

часові залежності між подіями і відповідно передбачати можливі збої у роботі обладнання [3]. Впровадження цих моделей на рівні IoT-мереж дозволяє автоматично формувати сигнали про необхідність профілактичного обслуговування, знижуючи при цьому витрати на ремонт та підвищуючи загальну ефективність виробничих процесів.

Крім того, використання хмарних платформ для централізованого зберігання та обробки даних сприяє підвищенню оперативності та точності прийняття рішень щодо технічного обслуговування [4]. Об'єднання IoT-інфраструктури із хмарними обчисленнями забезпечує можливість масштабування системи діагностики та прогнозування, що особливо актуально для підприємств із розгалуженою інфраструктурою.

Таким чином, ефективне застосування методів інтелектуальної діагностики і прогнозування відмов дозволяє значно покращити експлуатаційні характеристики систем автоматизації на базі IoT, зменшити простой обладнання та оптимізувати витрати на утримання техніки. Подальший розвиток досліджень у цьому напрямку має передбачати удосконалення алгоритмів, що використовуються, та створення інтегрованих платформ для комплексного моніторингу стану обладнання [5].

Джерела та література

1. Susto, G. A., Schirru, A., Pampuri, S., Pagano, D., & McLoone, S. (2015). Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(3), 812-820.
2. Lee, J., Kao, H. A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Proc. CIRP*, 16, 3-8.
3. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.
4. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660.
5. Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2020). Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, 81, 106522.

УДК 621.3

Н.Куземко, к.т.н., доц., В. Лазарюк, к.т.н., доц.,

Тернопільський національний технічний університет, Україна.

ВНЕСОК ІВАНА ПУЛЮЯ В СТАНОВЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ: ВІД ПРАКТИКИ ДО ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ЗНАНЬ

N. Kuzemko, Ph.D, Assoc. Prof., V. Lazaryuk, Ph.D, Assoc. Prof.,

IVAN PULUJ'S CONTRIBUTION IN ESTABLISHING THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING: FROM PRACTICE TO FUNDAMENTAL KNOWLEDGE

Розвиток електротехніки у кінці 19-ого століття відбувався шляхом накопичення знань про фізичні процеси виникнення та поширення електричної енергії. Проте, значне поширення нових відкриттів стримувалось вирішенням практичних задач та досліджень для різних електротехнічних пристроїв. Наприклад, телеграф з'явився у 1837 році, а значне поширення отримав лише в ході розвитку залізничного транспорту через 20 років. Перший практичний генератор постійного струму, динамо-машина Іполита Піксії, запрацював у 1832 році, проте динамо-машина Зеноба Грамма з самозбудженням, що була активно використана для забезпечення електроенергією перших промислових джерел світла, була винайдена у 1869 році. Фізики-експериментатори ставали по суті винахідниками нових електропристроїв.

Непересічний фізик Іван Пулюй (Johann Puluĵ), випускник Віденського університету (1872), доктор фізики Страсбурзького університету (1876), професор Німецької вищої технічної школи в Празі (1884-1916) відомий не лише епохальним винаходом першого потужного джерела Х-променів, фосфоресцентної лампи Пулюя (1881). Вчений, також, був, і винахідником чисельних електротехнічних приладів. Зокрема, основними його винаходами є: дугові та фосфоресцентні вакуумні лампи (1880-1882), лампи розжарення системи Пулюя (1883), електричний вентиль (1881), телетермометр (1889), апарат для визначення коефіцієнта самоіндукції (1891), апарат для вимірювання різниці фаз між змінними струмами (1893), безпечна телефонна станція (1899), [1]. Розробки Івана Пулюя отримали визнання на світових електротехнічних виставках того часу у Парижі (1878, 1881) та Штайрі (1883).

Практичними задачами електротехніки Іван Пулюй почав займатись ще у лабораторіях Віденського університету. В 1882 році вчений очолив віденське електротехнічне бюро компанії Ganz & Co з Будапешту, де здійснював впровадження систем електроживлення та освітлення у Австро-Угорщині. В ході досліджень освітлювальних систем у 1883 році Іван Пулюй виявив [2, 3], що час горіння ламп розжарювання при роботі на змінному струмі майже вдвічі довший, ніж при використанні випрямленого струму динамо-машини. Такий практичний результат сприяв вибору інженерами будапештської компанії Ganz & Co змінного струму, як основного способу системи живлення ламп розжарювання та розробці ними у 1885 році нової струморозподільчої системи на основі індукційного апарату з замкнутим магнітопроводом – трансформатора, [4]. Напрацюваннями компанії Ganz & Co скористався також після перебування на заводі компанії у Будапешті Нікола Тесла при розробці власного індукційного генератора змінного струму, [5].

Вагомий внесок у розвиток електротехніки, зокрема теорії електромагнітного поля та аналізу електричних кіл, зробив Іван Пулюй досліджуючи теоретичні аспекти електродинаміки змінних струмів та характеристик електричних машин у 1888-1905 рр., [6-9]. Праці Пулюя з самоіндукції та електромагнітної індукції «Про чин рівноскерованих синусоїдних електрорушійних сил у провіднику з самоіндукцією», «Визначення коефіцієнта самоіндукції за допомогою електродинамометра та індуктора», «Метод виміру різниці фаз гармонічного перемінного струму і її використання для визначення самоіндукції», викладені у віденському журналі «Elektrotechnische Zeitschrift», заклали важливі теоретичні основи для створення та експлуатації трансформаторів, генераторів та електровимірювальних приладів [6, 9].

