

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КЛАПАНА ВИДИХУ В АПАРАТАХ ШТУЧНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЛЕГЕНЬ

Денис Моспан

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20,
Кременчук, Полтавська область, Україна, 39600, denis.mospan@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5473-7874

Олексій Юрко

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20,
Кременчук, Полтавська область, Україна, 39600, yurkoalexe@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8244-2376

Дар'я Симоненко

магістр кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20,
Кременчук, Полтавська область, Україна, 39600, dara69834@gmail.com
ORCID: 0009-0002-8633-4855

Механічну вентиляцію легень почали застосовувати за п'ятсот років до того, як вийшла перша письмова робота, у якій наводилася вказана методологія у досліджах на тваринах. Перші відомості щодо реанімації новонароджених датують 1472 р. Також в історичних джерелах збереглися записи про рятування шахтарів із продуванням легень методом «рот у рот» у 1744 р. У XVIII ст. штучну вентиляцію почали широко застосовувати для реанімації утоплеників. Усі ці операції здійснювалися виключно вручну, а перший апарат був створений лише у 1907 р. Поштовхом до активного розвитку методики стала серйозна епідемія поліомієліту у Данії в 1952 р., коли внаслідок паралічу відчувала потребу в екстреній допомозі велика кількість пацієнтів. Побоювання повтору епідемії в інших країнах стимулювало інженерів до створення автоматизованого обладнання, яке сьогодні широко застосовується у реанімаційній медицині.

Ключові слова: електромагнітні параметри, порядок розрахунків, оптимізація, електропривод, клапан видиху, апарати штучної вентиляції легень.

Актуальність роботи. Апарати штучної вентиляції легень (ШВЛ) – це технічні пристрої, які здійснюють повітрообмін у дихальних шляхах організму. Апарати ШВЛ частіше за все використовують у критичних ситуаціях, пов'язаних із загрозою життю пацієнта. Тому ефективність і надійність їх дії напряму впливатимуть на вирішення питання збереження життя людини.

У [1] відзначено, що, за даними Міністерства охорони здоров'я, в Україні нині є близько 3,5 тис апаратів штучної вентиляції легень, що допомагають у лікуванні хворих, які цього потребують. За підрахунками проекту з контролю публічних закупівель DOZORRO, із 1 січня до 28 березня 2020 р. державні структури закупили через Prozorro 385 апаратів штучної вентиляції легень на понад 286 млн грн. Найбільше ШВЛ через Prozorro придбали в Дніпропетровській

(79), Київській (71), Херсонській (33) та Львівській (31) областях, найменше – у Рівненській, Івано-Франківській та Запорізькій. Там закупили лише по одному апарату. Важливо розуміти, що це не всі закупівлі апаратів штучної вентиляції легень для українських лікарень. Частина апаратів ШВЛ зараз купують приватним коштом. В Україні немає власного виробництва ШВЛ, тож усіх їх доставляють з-за кордону. Вони бувають різних типів. Тому і коштувати ШВЛ можуть від 25 тис грн до 1–2 млн. Найдешевші – це ті, якими обладнують машини швидкої допомоги, а найдорожчі – стаціонарні апарати з інтелектуальним керуванням. Найдорожчі апарати ШВЛ закупили у Запорізькій (2,4 млн грн), Донецькій (1,16 млн грн) та Дніпропетровській (943 тис грн) областях. Усього в країні, за даними МОЗ, є близько 4 тис ШВЛ.

Тому дослідження можливостей розроблення власних прогресивних технічних рішень та налагодження власного виробництва і оснащення медичних закладів України високоефективною медичною технікою вітчизняного виробництва, зокрема апаратів ШВЛ, є актуальним завданням.

Матеріал і результати досліджень. Для вибору оптимальних розмірів конструктивних елементів електроприводу клапана видиху (ЕКВ) необхідно вирішити задачу оптимізації.

Відповідно до призначення пристрою, який має негайно реагувати на спробу спонтанного дихання пацієнта, як критерій оптимальності доречно прийняти час перехідного процесу, за який робочий орган прийме задане положення.

