

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ АДМІНІСТРАТИВНОЇ БУДІВЛІ
З КІНЕТИЧНИМ ЕНЕРГОНАКОПИЧУВАЧЕМ**Н. П. Савченко**

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

вул. Героїв Небесної Сотні, 14, м. Краматорськ, 84333, Україна. E-mail: natali_a_savchenko@ukr.net

С. Ю. Шевченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: syurik42@gmail.com

Запропоновано структурну схему підключення кінетичних енергонакопичувачів у систему електропостачання адміністративної будівлі з метою регулювання графіків навантаження. Проведено аналіз роботи кінетичного енергонакопичувача в системі електропостачання будівлі, визначено вплив конструкції накопичувача на величину накопиченої потужності. Запропоновано конструкцію кінетичного накопичувача з двигуном змінного струму та маховиком зі змінним моментом інерції. Виконано дослід параметрів впливу на накопичення потужності для запропонованої конструкції накопичувача та наведено загальні залежності. Запропоновано математичну модель системи електропостачання адміністративної будівлі з кінетичним енергонакопичувачем, яка дозволяє підвищити надійність і якість його електропостачання та ефективно регулювати навантаження в мережі 0,4 кВ.

Ключові слова: система електропостачання, кінетичний енергонакопичувач, графік електричного навантаження, маховик зі змінним моментом інерції, математична модель.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
АДМИНИСТРАТИВНОГО ЗДАНИЯ С КИНЕТИЧЕСКИМ ЭНЕРГОНАКОПИТЕЛЕМ**Н. А. Савченко**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

ул. Героев Небесной Сотни, 14, г. Краматорск, 84333, Украина. E-mail: natali_a_savchenko@ukr.net

С. Ю. Шевченко

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: syurik42@gmail.com

Предложена структурная схема подключения кинетических энергонакопителей в систему электроснабжения административного здания с целью регулирования графиков нагрузки. Проведен анализ работы кинетического энергонакопителя в системе электроснабжения здания, определено влияние конструкции накопителя на величину накопленной мощности. Предложена конструкция кинетического накопителя с двигателем переменного тока и маховиком с переменным моментом инерции. Выполнено исследование параметров воздействия на накопление мощности для предложенной конструкции накопителя и приведены общие зависимости. Предложена математическая модель системы электроснабжения административного здания с кинетическим энергонакопителем, которая позволяет повысить надежность и качество его электроснабжения, а также эффективно регулировать нагрузку в сети 0,4 кВ.

Ключевые слова: система электроснабжения, кинетический энергонакопитель, график электрической нагрузки, маховик с переменным моментом инерции, математическая модель.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Економічна ефективність енергосистеми багато в чому визначається характером графіка електричного навантаження (ГЕН). Загальний вигляд ГЕН визначає режим роботи енергосистеми [1]. Сучасним методом регулювання ГЕН окремих споживачів та енергосистеми в цілому є застосування систем накопичення та зберігання енергії.

Принцип побудови будь-якої системи зберігання електричної енергії заснований на використанні акумулювальних пристроїв для накопичення енергії й подальшої її видачі в мережу електропостачання споживача в міру необхідності.

Дослідження сучасних систем накопичення енергії у сфері енергетики дозволяє зробити висновок, що найбільш вивченими та поширеними є системи з електрохімічними накопичувачами, гідро- та пневмоакумулювальними установками, але не завжди їх

використання доцільне та можливе [2, 3]. Тому на сьогодні особливо актуальним є вивчення питання по застосуванню пристроїв накопичення енергії, що працюють за принципом накопичення кінетичної енергії в обертових маховиках.

Перевагами маховика є висока екологічність, простота технічного обслуговування, масштабованість, великий термін служби (тобто велика кількість циклів зарядки-розрядки), швидкий час реакції, все це важливі характеристики для застосування у складі системи електропостачання споживачів з метою підтримки якості електроенергії та регулювання їх ГЕН [3–5].

Як розгінний двигун і засіб відбору електроенергії у кінетичних енергонакопичувачах (КЕН) використовується звичай вертикальний двигун-генератор постійного або змінного струму [2].

Спрошену структуру КЕН з різними типами дви-

гунів для системи електропостачання споживача, а саме адміністративної будівлі, наведено на рис. 1 [6].

