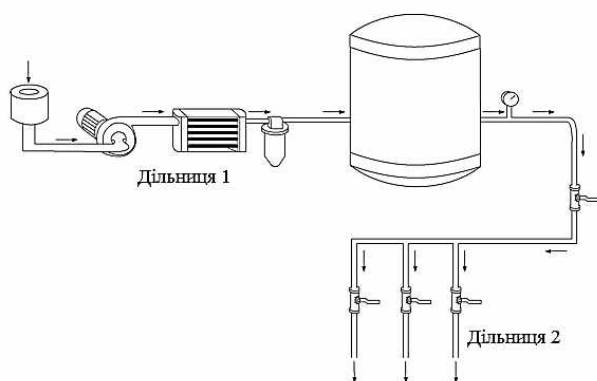


Рис. 1. Схема системи повітропостачання

Дільниця 1 відповідає за підготовку стисненого повітря. Для контролю за параметрами окремих стадій підготовки повітря встановлюються датчики тиску на вході та виході компресора. Важливим параметром стисненого повітря є його температура – чим менше температура, тим більший об'єм повітря закачається у ресивер. Тиск у ресивері вимірюється за допомогою датчика тиску, розташованого на вихідному патрубку. Керування асинхронним електродвигуном компресора здійснюється за допомогою частотного перетворювача, управління яким здійснюється із ПЛК керування компресорною установкою.

Дільниця 2 являє собою мережу споживачів, які під'єднані до повітряного трубопроводу. Данні з цієї дільниці потрібні для аналізу витрат стисненого повітря і створення оптимального алгоритму керування для компресора з метою покращення показників підтримання тиску у мережі та енергозатрат на його виробництво. Для отримання даних з другої дільниці потрібні лише датчики тиску, встановлені безпосередньо перед споживачами, які є пневмоінструментом або обладнанням з пневматичним приводом. Обробка і збір даних здійснюється місцевими ПЛК.

Математична модель компресорної станції складається з передавальних функцій таких основних елементів компресорної станції як: електродвигун, компресор, трубопровід, ресивер зі стисненим повітрям.

Модель асинхронного двигуна з частотним керуванням (рис.2) створена за відомими залежностями з використанням бібліотеки *SimPowerSystems* [8, 9], а сам компресор можна представити аперіодичною ланкою з постійною часу  $T_{\text{компр.}}$ , що визначається з його індивідуальних характеристик.

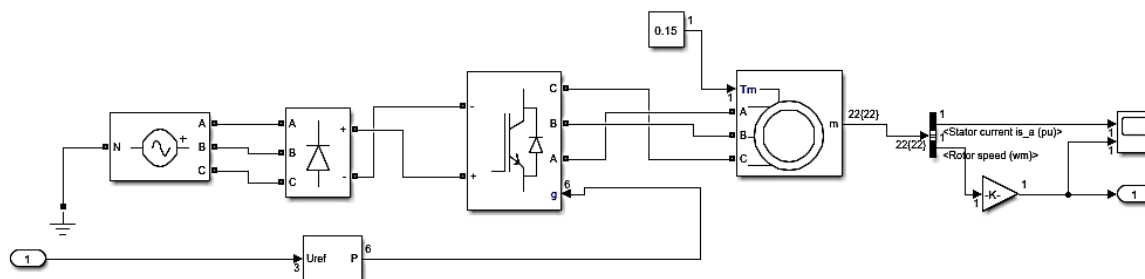


Рис. 2. Модель асинхронного двигуна з частотним керуванням

Передавальна функція ресивера отримується з наступного рівняння

$$T \frac{d\phi}{dt} + \phi = k_{0.1}\lambda - k_{0.2}\lambda_1 + k_{0.3}p_1 - k_{0.4}p_2; \quad (1)$$

$$T = \frac{V\gamma_0}{k_{ad}P_0F_0}, c; \quad k_{0.1} = \frac{\frac{\partial Q_{np}}{\partial X_1} x_{1.0}}{P_0F_0}; \quad k_{0.2} = \frac{\frac{\partial Q_{vid}}{\partial X_2} x_{2.0}}{P_0F_0}; \quad k_{0.3} = \frac{\frac{\partial Q_{np}}{\partial p_1} p_{1.0}}{P_0F_0}; \quad k_{0.4} = \frac{\frac{\partial Q_{vid}}{\partial p_2} p_{1.0}}{P_0F_0}.$$