За вихідні дані для розглянутої задачі оптимізації слід прийняти параметри постійного магніту (залишкова індукція, коерцитивна сила по індукції), напругу живлення, габаритні розміри. Як незалежні змінні для вирішення задачі оптимізації виступатимуть діаметр та висота магніту, довжина шару обмотки та висота обмотки, оскільки саме ці параметри однозначно визначатимуть решту параметрів і характеристики пристрою, у тому числі значення критерію оптимальності, а також показників, прийнятих як обмеження.

Оскільки зменшення значення критерію оптимальності обмежене необхідністю виконання вимог технології виготовлення та технічних умов, необхідно ввести обмежуючі значення певних

параметрів. Окрім прийнятих обмежень на незалежні змінні, слід увести обмеження на індукцію елементів магнітного кола для запобігання насиченню, а також необхідно у певному діапазоні обмежити щільність струму обмотки виходячи з режимів роботи. Тоді задачу оптимізації можна сформулювати так: потрібно знайти такі параметри елементів конструкції, як висота і діаметр магніту, довжина і висота обмотки, на множині доступних рішень, яким відповідає мінімальне значення часу позиціонування за обмежень на масогабаритні показники і величини щільності струму.

На рис. 1 представлено загальну схему розв'язку задачі оптимізації конструкції ЕКВ.

Зміст і послідовність процедур розрахунків варіантів конструкції ЕКВ визначаються його математичною моделлю, якою у цьому разі є сукупність виразів електромагнітних розрахунків, що становить таку послідовність.

Розрахунки постійного магніту. Неодимові магніти мають найбільшу магнітну силу серед усіх постійних магнітів, значно перевершують за стійкістю до розмагнічування магніти типу ЮНДК (AlNiCo), мають високу залишкову магнітну індукцію і зберігають стан намагніченості на протязі тривалого часу. Практика використання неодимових магнітів, які мають велику коерцитивну силу і, відповідно, незначну висоту, показує, що навіть коротке замикання бокових граней магніту не призводить до суттєвого змен-

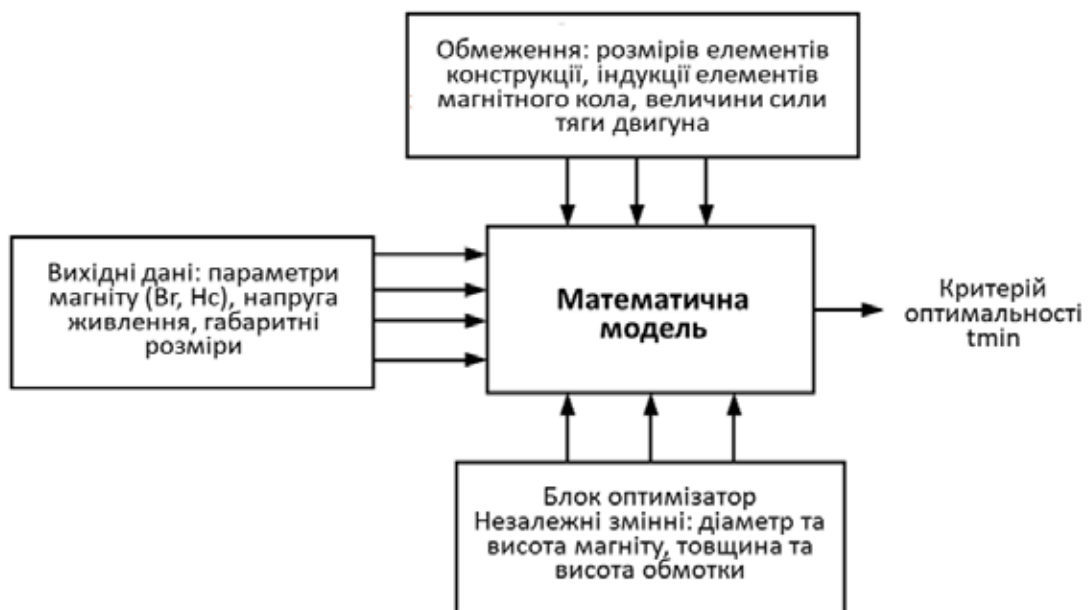


Рис. 1. Загальна схема розв'язання задачі оптимізації конструкції ЕКВ

шення корисного магнітного потоку. Тобто у цих умовах традиційна методика розрахунків постійного магніту дає великі похибки і стає неприцездатною. Це пов'язано з тим, що магнітне поле вважається рівномірним і одновимірним. Уважається, що потік розсіювання створюється не боковим шаром нейтрального перерізу, а всім нейтральним перерізом магніту. У дійсності ж частина нейтрального перерізу працює на створення корисного магнітного потоку, а інша частина нейтрального перерізу – на створення потоку розсіювання магніту.