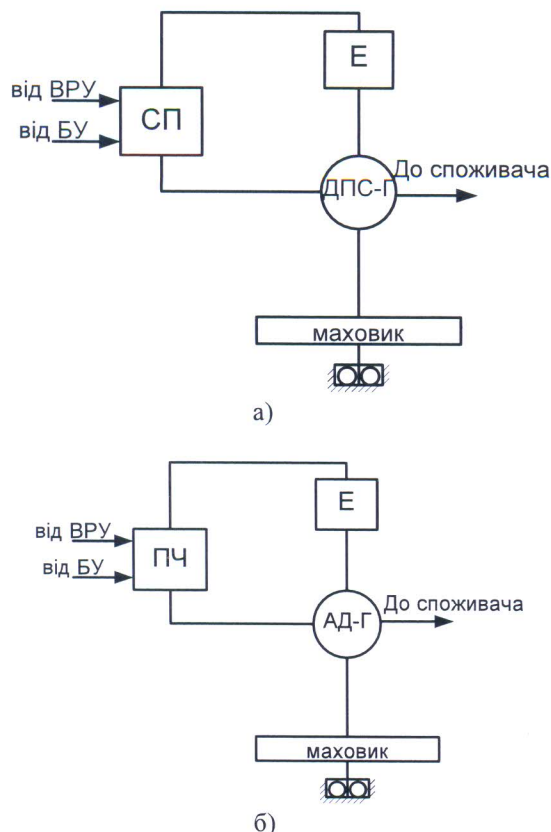


Рисунок 1 – Структурна схема КЕН: а) з двигуном постійного струму; б) з асинхронним двигуном

Електродвигун і перетворювач частоти (ПЧ), або сервоперетворювач (СП), працюють у замкнутій системі (зі зворотним зв'язком). За необхідності зарядки КЕН блок управління (БУ) КЕН подає відповідний сигнал ПЧ або СП для запуску і відбувається розгін маховика із заданими параметрами часу розгону. Після повного розгону маховика ПЧ (СП) підтримує його стабільне обертання за допомогою зворотного зв'язку з датчиком кута повороту – енкодером (Е) [6].

Схема КЕН з асинхронним двигуном має переваги у застосуванні, пов'язані з меншими втратами енергії у двигуні порівняно з ДПС.

Під час застосування маховиків у складі КЕН невеликої потужності для зберігання енергії, регулювання і симетрування навантаження громадських будівель [5] основними параметрами є простота конструкції, надійність, довговічність і невисока вартість, у цьому разі необхідно звести до мінімуму процес биття маховика під час обертання, викликаного відцентровою силою [7].

Аналіз наявних конструктивних рішень щодо складу, технічних характеристик та призначення маховика дозволяє зробити висновок, що для досягнення поставлених цілей найкращим варіантом є маховики зі змінним моментом інерції. Вони мають такі переваги [7]:

1) маховики зі змінним моментом інерції помітно покращують пускові характеристики двигунів;

2) маховики зі змінним моментом інерції полегшують умови реалізації лінійних законів керування;

3) маховики зі змінним моментом інерції порівняно зі звичайними маховиками мають великі можливості у реалізації різних законів керування.

Тому у складі КЕН пропонується використовувати маховик з дисбалансними вантажами та змінним моментом інерції [7] (рис. 2).

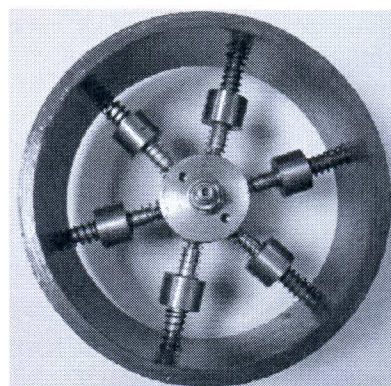


Рисунок 2 – Маховик з дисбалансними вантажами та змінним моментом інерції

Збільшення рівня початкової кінетичної енергії в запропонованій конструкції маховика забезпечується змінним моментом інерції та підвищенням швидкості обертання.

Розглянута конструкція КЕН є оптимальною системою зберігання для системи електропостачання будівлі.

Математична модель системи зберігання електроенергії дозволяє формалізувати конкретне завдання взаємодії всіх елементів системи електропостачання адміністративної будівлі й виконати оптимізацію цієї системи електропостачання з урахуванням графіка навантажень споживача, що робить цю роботу актуальною [8].

