

## Навчально-методичні матеріали до самостійної роботи.

### Індивідуальні завдання з дисципліни

#### Чисельні методи розрахунку електромагнітних параметрів і характеристик електричних машин

#### **Формування розрахункової моделі трифазного асинхронного двигуна для програмного середовища FEMM і визначення його електромагнітних параметрів**

Зміст завдання: побудувати в програмного середовища FEMM фізико-геометричну модель **трифазного асинхронного двигуна (ТАД)**, розрахувати його магнітне поле, отримати низку графічних ілюстрацій і його електромагнітних параметрів.

Для підготовки до виконання завдання необхідно познайомитися з теоретичними матеріалами у файлі «Теория\_ТАД\_Lua», а також з матеріалами практичної роботи у файлі «Mod\_TAD\_Progr\_Lua».

Побудова фізико-геометричної моделі здійснюється у «ручному» режимі, але дії виконуються такі самі, як в автоматичному режимі, програма якого є у файлі «Mod\_TAD\_Progr\_Lua».

Кожний студент отримує параметрами конкретного ТАД за його варіантом, наданим у файлі типу Блокнот з назвою N\_Dan\_Mod\_TAD\_PN\_p, де N – номер варіанта, PN – номінальна потужність, p – кількість пар полюсів.

Номера варіантів задачі 2 такі самі, як і у задачі 1.

Окрім індивідуального файлу усім розсилається архів «Обеспечение\_задачи\_2\_ТАД», де є файл 0\_Dan\_Mod\_TAD\_15\_2 з даними тестового варіанту та методичними рекомендаціями щодо побудови фізико-геометричної моделі ТАД, а також є файли, призначення яких пояснено в файлі з тестовим варіантом.

Прикладом і обсяг виконання завдання аналогічні роботі з ТАД\_15\_02, процес виконання якої було розглянуто на заняттях і тестові результати якої було розіслано студентам.

Результати роботи студенти повинні оформити як другу частину звіту про розрахункове завдання відповідно з встановленими правилами.

Перелік графічної інформації, а також електромагнітні параметри ТАД, які треба опрацювати і надати у звіті, надано нижче за текстом у додатку.

# НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ І ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

MS Office 365 Class Notebook Чисельні методи розрахунку електромагнітних параметрів і характеристик електричних машин

## ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВІ РОЗРАХУНКИ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

### Об'єкт для демонстрацій

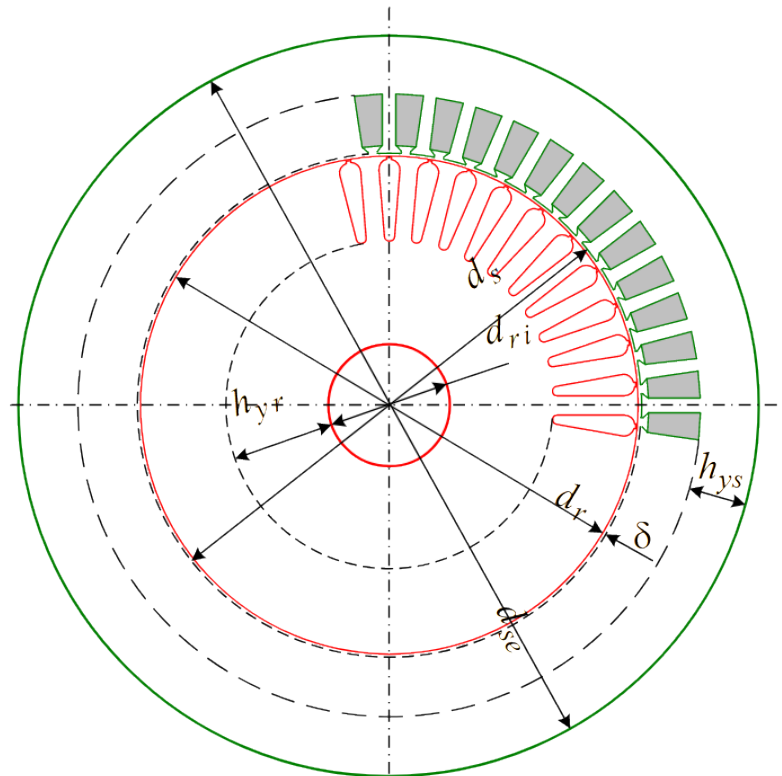


Рис. 7. Конструктивна модель ТАД : поперечний переріз

Як розрахунковий варіант було вибрано чотирьопольове АД потужністю 15 кВт. Обмотка статора одношарова, діаметральна, розподілена, що характерно для АД певного рівня потужності.