Тому для розрахунків постійного магніту у цьому разі застосовується інженерна методика розрахунків Зільбермана, описана у [2], яка передбачає, що магнітне поле в тілі магніту розподілене нерівномірно.

Сутність інженерної методики полягає у такому:

1. Нейтральний переріз магніту розбивається на чотири зони.

2. Для кожної зони визначається область нейтрального перерізу, яка створює потік розсіювання, та область, яка створює корисний потік.

3. На підставі отриманих апроксимацій для кожної зони визначається питома провідність магнітному потоку.

4. Визначається сумарна по всіх зонах провідність корисному магнітному потоку та потоку розсіювання магніту.

5. Визначаються корисний потік, потік розсіювання, індукція у повітряному зазорі B_δ , індукція у нейтральному перерізі.

Визначення обмоткових даних. Задача розрахунків обмоткових даних полягає у визначенні діаметра дроту d , кількості витків w і опору котушки R_γ та її індуктивності L_γ , які за заданої напруги живлення забезпечують необхідну силу намагнічування. Як і під час класичного розрахунку обмоток, застосовуємо такий блок формул.

Сила намагнічування обмотки:

$$Iw = \frac{F_m}{B_\delta L_{cp} \alpha}, \quad (1)$$

де F_m – потрібне значення сили тяги електромагнітного клапану; α – коефіцієнт, який ураховує нерівномірність розподілу індукції у повітряному зазорі; L_{cp} – середня довжина витка, яку знаходять як довжину кола з радіусом, що визначається сумою радіусу феромагнітної вставки r_{ec} , ширини повітряного зазору δ , товщини стінки каркасу якоря s_γ та половини висоти обмотки $h_a / 2$.

Тоді:

$$L_{cp} = 2\pi(r_{ec} + \delta + s_\gamma + h_a / 2). \quad (2)$$

Діаметр дроту обмотки:

$$d = \sqrt{\frac{4\rho_0(1 + \alpha_t \theta)L_{cp} Iw}{\pi U}}, \quad (3)$$

де ρ_0 – питомий опір матеріалу дроту обмотки за температури 0°C ; θ – робоча температура обмотки; α_t – температурний коефіцієнт опору матеріалу дроту. Робоча температура визначається вибраним класом стійкості до нагріву ізоляції дроту обмотки (для емальованого дроту ПЕВ-1 $\theta = 105^\circ\text{C}$). Питомий опір міді за 0°C $\rho_0 = 1,58 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, температурний коефіцієнт міді $\alpha_t = 0,0041 / ^\circ\text{C}$.

Переріз даного дроту:

$$q = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (4)$$

Кількість витків у шарі:

$$w = \frac{L_\delta k_y}{d_{is}}, \quad (5)$$

де k_y – коефіцієнт укладки; L_δ – довжина обмотки, яка взаємодіє з потоком у повітряному зазорі і створює зусилля; d_{is} – діаметр дроту з урахуванням ізоляції.

Кількість шарів обмотки:

$$s = \frac{h_a k_y}{d_{is}}. \quad (6)$$

Розрахунки опору обмотки нагрітої до робочої (допустимої) температури:

$$R_\gamma = \frac{\rho_0(1 + \alpha_t \theta)L_{cp} ws}{q}. \quad (7)$$

Струм обмотки якоря і відповідна щільність струму:

$$I_\gamma = \frac{U}{R_\gamma}; j = \frac{I_\gamma}{q}.$$

Індуктивність багат шарової циліндричної обмотки [3]:

$$L_\gamma = \sum_{n=0}^{s-1} \sum_{f=0}^{s-1} \sum_{k=1}^w \sum_{m=1}^w \int_0^\pi \frac{\mu_0 \left(r_{2min} + \frac{d}{2} + h_1 n \right) \left(r_{2min} + h_1 f \right) \cos \varphi d\varphi}{\sqrt{\Xi}}, \quad (8)$$

$$\Xi = h_2^2 (m - k)^2 + \left(r_{2min} + \frac{d}{2} + h_1 n \right)^2 + (r_{2min} + h_1 f)^2 - 2 \left(r_{2min} + \frac{d}{2} + h_1 n \right) \left(r_{2min} + h_1 f \right) \cos \varphi,$$

де r_{2min} – радіус циліндричного каркасу, на якому розміщується внутрішній шар котушки; h_2 – крок намотки; h_1 – крок між сусідніми шарами котушки; k та m – порядкові номери витків у одному шарі котушки; n та f – порядкові номери шарів котушки (верхній шар прийнятий за нульовий).