Пріоритетна наукова праця Івана Пулюя «Про чин рівноскерованих синусоїдних електрорушійних сил у провіднику з самоіндукцією» надрукована у 1891 році в журналі «Elektrotechnische Zeitschrift» у двох повідомленнях, [10, 11], присвячена розрахунку електричного кола з несинусоїдною ЕРС, яку автор називає односторонньо спрямованою. Це не є синусоїда і задача полягала в тому, як розрахувати миттєвий струм і його фазовий зсув в провіднику з самоіндукцією L і опором R . Це по суті сучасна задача розрахунку кола при дії несинусоїдної ЕРС. Пулюй проводить точний розрахунок кола, що складається з цієї ЕРС та RL -ланки. ЕРС представлена у вигляді: $e = \frac{1}{2} \frac{E_0}{R} - \frac{1}{2} E_0 \cos(\frac{4\pi}{T}t - \psi)$, тобто фактично розкладена у ряд Фур'є, що містить лише постійну складову та другу гармоніку. Дія кожної з двох складових є незалежною. Далі Іван Пулюй показує, що постійна складова струму відповідає принципу суперпозиції, тобто її можна отримати, поділивши постійну складову ЕРС на активний опір кола, а отримати гармонічну складову струму можна поділивши гармонічну складову ЕРС на повний опір кола. Таким чином, він знаходить вираз для миттєвого струму у вигляді нескінченного ряду Фур'є:

$$i = A + B_1 \cos\left(\frac{4\pi}{T}t - \psi_1\right) + B_2 \cos\left(\frac{8\pi}{T}t - \psi_2\right) + \dots,$$

$$\text{де } A = \frac{2}{\pi} \frac{E_0}{R}, \quad B_1 = \pm \frac{2}{\pi} \frac{2}{1 \cdot 3} \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (\frac{4\pi L}{T})^2}}, \quad B_1 = - \frac{2}{\pi} \frac{2}{3 \cdot 5} \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (\frac{8\pi L}{T})^2}},$$

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \frac{4\pi L}{RT} = \frac{2\omega L}{R} \quad \operatorname{tg} \psi_2 = \frac{8\pi L}{RT} = \frac{4\omega L}{R}.$$

Цей запропонований Іваном Пулюєм метод розрахунку електричного кола при дії несинусоїдної ЕРС з використанням рядів Фур'є на даний час входить до класичного курсу «Теоретичних основ електротехніки».

Важливою теоретичною роботою Івана Пулюя є також метод колових діаграм для розрахунків генераторів змінного струму (1903), [6]. Ключові роботи Іван Пулюй опублікував також українською мовою у «Записках Наукового товариства Шевченка», вперше формуючи українську термінологію з електротехніки.

Література.

1. Гайда Р., Пляцко Р. Іван Пулюй. Життя і творчість: Монографія / Р. Гайда, Р. Пляцко. – Львів: Дослідно-видавничий центр Наукового товариства ім. Шевченка, 2019. – 220 с.
2. Puluj, J. Über die elektrischen Entladungen in den Glühlampen den Anwendung hochgespannten Strömen / Dr. J. Puluj // Zeitschrift des Elektrotechnischen Vereines in Wien. – Wien : R. Spies & Co., 1883. – Jg. 1. – S. 30–33.
3. System Zipernowsky, Wechselstrommaschine // Zeitschrift des Elektrotechnischen Vereines in Wien. – Wien : R. Spies & Co., 1883. – Jg. 1. – S. 93-95.
4. Halacsy A., Fuchs G. Transformer invented 75 years ago // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems. – 1961. – Vol. 80, No. 3. – P. 121–125. – DOI: 10.1109/AIEEPAS.1961.4500994.
5. Carlson, W. B. Tesla: Inventor of the Electrical Age / W. B. Carlson. – Princeton : Princeton University Press, 2013. – 520 p.
6. Іван Пулюй. Збірник праць. / За заг. ред. проф. В. Шендеровського. — К.: Рада, і 1996,— Т. 1-2. — 712 с.
7. Воробкевич А. Ю., Рокіцький О. М., Шендеровський В. А. Математичне моделювання процесів у електричних колах при несинусоїдальних електрорушійних силах і струмах у працях І.Пулюя та його сучасників. Технічна електродинаміка. К. : Інститут електродинаміки НАНУ, 2000. №6. С. 3–6.
8. Рокіцький О.М. Іван Пулюй у світовій науці і техніці: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. іст. наук : спец.07.00.07 «Історія науки і техніки». Київ. 2002. 21 с.
9. Лавріненко О. В. Становлення та розвиток теоретичної електротехніки як науки та навчальної дисципліни на теренах України у 30-ті рр. XX ст. – початок XXI ст. – Дис. на здобуття наук. ступеня канд. Іст. Наук: спец. 07.00.07 історія науки й техніки., м. Київ, 2021. – 238 с.
10. Puluj, J. Ueber periodisch veränderliche elektromotorische Kräfte, welche in einem Leiter mit Selbstinduktion nur in einer Richtung wirken / Dr. J. Puluj // Elektrotechnische Zeitschrift. – Berlin ; München, 1891. – Jg. 12, h. 32. – S. 419–420 ; h. 33. – S. 434–435.
11. Puluj, J. Ueber die Wirkungen gleichgerichteter sinusartiger elektromotorischer Kräfte in einem Leiter mit Selbstinduktion / Prof. J. Puluj // Elektrotechnische Zeitschrift. – Berlin ; München, 1891. – Jg. 12, h. 38. – S. 498–501.