Питання побудови математичних моделей систем електропостачання споживачів з акумулювальними пристроями відображені в багатьох роботах вітчизняних і зарубіжних учених. У більшості публікацій висвітлюються питання моделювання та оптимізації автономних систем електропостачання з різними акумулювальними пристроями [8–10]. Також ведуться дослідження математичних моделей енергосистеми, що містить акумулювальні станції регулювання навантаження, вони відображені в роботах [11–13].

Метою цього дослідження є розробка математичної моделі системи електропостачання адміністративної будівлі із застосуванням запропонованої конструкції кінетичного енергонакопичувача за умови випадкового характеру навантаження споживача протягом доби.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Об'єктом дослідження і моделювання є система

електропостачання адміністративної будівлі, а саме корпусу навчального закладу. Добові графіки електричних навантажень навчальних корпусів мають такі особливості: наявність екстремумів, які обумовлюють ранкові й вечірні максимуми, а також денні та нічні мінімуми. На відміну від житлових будівель навантаження навчальних корпусів має найбільші значення в ранкові години і ранковий максимум перевищує вечірній. Вечірній максимум виражений слабо й іноді взагалі не спостерігається. Ранковий максимум у часі спостерігається в період з 7 до 11:00 годин. Вихідні дні відрізняються зменшенням енергоспоживання потужності. У суботні дні основне навантаження зосереджене в ранкові години, вечірній максимум не спостерігається зовсім або слабо виражений. У недільні дні навантаження мінімальне [14]. Добові ГЕН навчального корпусу наведені на рис. 3.

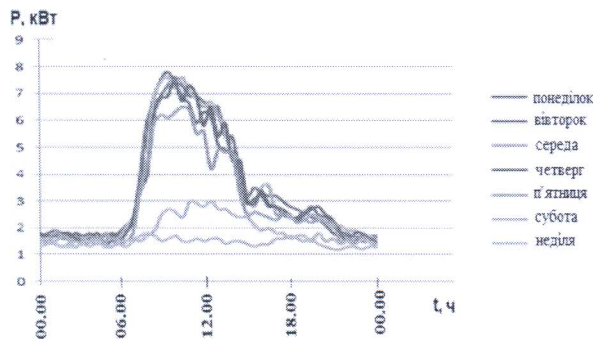


Рисунок 3 – Добові ГЕН навчального корпусу упродовж тижня

Як видно з рис. 3, навантаження протягом доби носять випадковий характер, що залежить від розкладу навчальних занять, сезонних коливань температури, тривалості світлового дня, природної освітленості, належності доби до певного типу дня, тижня.

Для забезпечення надійності електропостачання та регулювання ГЕН у систему електропостачання будівлі підключається кінетичний енергонакопичувач, особливістю якого є маховик змінного моменту інерції [7].

Структурну схему моделі системи електропостачання будівлі, що враховує моделі пристроїв генерації, передачі, перетворення й розподілу енергії, наведено на рис. 4.

Робота здійснюється в такий спосіб: у разі низького навантаження будівлі, величина якого контролюється датчиком навантаження, установленим на лінії живлення будівлі, відбувається автоматична зарядка КЕН. Під час збільшення навантаження в будівлі блок керування (МБУ) переводить інвертор у режим генерації синхронно з мережею, підживлюючи будівлю, після зниження навантаження відбувається відключення інвертора і підзарядка КЕН [8].

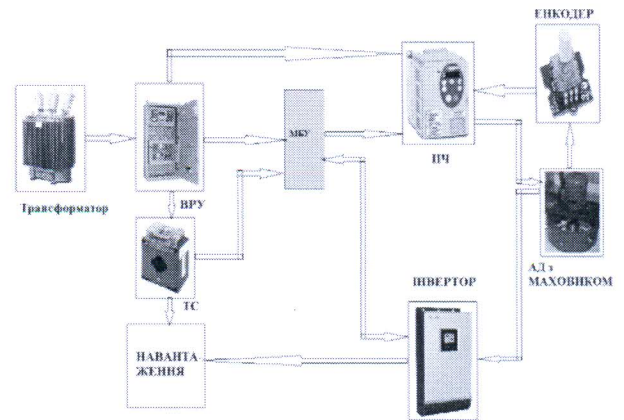


Рисунок 4 – Структурна схема моделі системи електропостачання будівлі

Датчиком струму можуть слугувати штатні трансформатори струму, встановлені у ввідному вузлі обліку електроенергії. Як блок керування (МБУ) можна використовувати програмований логічний контролер (ПЛК) з декількома аналоговими входами і виходами. За необхідності з'єднання із системами накопичення енергії в інших будівлях або РЕМ можна застосувати контролер з Ethernet каналом керування [6].