Маса якоря:

$$m_{\text{я}} = m_{\text{сет}} + m_{\text{мідь}} + m_{\text{лак}} + m_{\text{штоок}}, \quad (9)$$

де $m_{\text{сет}}$ – маса каркасу якоря з діелектричного матеріалу (гетинаксу); $m_{\text{мідь}}$ – маса обмотки; $m_{\text{лак}}$ – маса ізоляції обмоткового дроту; $m_{\text{штоок}}$ – маса вихідного штоку.

Розрахунки ведуться з урахуванням густини матеріалу ρ_w .

$$m_{\text{сет}} = \rho_w \left[L_{\delta} \pi \left(\frac{D_{\text{кзов}}}{2} \right)^2 - L_{\delta} \pi \left(\frac{D_{\text{вс}}}{2} + \delta \right)^2 + h_k \pi \left(\frac{D_{\text{кзов}}}{2} \right)^2 \right], \quad (10)$$

де δ – повітряний зазор між феромагнітною вставкою і внутрішньою стінкою якоря; h_k – висота верхньої частини якоря; $D_{\text{кзов}}$ – зовнішній діаметр каркасу якоря; $D_{\text{вс}}$ – діаметр вставки.

$$D_{\text{кзов}} = D_{\text{м}} + 2\delta + 2s_{\text{я}}. \quad (11)$$

$$m_{\text{мідь}} = L_{\text{ср}} w s q \rho_{\text{вм}}. \quad (12)$$

$$m_{\text{лак}} = \left(\frac{d_{\text{іс}}^2}{4} \pi L_{\text{ср}} w s - L_{\text{ср}} w s q \right) \rho_{\text{вм}}. \quad (13)$$

$$m_{\text{штоок}} = \frac{\pi D_{\text{штоок}}^2}{4} h_{\text{штоок}} \rho_{\text{вс}}, \quad (14)$$

де $D_{\text{штоок}}$ – діаметр штоку; $h_{\text{штоок}}$ – висота штоку.

Розрахунки магнітного кола. Результатом розрахунків постійного магніту за методикою Зільбермана стає значення магнітної індукції i , відповідно, магнітного потоку у повітряному зазорі [4]. За відомого шляху замикань ліній магнітної індукції (повітряний зазор – корпус – постійний магніт – феромагнітна вставка – якір – повітряний зазор) та відповідно до загальної формули розрахунків індукції:

– індукція в стінці корпусу:

$$B_{\text{см}} = \frac{4\Phi_{\delta}}{\pi(D_2^2 - D_1^2)}; \quad (15)$$

– індукція в основі корпусу:

$$B_{\delta} = \frac{2\Phi_{\delta} k_{\sigma}}{h_{\delta} \pi D_2}; \quad (16)$$

– індукція у феромагнітній вставці:

$$B_{\text{вс}} = \frac{4\Phi_{\delta}}{\pi D_{\text{вс}}^2}. \quad (17)$$

При цьому у формулах (15) – (17) вводяться такі позначення: $D_{\text{вс}}$ – діаметр феромагнітної вставки; D_2 – зовнішній діаметр корпусу; D_1 – внутрішній діаметр корпусу; переріз основи корпусу з параметрами: висота h_{δ} і діаметр $D_{\delta} = D_2$.

Даний етап розрахунків математичної моделі призначається для контролю величини магнітної індукції у найбільш насичених ділянках магнітного кола – стінках та основі корпусу. Очевидно, що індукція не повинна перевищувати значення насичення $B_{\text{нс}}$, для чого допускається збільшення таких параметрів, як h_{δ} і D_1 з певним кроком step у рамках виконання граничних умов на габарити електромеханічного пристрою у цілому. Алгоритм виконання описаних вище умов представлений у вигляді блок-схеми на рис. 2.