Для розрахунку МП в програмі FEMM створюється модель електромагнітної системи АД в його поперечному перерізі, яка зображена на рис. 8.

При роботі з моделлю АД використовується кутова координата  $\alpha$ , спрямована у бік обертання МП, - по стрілці з символом  $n_s$ . Розподіл фазних зон обмотки статора ідентифікується на рис. 8 по індексах при фазних струмах. Прийнято, що МРС фазної обмотки А на полюсному діленні вгорі орієнтована по вертикальній осі, від якої відлічується кут  $\alpha$ .

Так фіксуються фазні обмотки і, відповідно осердя статора, тому його верхній зубець розташований по вертикальній осі, фазні зони конструктивно симетричні відносно цієї осі, а по напрямках струмів - асиметричні. Усе інше приймає свої позиції автоматично залежно від значення  $p$ .

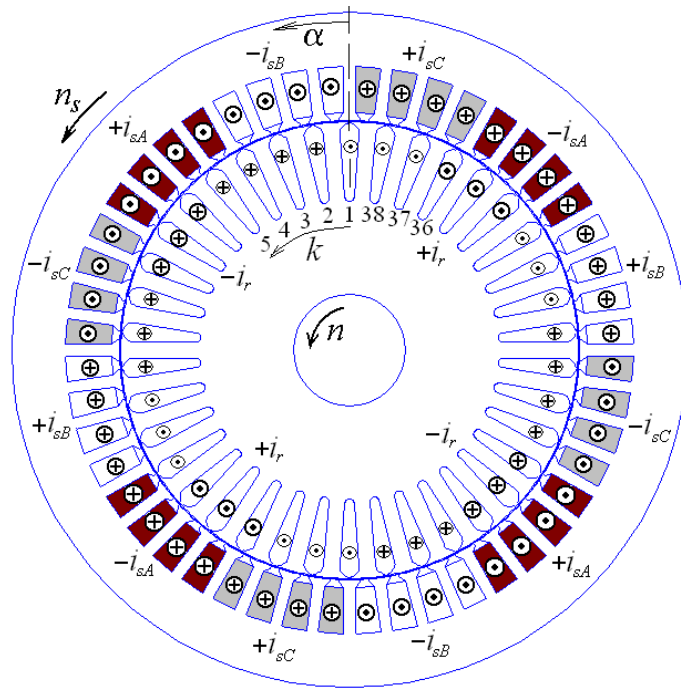


Рисунок 8 – Програмна модель електромагнітної системи АД в його поперечному перерізі

У обмотці статора мається на увазі симетрична трифазна система фазних струмів:

$$i_{sA} = I_{ms} \cos(\omega t + \beta); \quad i_{sB} = I_{ms} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \beta); \quad i_{sC} = I_{ms} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \beta), \quad (1)$$

де  $t$  - час;  $I_{ms}$  - амплітуда,  $\omega$  - кутова частота;  $\beta$  - узагальнена початкова фаза струмів статора, яка за умовчанням прийнята рівною нулю.

При цьому в початковий момент часу при  $t = 0$  струм у фазі  $A$  дорівнює амплітудному значенню  $i_{sA} = I_{ms}$ , а у фазах  $B$  і  $C$  струми  $i_{sB} = i_{sC} = -0,5I_{ms}$ . У пазах статора на рнс. 8 показані відповідні напрями фазних струмів. Укрупненими значками виділені струми фазних зон обмотки  $A$ . Знаки  $+$  і  $-$  перед символами струмів показують, що вони мають бути ще додані до вказаних миттєвих значень фазних струмів.