Математичний опис розподілу енергії в СЕС будівлі може бути надано такими співвідношеннями.

1. Найбільша потужність, накопичена КЕН з маховиком запропонованої конструкції, залежить від його маси, геометричних розмірів і швидкості обертання [3].

За допущенням, що статичний момент $M_{CT} = 0$, маємо [15]:

$$P_{\text{макс. КЕН}}(t) = M_{\text{дин. макс}} \omega_{\text{макс}}(t), \quad (1)$$

де $M_{\text{дин. макс}}$ – максимальний динамічний момент, створюваний маховиком [16]:

$$M_{\text{дин. макс}} = J_{\text{КЕН}} \omega_{\text{макс}}(t); \quad (2)$$

$\omega_{\text{макс}}(t)$ – максимальна кутова швидкість, що розвивається маховиком; $J_{\text{КЕН}}$ – момент інерції КЕН [17]:

$$J_{\text{КЕН}} = J_{\text{ад}} + J_o + \Delta J_{\text{о. в.}}, \quad (3)$$

де $J_{\text{ад}}$ – момент інерції асинхронного двигуна; J_o – момент інерції тонкостінного обода маховика зі шпильками і втулкою [15]:

$$J_o = \rho \pi \psi_b D_1^5 \frac{1 - \psi_D^4}{32}, \quad (4)$$

де ψ_b , ψ_D – коефіцієнти ширини та діаметра маховика відповідно; D_1 – максимальний зовнішній діаметр; $\Delta J_{\text{о. в.}}$ – приріст моменту інерції дисбалансних вантажів, які входять у конструкцію маховика зі змінним моментом з урахуванням, що дисбалансні вантажі відносно ободу знаходяться у стані спокою [18]:

$$\Delta J_{\partial, \epsilon} = \frac{6m_{\partial, \epsilon} \left[(r + \Delta r)^2 - r^2 \right]}{2}, \quad (5)$$

де $m_{\partial, \epsilon}$ – маса дисбалансного вантажу; Δr – віддалення вантажу від вихідного стану уздовж шпильки; r – радіус початкового стану вантажів уздовж шпильки.

Остаточно найбільша потужність, накопичена КЕН з маховиком змінного моменту інерції, складе:

$$P_{\max \text{ КЕН}}(t) = (J_{\text{АД}} + J_{\text{м}} + \Delta J_{\partial, \epsilon}) \omega_{\max}^2(t). \quad (6)$$

Або

$$P_{\max \text{ КЕН}}(t) = \left(J_{\text{АД}} + \rho \pi \psi_b D_1^5 \frac{1 - \psi_D^4}{32} + 3m_{\partial, \epsilon} \left[(r + \Delta r)^2 - r^2 \right] \right) \omega_{\max}^2(t). \quad (7)$$

Навантажувальну діаграму роботи КЕН у загальному вигляді наведено на рис. 5.

На діаграмі $t_{\text{заряду КЕН}}$, $t_{\text{зберігання КЕН}}$, $t_{\text{розряду КЕН}}$ є змінними величинами часу й можуть регулюватися з метою отримання необхідного режиму роботи КЕН, вони цілком залежать від швидкості обертання асинхронного двигуна.

2. Функція потужності визначиться як [2]

$$P_{\Sigma}(t) = P_m(t) - \sum \Delta P(t) - P_n(t), \quad (8)$$

де $P_n(t)$ – навантаження споживача (адміністративної будівлі); $\sum \Delta P(t)$ – сумарні електричні втрати СЕП:

$$\sum \Delta P(t) = \Delta P_m + \Delta P_{\text{ЛЕП}} + \Delta P_{\text{тв}} + \Delta P_{\text{мс}} + \Delta P_{\text{КЕН}}, \quad (9)$$

де ΔP_m , $\Delta P_{\text{ЛЕП}}$, $\Delta P_{\text{тв}}$, $\Delta P_{\text{мс}}$, $\Delta P_{\text{КЕН}}$ – електричні втрати у трансформаторі, лінії електропередач, інверторі, трансформаторі струму і КЕН відповідно.