Розрахунки сили струму електромагнітної системи. На підставі геометричних параметрів обмотки і допустимого рівня нагріву значення сили тяги електромагнітної системи можна визначити за виразом [5]:

$$F_m = j L_{\delta} h_a k_m B_{\delta} L_{\text{ср}} \alpha, \quad (18)$$

де j – допустиме значення щільності струму; k_m – коефіцієнт заповнення міддю.

Значення допустимої щільності струму може бути заданим відповідно до режиму роботи ЕКВ на номінальне навантаження і розраховується згідно з виразом:

$$j_m = \frac{F_c}{k_{\Phi} q},$$

де $k_{\Phi} = F_m / I_{\text{я}}$ – конструктивний коефіцієнт.

Оцінка швидкодії. Для описання динамічних властивостей електромагнітної системи можна використати спрощену модель двигуна постійного струму незалежного збудження, вважаючи, що потік у повітряному зазорі є постійним. Відмінність полягатиме у тому, що сили електромагнітної взаємодії струму якоря з полем постійного магніту створюють тягове електромагнітне зусилля F_m у площині якоря, яке призводить до поступального переміщення.

Тоді, відповідно до класичного методу аналізу перехідних процесів, вираз для перехідного струму набуде вигляду:

$$i_{\text{я}}(t) = \frac{U k_{\Phi} + F_c p_1 L_{\text{я}}}{L_{\text{я}} k_{\Phi} (p_2 - p_1)} (e^{p_2 t} - e^{p_1 t}) - \frac{F_c}{k_{\Phi}} e^{p_1 t} + \frac{F_c}{k_{\Phi}}, \quad (19)$$

де $p_{1,2}$ – корені характеристичного рівняння $T_m T_{\text{я}} p + T_m p + 1 = 0$, які визначають вид пере-