Кутова позиція ротора може бути довільною, а його пронумеровані пази фіксуються завданням координати першого паза  $ar1$ , найближчого до вертикальної осі, і зрушені один від одного на просторовий кут  $\alpha_m = 360^\circ / Q_r$ .

### Визначення струму ротора в режимі номінального навантаження.

Важливим аспектом підготовчої роботи до розрахунку МП в АД являється визначення величини струмів обмотки ротора, а також їх фазового зрушення по відношенню до струмів обмотки статора, які вже задані (1). Це можливо при обліку проектних даних АД з використанням векторної діаграми (ВД), побудованої на основі типових правил [10] і зображеною на рис. 9, а.

Тут за базу прийнятий вектор фазного струму  $I_s$  з нульовою початковою фазою  $\beta$ , відносно якого під кутом  $\varphi_s = \arccos(\cos\varphi_{sN})$  проводиться вектор фазної напруги  $\underline{U}_s$ . Відносно нього побудований вектор струму НХ статора під кутом  $\varphi_{so} = \arctg(I_{or}/I_{oa})$ .

Відносно вектора напруга виходить активна і реактивна складові струму статора :

$$I_{sa} = I_s \cdot \cos\varphi_s; \quad I_{sr} = I_s \cdot \sin\varphi_s, \quad (2)$$

а також аналогічні складові оберненого приведенного струму ротора:

$$-I'_{ra} = I_{sa} - I_{soa}; \quad -I'_{rr} = I_{sr} - I_{sor}. \quad (3)$$

На підставі цього діюче значення приведенного струму ротора і його фазове зрушення відносно напруги:

$$-I'_r = \sqrt{(-I'_{ra})^2 + (-I'_{rr})^2}; \quad \phi_r = \arctg \frac{-I'_{rr}}{-I'_{ra}}. \quad (4)$$

Необернений фазний струм ротора на рис. 9, а знаходиться в протифазі струму  $-I'_r$ . Тоді фазовий зсув відносно струму статора (у електричних градусах)

$$\phi_{sr} = 180^\circ - \phi_s + \phi_r. \quad (5)$$

Діюче значення істинного (не зведеного) фазного струму ротора

$$I_r = (-I'_r) \cdot K_I \quad (6)$$

де коефіцієнт приведення струмів [10]:

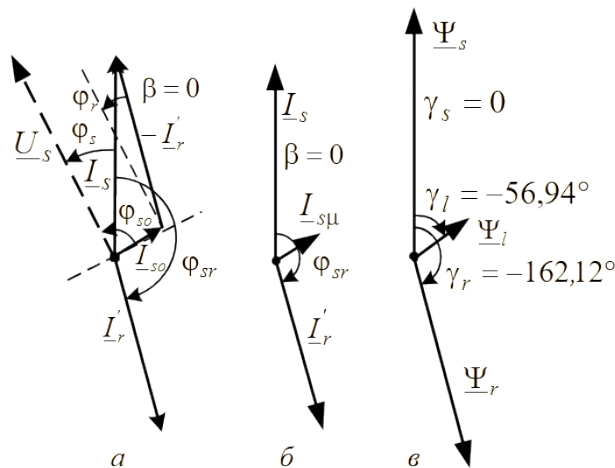


Рисунок 9 – Векторна діаграма до визначення струму ротора при навантаженні АД (а) і подібні діаграми струмів (б) і МПЗ (в)

$$K_I = \frac{N_s' K_{Ws} m_s}{N_r' K_{Wr} m_r} \cdot \frac{1}{K_{sq}}. \quad (7)$$

Для короткозамкнутої обмотки ротора число фаз  $m_r$  дорівнює кількості пазів ротора  $Q_r$ , кількість витків на фазу  $N_r=0,5$ , обмотувальний коефіцієнт  $K_{Wr}=1$ .