де  $\gamma_0$  – питома вага газу,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V$  – об'єм,  $\text{м}^3$ ;  $Q_{np}$ ,  $Q_{vid}$  – витрати газу на притоці та відтоці,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $k_{ad}$  – показник адіабати;  $P_0$  – тиск у ресивері;  $X_1$ ,  $X_2$  – положення регулюючих органів;  $F_0$  – поперечний переріз магістралі,  $\text{мм}^2$ .

Якщо рахувати що тиски  $p_1$  та  $p_2$  незмінні разом з положенням регулюючого органу  $X_2$ , то рівняння (1) матиме вигляд

$$T \frac{d\phi}{dt} + \phi = k_{0.1}\lambda. \quad (2)$$

Модель асинхронного електродвигуна [8] (рис.2) та ресивера [10] (рис.3) для зручності розміщують у підсистемі з відповідними назвами. Загальний вигляд створеної моделі системи наведено на рис. 4.

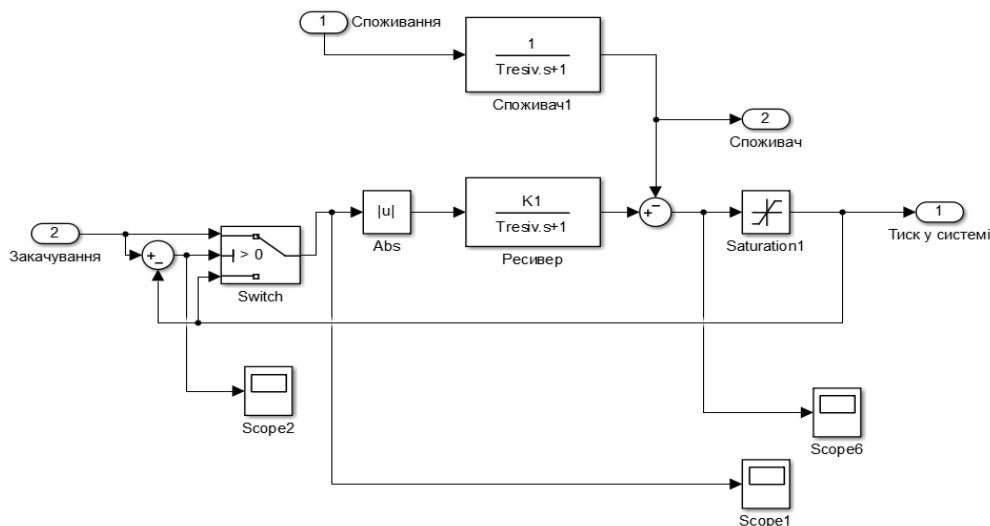


Рис. 3. Модель ресивера

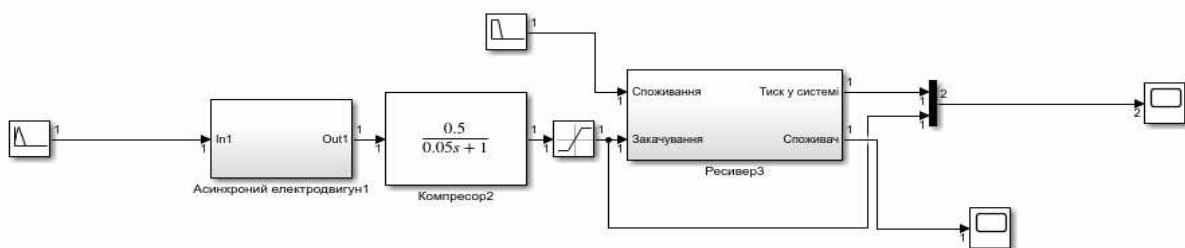


Рис. 4. Загальний вигляд моделі компресорної установки

Спочатку промодельємо роботу системи при прямому включенні електродвигуна до джерела живлення з завданням максимальної частоти живлячої напруги. На рис. 4 наведено графік перехідного процесу системи. Тиск, що створює компресор, майже відразу, приблизно за 5 секунд, досягає свого максимального значення у 23 атм. Проте у ресивері він зростає повільніше, приблизно за 220 секунд. Значення тиску практично лінійно залежить