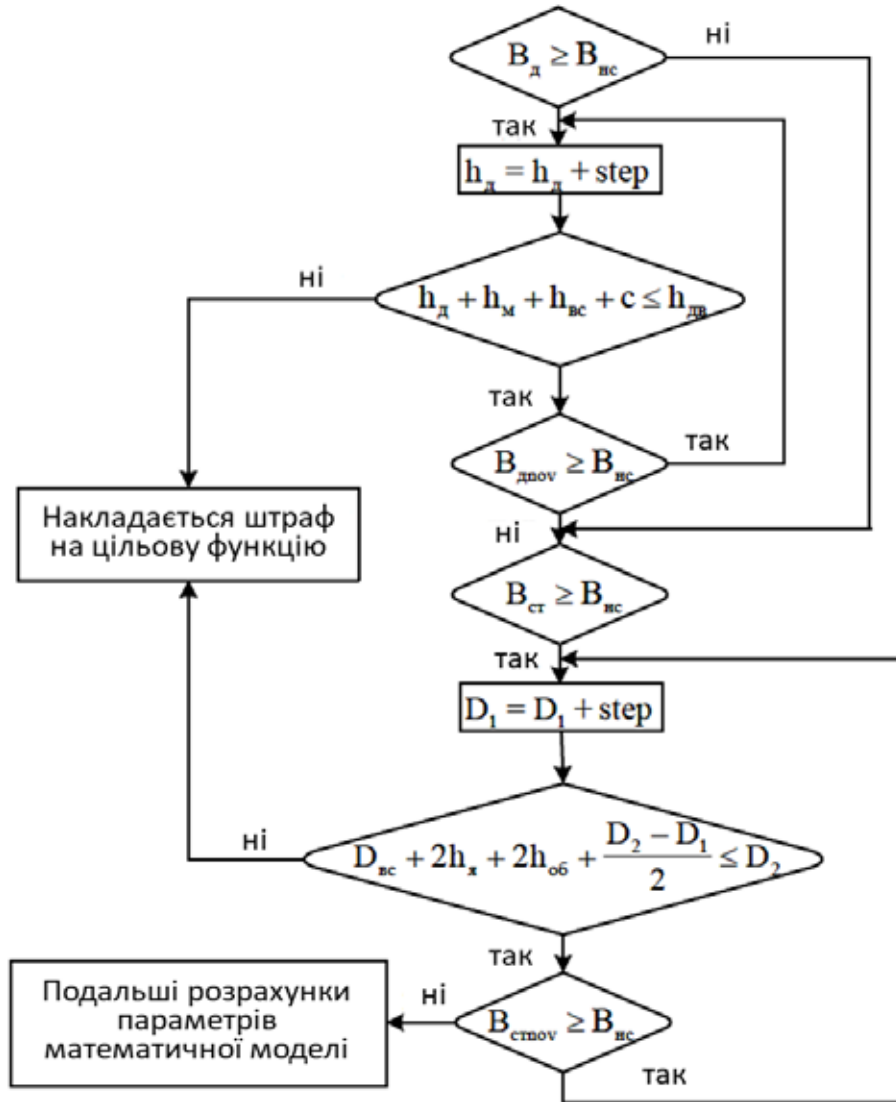


Рис. 2. Алгоритм виконання граничних умов для магнітного кола

хідного процесу. $T_m = m_y R_y / k_\Phi^2$ та $T_y = L_y / R_y$ – електромеханічна та електромагнітна сталі часу ЕКВ відповідно.

Отже, як цільову функцію, визначення мінімуму якої відповідатиме досягненню максимальної швидкодії пристрою, доречно використати найменший за модулем корінь характеристичного рівняння:

$$p_z = \frac{5}{\frac{-T_m + \sqrt{T_m^2 - 4T_m T_y}}{2T_m T_y}} \rightarrow \min. \quad (20)$$

Висновки. Представлено математичну модель, яка являє собою сукупність формул електромагнітних розрахунків і дає змогу здійснити оцінку швидкодії пристрою.

Результати проведених розрахунків дають змогу дійти висновку, що для досягнення максимальної швидкодії пристрою слід збільшувати діаметр постійного магніту до максимально допустимих значень, довжину обмоткового шару слід намагатися звести до мінімуму через те, що вона здійснює слабкий вплив на продуктивність машини, при цьому висоту обмотки і висоту магніту слід установити у певне проміжне значення, щоб щільність струму не перевищувала задану величину.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тігорчук В.С., Наумова У.О. Штучна вентиляція легень. Методика проведення штучної вентиляції легень та її функції. *Медсестринство*. 2020. № 4. С. 55–61. DOI: 10.11603/2411-1597.2020.4.11877. ISSN 2411-1597.

2. Дерещ О.Л. Конспект лекцій із дисципліни «Спеціальні електроприводи та автоматизація технологічних комплексів» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Кам'янське : ДДТУ, 2019. 96 с.

3. Місюренко В.О., Куцик А.С., Семенюк М.Б. Реалізація системи регулювання положення на базі промислового частотно-керованого асинхронного електроприводу. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2020. Т. 2. № 2. С. 27–34. DOI:10.23939/sepes2020.01s.027.

4. Новицький І.В., Ус С.А. Сучасна теорія керування : навчальний посібник. Дніпро : НГУ, 2017. 263 с. ISBN 978-966-350-661-6.

5. Системи автоматичного керування технологічними комплексами : навчальний посібник / А.М. Сільвестров та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 466 с. ISBN 978-617-95202-7-3.

6. Моспан В.О., Моспан Д.В. Окремі аспекти застосування електроніки в медицині. *Prospects and*

priorities of research in science and technology : collective monograph. Czech technical University in Prague. Riga : Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2020. Vol. 2. 320 p. ISBN 978-9934-26-008-7. DOI: 10.30525/978-9934-26-008-7.2-8.

7. Моспан Д.В., Драгобецький В.В., Невлюдов І.Ш., Костін В.В. До визначення параметрів системи автоматичного керування технологічним процесом вільного формування. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2022. Вип. 3–4(59). С. 64–69. DOI: 10.30929/2072-2052.2022.3-4.59.64-69.

8. Комп'ютеризований практикум з моделювання фізичних процесів / Д.В. Моспан та ін. *Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського*. 2022. Вип. 6(137). С. 29–35. DOI: 10.32782/1995-0519.2022.6.3.

9. Моспан Д.В., Кухаренко Д.В., Юрко О.О. Електронні та оптоелектронні прилади. Збірник задач : навчальний посібник. Кременчук : Кременчуцька міська типографія, 2022. 136 с. ISBN 978–617–641–092–8.