У конструктивній схемі двигуна (рис. 8) електричні градуси (чи радіани) векторної діаграми (рис. 9) і тимчасових фазових співвідношень повинні перейти в реальну кутову міру. Конкретно, розподіл по пазах ротора синусоїдальної хвилі струму повинен відставати на кожній парі полюсів від умовної синусоїдальної хвилі трифазної системи струмів статора (1) на геометричний кут

$$\alpha_{sr} = \phi_{sr} / p. \quad (8)$$

На наданій основі формується багатофазна система миттєвих значень струмів в стержнях короткозамкнутого ротора, а саме:

$$i_{r k} = I_{m r} \sin \left\{ p \cdot \left[ \beta + (k-1) \cdot \alpha_{r n} + \alpha_{s r} + \alpha_{r 1} \right] \right\}, \quad (9)$$

де  $k=1, 2, \dots, Q_r$  - номер паза відповідно до їх нумерації, прийнятої на рис. 8;  $I_{m r} = \sqrt{2} \cdot I_r$  - амплітуда фазного струму в стержнях ротора.

Для АД, що розглядається, отримано  $K_f=17,01$ ;  $I_r=439,9$  А;  $\alpha_{sr}=-82,55^\circ$ .

Відмітимо, що негативне значення кута  $\alpha_{sr}$  в (9) і дає відставання "хвилі" струмів ротора від "хвилі" струмів статора.

Розподіл струмів по пазах статора і ротора в безрозмірній формі проілюстрований на рис. 10 (тут позначене  $\tau_p$  - полюсний крок).

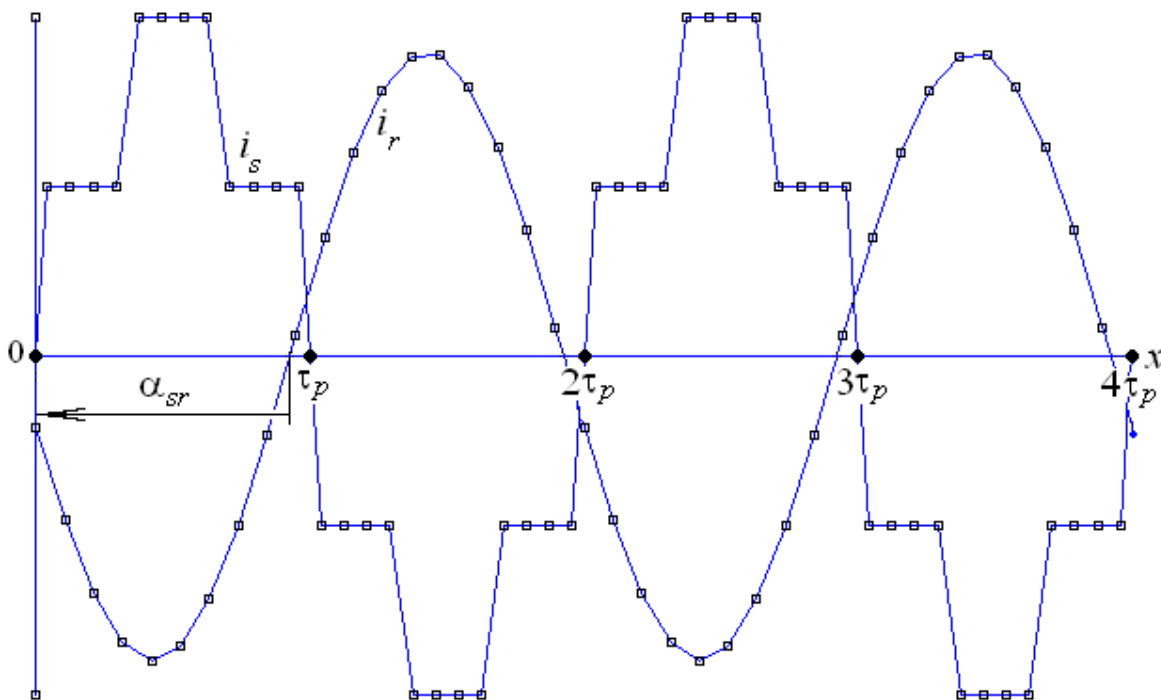


Рис. 10. Функції розподілу струмів статора  $i_s$  і ротора  $i_r$  по їх пазах уздовж лінії розгортки  $x$ , що проходить по проміжку

### Загальні аспекти розрахунку МП за програмою FEMM

Моделі АД, представленою на рис. 8, і струмів статора і ротора, що задаються, вистачає, щоб програма FEMM розрахувала МП при конкретній позиції ротора. Але для цього необхідно розрахункову модель АД перетворити у фізико-геометричну модель, що сприймається програмою FEMM. Це робиться "вручну" або автоматично складеним скриптом Lua.