від обертів валу компресора. Отже компресор працює на максимальній потужності весь час, необхідний для заповнення ресивера. Якщо поступово збільшувати тиск повітря після компресора відповідно до зростання тиску повітря у ресивері, то компресор не буде весь час працювати на максимальних обертах, а отже і не буде працювати на максимальній потужності і не буде витрачати зайву енергію. Для того, щоб перевірити ефективність даного припущення на вхід системи подається частота напруги двигуна, що плавно зростає. Як видно з отриманих графіків на рис. 5 швидкість зростання тис-

ку у ресивері практично не змінилась. Частота живлячої напруги електродвигуна компресора ступінчасто зростала протягом 50 секунд, проте це не завадило тиску у ресивері досягти максимального значення практично за ті ж 220 секунд, що і при минулому експерименті.

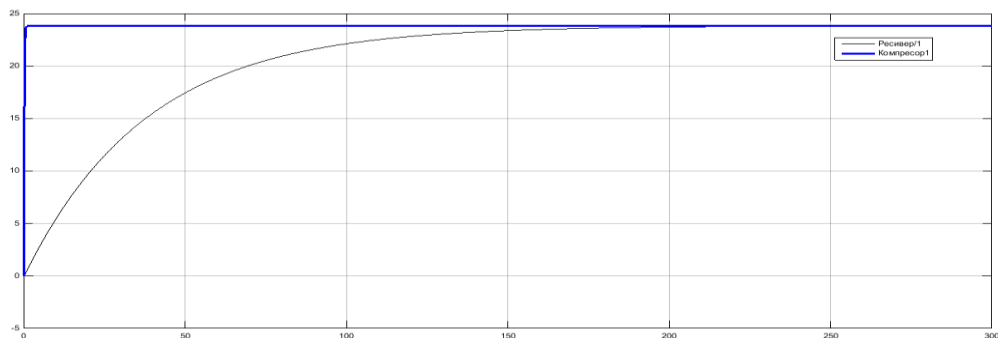


Рис. 5. Графіки зміни тиску при прямому керуванні

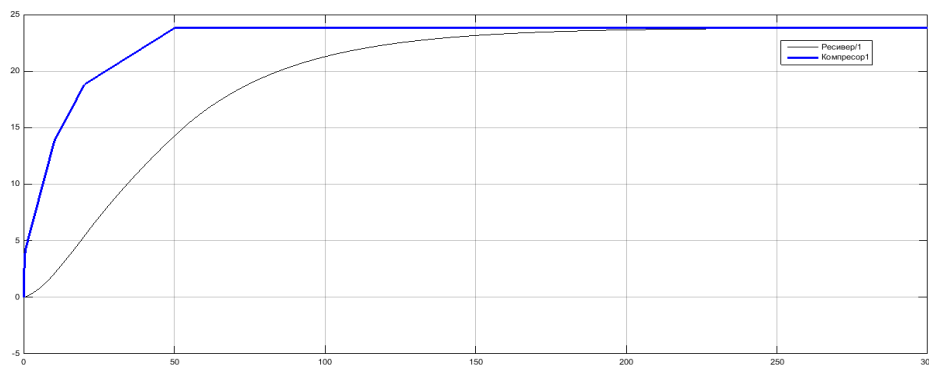


Рис. 6. Графіки зміни тиску при плавному керуванні

Можна зробити висновок що плавне управління оборотами електродвигуна можна застосовувати для зниження витрати електроенергії, що витрачається двигуном компресора, при цьому час досягнення потрібного рівня тиску в ресивері практично не змінюється. На рис. 7 наведено графіки порівняння роботи систем з двома різними способами керування.