CALCULATION OF THE ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF THE ELEMENTS AND OPTIMIZATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE EXHALATION VALVE IN VENTILATORS

Denys Mospan

Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Engineering and Electronics

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600, denis.mospan@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5473-7874

Oleksii Yurko

Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Engineering and Electronics

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600, yurkoalexe@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8244-2376

Daria Symonenko

Master at the Department of Computer Engineering and Electronics

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600, dara69834@gmail.com

ORCID: 0009-0002-8633-4855

Mechanical ventilation of the lungs began to be used five hundred years before the first written work was published, in which the specified methodology was presented in experiments on animals. The first information on resuscitation of newborns dates back to 1472. Also, in historical sources, there are records of the rescue of miners with mouth-to-mouth ventilation in 1744. In the 18th century, artificial ventilation began to be widely used to resuscitate drowned people. All these operations were performed exclusively manually, and the first device was created only in 1907. The impetus for the active development of the technique was a serious polio epidemic in Denmark in 1952, when a large number of patients felt the need for emergency help due to paralysis. Fear of a recurrence of the epidemic in other countries stimulated engineers to create automated equipment, which is currently widely used in resuscitation medicine.

Key words: electromagnetic parameters, order of calculations, optimization, electric drive, exhalation valve, ventilators.

REFERENCES

1. Titorchuk V.S., Naumova U.O. Shtuchna ventyliatsiia lehen. Metodyka provedennia shtuchnoi ventyliatsii lehen ta yii funktsii. *Medsestrynstvo*. 2020. № 4. S. 55–61. DOI: 10.11603/2411-1597.2020.4.11877. ISSN 2411-1597.
2. Derets O.L. Konspekt leksii z dystsypliny «Spetsialni elektropryvody ta avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh kompleksiv» dlia zdobuvachiv vyshchoi osvity pershoho (bakalavrskoho) rivnia zi spetsialnosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika». Kamianske: DDTU, 2019, 96 s.
3. Misiurenko V.O., Kutsyk A.S., Semeniuk M.B. Realizatsiia systemy rehuliuвання polozhennia na bazi promyslovoho chastotno-kerovanoho asynkhronnoho elektropryvodu. *Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy*. Natsionalnyi universytet Lvivska politekhnika T.2, № 2, 2020. S. 27–34. DOI: 10.23939/sepes2020.01s.027.
4. Novytskyi I.V., Us S.A. Suchasna teoriia keruvannia: navch. posib. Dnipro: NHU, 2017. 263 s. ISBN 978-966-350-661-6.
5. Silvestrov A.M., Ostroverkhov M.Ya., Shefer O.V., Ladik N.A., Zimenkov D.K. Systemy avtomatychnoho keruvannia tekhnolohichnymy kompleksamy: navchalnyi posibnyk. K.: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. 466 s. ISBN 978-617-95202-7-3.
6. Mospan V.O., Mospan D.V. Okremi aspekty zas-tosuvannia elektroniky v medytsyni. Prospects and priorities of research in science and technology: Collective monograph. Czech technical University in Prague. Riga: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2020. Vol. 2. 320 p. ISBN 978-9934-26-008-7. DOI: 10.30525/978-9934-26-008-7.2-8.
7. Mospan D.V., Drahobetskyi V.V., Nevliudov I.Sh., Kostin V.V. Do vyznachennia parametriv systemy avtomatychnoho keruvannia tekhnolohichnym protsesom vilnoho formoutvorennia. *Naukovo-vyrobnychi zhurnal «Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy»*. Kremen-chuk: KrNU, 2022. Vypusk 3–4(59). S.64-69. DOI 10.30929/2072-2052.2022.3-4.59.64-69.
8. Mospan D.V., Perekrest A.L., Kukharenko D.V., Yurko O.O., Vadurin K.O. Kompiuteryzovanyi praktykum z modeliuвання fizychnykh protsesiv. *Visnyk KrNU im. Mykhaila Ostrohradskoho*. Kremen-chuk: KrNU, 2022. Vypusk 6(137). S. 29–35. DOI: 10.32782/1995-0519.2022.6.3.
9. Mospan D.V., Kukharenko D.V., Yurko O.O. Elek-tronni ta optoelektronni prylady. Zbirnyk zadach. Navchalnyi posibnyk. Kremen-chuk: TOV «Kremenchutska miska typohrafiia», 2022. 136 s. ISBN 978–617–641–092–8.

Стаття надійшла 15.06.2023