Математична модель обміну енергією СЕП з КЕН має вигляд:

– фаза накопичення енергії:

$$P_{\Sigma}(t) = \begin{cases} P_{\Sigma}(t) - P_{\text{КЕН}}(t), \\ \text{якщо } P_n(t) \rightarrow \min, P_{\text{ГЕН}}(t) = P_n(t) + P_{\text{КЕН}}(t); \\ P_{\text{ЛЕП}}(t) - \sum \Delta P(t) - P_{\text{КЕН}}(t), \\ \text{якщо } P_n(t) = 0, P_{\text{ГЕН}}(t) = P_{\text{КЕН}}(t); \\ 0, P_{\text{ГЕН}}(t) = P_n(t) = P_{\text{КЕН}}(t) = 0; \end{cases} \quad (10)$$

– фаза передачі енергії:

$$P_{\Sigma}(t) = \begin{cases} P_{\Sigma}(t) + P_{\text{КЕН}}(t), \\ \text{якщо } P_n(t) \rightarrow \max, P_{\text{ГЕН}}(t) = P_n(t) - P_{\text{КЕН}}(t); \\ P_{\text{ЛЕП}}(t) - \sum \Delta P(t), \\ \text{якщо } P_n(t) = 0, P_{\text{ГЕН}}(t) = 0; \\ 0, P_n(t) = P_{\text{КЕН}}(t), P_{\text{ГЕН}}(t) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Згідно з отриманими виразами (10) і (11), на рис. 6 наведено середньодобові ГЕН адміністративної будівлі з КЕН.

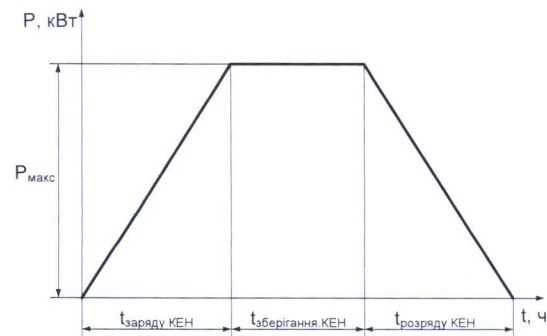


Рисунок 5 – Навантажувальна діаграма КЕН

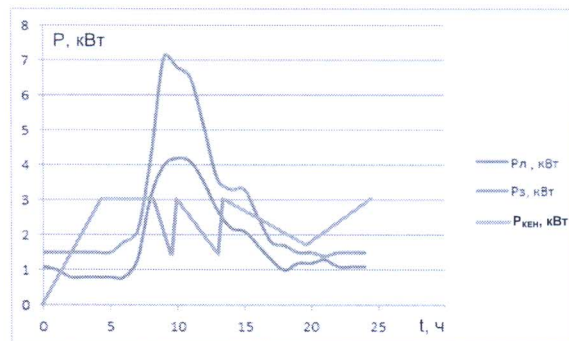


Рисунок 6 – Середньодобові літні та зимові ГЕН адміністративної будівлі з КЕН

Якщо скласти ГЕН будівлі й навантажувальну діаграму КЕН, то отримаємо ГЕН, який буде мати більш рівномірний характер. Отже, задаючи закон роботи КЕН, маємо можливість ефективно регулювати ГЕН, що призведе до зменшення втрат у СЕП.

ВИСНОВКИ. Запропоновано структурну схему підключення кінетичних енергонакопичувачів у систему електропостачання адміністративної будівлі з метою регулювання графіків навантаження. У разі обґрунтованого вибору вказаного обладнання можливо використання як у системах електропостачання будівель, підключених до електромережі 0,4 кВ, так і у складі автономних систем електропостачання.

Проведено аналіз роботи КЕН різних конструкцій у системі електропостачання адміністративної будівлі, на підґрунті якого був зроблений висновок про доцільність та ефективність використання КЕН з АД та маховиком з дисбалансними вантажами та зі змінним моментом інерції.

Виконано дослід параметрів впливу на накопичення потужності для запропонованої конструкції накопичувача та виявлено, що потужність, накопичена КЕН з маховиком запропонованої конструкції, залежить від його маси, геометричних розмірів і швидкості обертання. Виведено залежність накопичення потужності, яка враховує вплив усіх складових частин КЕН.