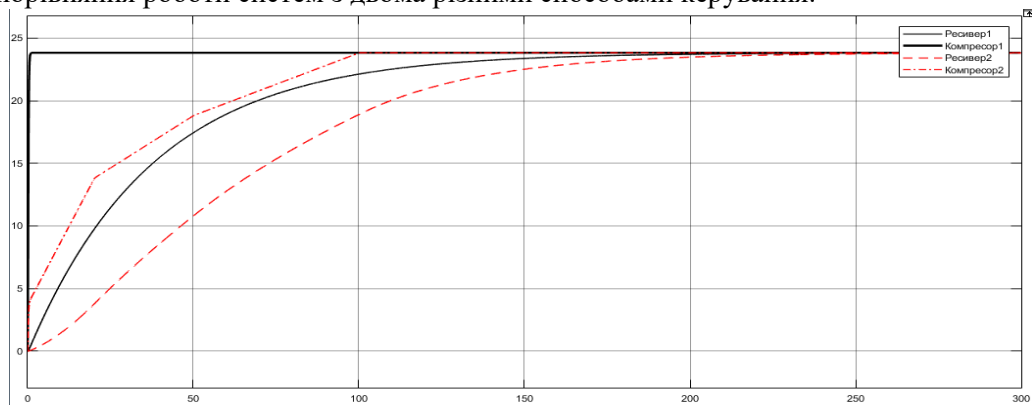


Рис. 7. Графіки двох експериментів із застосуванням прямого і плавного керування електродвигуном компресора

Як видно з графіків у діапазоні в 100 секунд електродвигун працює не на повну потужність, а отже витрачає менше електроенергії.

Для підтвердження результатів моделювання та демонстрації роботи системи, була створена SCADA/HMI-система візуалізації технологічного процесу виробництва стисненого повітря [11] у середовищі Trace Mode IDE 6, яка відповідає функціональній схемі наведених на рис.1. На рис. 8 зображено робочий екран середовища, на якому розміщено графіки обертів двигуна (об/хв), споживаної потужності електродвигуна (кВт), тиск у ресивері (атм). Також на екрані розташовані стрілочні прилади для відображення обертів валу компресора, тиску повітря у ресивері, до нього, та у системі.

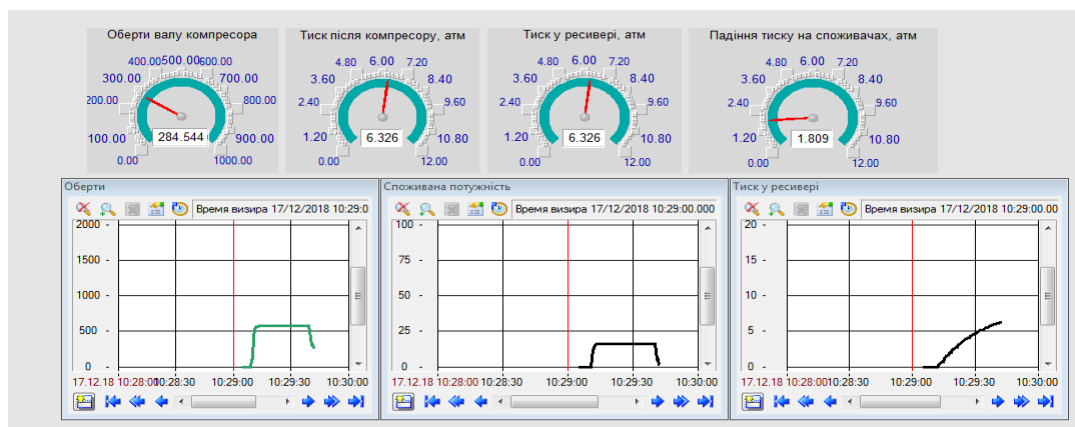


Рис. 8. Перевірка роботи візуалізації програми

Окрім індикаторів на робочому екрані зображено мнемосхему компресорної установки (рис. 9) з відображенням на ній основних параметрів, що зчитуються.