Розроблено математичну модель обміну енергією СЕП з КЕН, яка доводить, що, задаючи закон роботи КЕН, маємо можливість ефективно регулювати ГЕН адміністративної будівлі, а, відповідно і

ГЕН СЕП. Застосування отриманої моделі на практиці призведе до підвищення надійності та якості електропостачання об'єктів СЕП.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маляренко В.А., Колотило І.Д., Щербак І.Е. Потребители-регуляторы как эффективное направление регулирования графика нагрузки электрических сетей // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2014. – № 1. – С. 3–13.
2. Алексеев Б.А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2005. – № 1. – С. 42–46.
3. Ассоциация «НП Совет рынка». Исследование № 2 «Новые энергетические технологии». – Режим доступа: https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tehnologii.pdf
4. Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях // *Ползуновский вестник*. – 2013. – № 4 (2). – С. 176–181.
5. Солодовников Д.Н. Применение накопителей энергии в энергетических системах транспортных и технологических машин // *Теория и практика современной науки*. – 2017. – № 2 (20). – С. 534–537.
6. Shevchenko S.Yu., Savchenko N.A., Tretjak A.V. Managing the load schedule of the administrative building taking into account emerging risks when connecting the kinetic energy storage to the power supply system // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2017. – № 6. – С. 69–73.
7. Савченко Н.А., Третяк А.В., Шевченко С.Ю. Маховик переменного момента инерции с дисбалансными грузами // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. – 2018. – Т. 29 (68). – № 1. – С. 115–118.
8. Marchenko O.V. Mathematical modeling and economic efficiency assessment of autonomous energy systems with production and storage of secondary energy carriers // *International Journal of Low-Carbon Technologies*. – 2010. – Vol. 5. – Iss. 4. – PP. 250–255.
9. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // *Вестник ИРГТУ*. – 2015. – № 9 (104). – С. 133–139.
10. Елистратов В.В., Аронова Е.С. Моделирование работы и оптимизация параметров систем автономного электроснабжения на основе ВИЭ // *Известия российской академии наук. Энергетика*. – 2011. – № 1. – С. 119–127.
11. Tom Arne Pedersen. Bond Graph Modeling of Marine Power Systems. – Faculty of Engineering Science and Technology Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology. – 2009. – 162 p.
12. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах: учеб. пособие для электроэнергет. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 160 с.
13. Afua Mohamed, Mohamed Tariq Khan. A review of electrical energy management techniques: supply and consumer side (industries) // *Journal of Energy in Southern Africa*. – 2009. – Vol. 20. – № 3. – PP. 14–21.
14. Воронин В.А. Анализ электрических нагрузок и качества электрической энергии общественных потребителей // *Материалы XIX Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии», Секция 1: Электроэнергетика, Томск, 15–19 апреля 2013 г.* – 2013. – С. 25–26.
15. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
16. Глухов Б.В. Курс теории механизмов и машин. – Новосибирск: СГУПС, 1998. – 377 с.
17. Daoud M.I., Abdel-Khalik A.S., Massoud A., Ahmed S., Abbasy N.H. On The Development of Flywheel Storage Systems for Power System Applications // *A Survey. In Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Machines (ICEM), Marseille, France, 2–5 September 2012*. – PP. 2119–2125. doi: 10.1109/TIA.2005.851021.

MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM OF THE ADMINISTRATIVE BUILDING WITH A KINETIC ENERGY STORAGE DEVICE

N. Savchenko

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture
vul. Heroyiv Nebesnoyi Sotni, 14, Kramatorsk, 84333, Ukraine. E-mail: natali_a_savchenko@ukr.net

S. Shevchenko

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
vul. Frunze, 21, Kharkiv, 61002, Ukraine. E-mail: syurik42@gmail.com

Purpose. The purpose of this article is to develop a mathematical model of the power supply system of an administrative building with the use of a kinetic energy storage under the condition of a random load of the consumer during the day. **Methodology.** To conduct research, the theory of designing power supply systems for buildings, the theory of plotting electric load graphs, methods of the theory of electromechanical systems, methods of mathematical modeling were used. **Results.** The analysis of the kinetic energy storage in the power supply system of the building was carried out, the effect of the storage device design on the amount of accumulated capacity was determined. The construction of a kinetic storage with an AC motor and a flywheel with a variable moment of inertia is proposed. The effect of control parameters on power storage for the proposed drive design is investigated and general relationships are presented. A mathematical model of the energy exchange of the power supply system with a kinetic energy storage is

developed. **Originality.** The developed mathematical model of energy exchange of the power supply system with a kinetic energy storage proves that by setting the law of kinetic energy storage we can effectively regulate the electric load schedule of the administrative building, and accordingly the load of the power supply system. **Practical value.** The application of the obtained mathematical model in practice will lead to an increase in reliability and quality of power supply for objects connected to the 0.4 kV electric grid. References 17, figures 6.

Key words: power supply system, kinetic energy storage, electric load graph, flywheel with a variable moment of inertia, mathematical model.

REFERENCES

1. Malyarenko, V.A., Kolotilo, I.D. and Shcherbak, I.E. (2014), "Consumers-regulators as an effective direction of regulation of the load schedule of electrical networks", *Integrovani tekhnologii ta energozberezhenija*, no. 1, pp. 3–13. (in Russian)
2. Alekseev, B.A. (2005), "Application of energy storage in the electric power industry", *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost*, no. 1, pp. 42–46. (in Russian)
3. Association "NP Market Council". Research № 2 "New Energy Technologies", available at: https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tehnologii.pdf (accessed January 18, 2018)
4. Smolentsev, N.I. (2013), "Energy accumulators in local electrical networks", Vol. 4, no. 2, pp. 176–181. (in Russian)
5. Solodovnikov, D.N. (2017), "Application of energy storage devices in power systems of transport and technological machines", *Teoriya i praktika sovremennoy nauki*, Vol. 2, no. 20, pp. 534–537. (in Russian)
6. Shevchenko, S.Yu., Savchenko, N.A. and Tretjak, A.V. (2017), "Managing the load schedule of the administrative building taking into account emerging risks when connecting the kinetic energy storage to the power supply system", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, no. 6, pp. 69–73.
7. Savchenko, N.A., Tretjak, A.V. and Shevchenko, S.Yu. (2018), "A flywheel of a variable moment of inertia with unbalanced loads", *Vcheni zapysky Tavrijskogo natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: Tekhnichni nauky*, Vol. 29, no. 68, pp. 115–118. (in Russian)
8. Marchenko, O.V. (2010), "Mathematical modeling and economic efficiency assessment of autonomous energy systems with production and storage of secondary energy carriers", *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 5, Iss. 4, pp. 250–255.
9. Karamov, D.N. (2015), "Mathematical modeling of an autonomous power supply system using renewable energy sources", *Vestnik IrGTU*, Vol. 9, no. 104, pp. 133–139. (in Russian)
10. Elistratov, V.V. and Aronova, E.S. (2011), "Modeling of work and optimization of parameters of autonomous electric power supply systems based on RES", *Izvestiya rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, no. 1, pp. 119–127. (in Russian)
11. Tom Arne, Pedersen (2009), "Bond Graph Modeling of Marine Power Systems", *Faculty of Engineering Science and Technology Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology*.
12. Astakhov, Yu.N., Venikov, V.A. and Ter-Ghazaryan, A.G. (1989), *Nakopiteli energii v elektricheskikh sistemakh* [Energy accumulators in electrical systems], *Vysshaya shkola*, Moscow. (in Russian)
13. Afua, Mohamed and Mohamed, Tariq Khan (2009), "A review of electrical energy management techniques: supply and consumer side (industries)", *Journal of Energy in Southern Africa*, Vol. 20, no. 3, pp. 14–21.
14. Voronin, V.A. (2013), "Analysis of electric loads and the quality of electric power of public consumers", *Materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennye tekhnika i tekhnologii", Sektsiya 1: Elektroenergetika* [Materials of the 11th International Scientific and Practical Conference "Modern Technologies and Technologies", Section 1: Power Engineering], Tomsk, 15–19 April, 2013, pp. 25–26.
15. But, D.A., Alievsky, B.L., Mizyurin, S.R. and Vasyukevich, P.V. (1991), *Nakopiteli energii* [Energy accumulators], *Energoatomizdat*, Moscow. (in Russian)
16. Glukhov, B.V. (1998), *Kurs teorii mekhanizmov i mashin* [Course of the theory of mechanisms and machines], *SSUPS*, Novosibirsk. (in Russian)
17. Daoud, M.I., Abdel-Khalik, A.S., Massoud, A., Ahmed, S. and Abbasy, N.H. (2012), "On The Development of Flywheel Storage Systems for Power System Applications: A Survey", In *Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Marseille, France, 2–5 September, 2012, pp. 2119–2125. doi: 10.1109/TIA.2005.851021.

Стаття надійшла 14.02.2018.