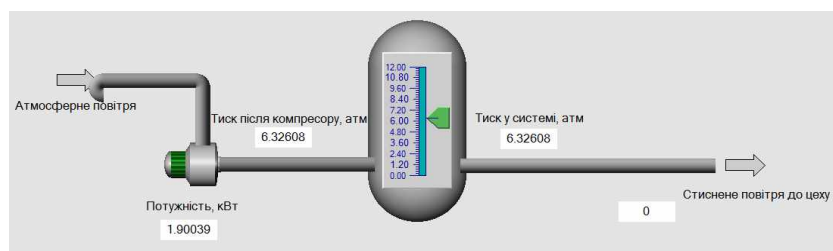


Рис. 9. Мнемосхема компресорної установки

**Висновки і напрямки подальших досліджень.** На основі розглянутих рівнянь та передавальних функцій таких об'єктів як асинхронний електродвигун, компресор та ресивер були створені математичні моделі, на основі яких була складена загальна модель системи автоматичного керування компресорною установкою та перевірено її роботу при різних вхідних впливах, а саме при прямому та плавному керуванні електродвигуном. Встановлено, що плавне керування роботою електродвигуна знижує його споживання електроенергії завдяки зменшенню часу його роботи на повну потужність. Розроблена система керування та візуалізації дозволяє проводити моделювання різних режимів роботи системи шляхом зміни основних параметрів та одночасно візуально аналізувати отримані результати. Тому розроблена SCADA система може використовуватись при розробці та налаштуванні реальних систем.

### Список літератури

1. Бондаренко Г. А., Кирик Г. В. Компресорні станції: підручник, Суми, СумДУ, 2016. – 385 с.
2. Бондаренко Г. А., Жарков П. Е. Винтовые компрессоры в системах обеспечения сжатым воздухом. Сумы : Изд-во СумГУ, 2003. – 134 с.
3. Ковалів С. О. Оптиміальне керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів: дис. канд. техн. наук по спец. 05.13.07, Івано-Франківськ, Івано-Франківський НТУ нафти і газу, 2005. – 137 с.
4. Молодцов В. В. Обоснование и обеспечение энергосберегающих параметров и режимов работы рудничных компрессорных установок.: дис. канд. техн. наук по спец. 05.05.06, Екатеринбург, Уральский гос. гор. ун-т., 2008.- 140 с.
5. Рутковский Ю. А., Рутковский А. Ю. Пневмоэнергетические системы промышленных предприятий: учеб. пособие. Алчевск, Изд-во ДонГТУ, 2008. – 517 с.
6. Воронцов А. В. Современные центробежные компрессоры, М.: Изд-во «Премиум Инжиниринг», 2007. – 140 с.
7. Нейдорф Р.А., Соловей Н. С. Теория автоматического управления в технологических системах: учебное пособие. Ухта: Институт управления, информации и бизнеса, 2005. –212 с.
8. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
9. Рушкин Е. И., Семёнов А. С. Анализ энергоэффективности системы электропривода центробежного насоса при помощи моделирования в программе MatLab // Современные наукоемкие технологии. М., 2013, № 8. – С. 341-342.
10. Изучение и составление математической модели ресивера воздуха [Электронный ресурс]:Режим доступа: <https://vunivere.ru/work13354?screenshots=1>
11. Обоснование и обеспечение энергосберегающих параметров и режимов работы рудничных компрессорных установок воздуха [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://tekhnosfera.com/obosnovanie-i-obespechenie-energoberegayuschih-parametrov-i-rezhimov-raboty-rudnichnyh-kompressornyh-ustanovok>