Розроблений для АД скрипт є універсальним з точки зору їх типової геометричної структури у рамках представлених вище параметрів, які можуть вільно варіюватися. Як початкова інформація, заздалегідь підготовлена в текстовому файлі, служать проектні геометричні розміри сердечників в цілому і їх пазів, а також інші дані, що впливають на результати розрахунку МП. Вводяться також в числовій формі криві намагнічування  $H(B)$  матеріалів осердь, причому для зубців і спинок вони різні, як це прийнято в системі проектування [9].

Для розрахунку програмою FEMM магнітного поля ТАД необхідно створити в її програмному середовищі його **фізико-геометричну модель** (тип файлу - Femme Document), яка зображена на рис. 11. Ця модель заснована на геометричній моделі ТАД і наповнена фізичними властивостями її блоків : магнітними властивостями і струмами обмоток.

Програма FEMM, як відомо, реалізує на основі методу кінцевих елементів рівняння, що описує МП (у нашому випадку - в поперечному перерізі АД) :

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z \quad (10)$$

де  $A_z, J_z$  – аксіальні складові векторного магнітного потенціалу (ВМП) і вектора щільності струму;  $\vec{k}$  - орт по аксіальній осі z. Магнітна проникність  $\mu$ , як функція магнітної індукції  $B$ , визначається за допомогою введених скриптом Lua кривих намагнічення матеріалу  $H(B)$ .

Рисунок 11 -Фізико-геометрична модель АД

### Тестова перевірка фазових співвідношень електромагнітних величин в АД.

Для перевірки цих співвідношень були проведені тестові розрахунки МП для певних струмів обмоток.

По отриманому кожного разу розподілу ВМП проводиться "збір" значень магнітного

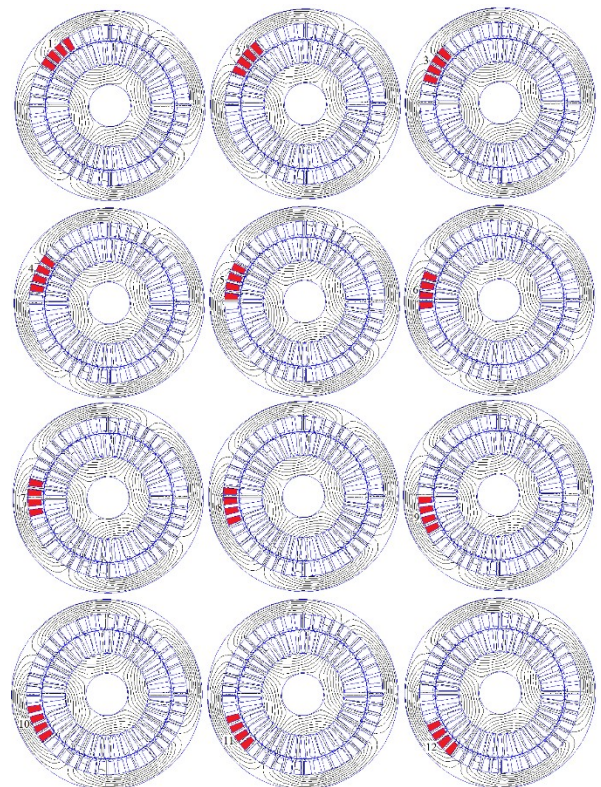


Рисунок 11-а – Умовне переміщення «маски» фазної зони обмотки статора у межах її полюсного кроку зі зсувами на зубцевий крок



потокосцеплення (МПЗ) фазної обмотки А при умовному переміщенні її фазних зон в кутовому напрямі на полюсному кроці.

У такий спосіб виходить в чисельній формі кутова функція МПС на її половині періоду

$$\Psi_z(\alpha_z); \alpha_z = (z-1) \cdot \tau_s; z = 1, 2, 3, \dots Z, \quad (11)$$

де  $z$  - номер кутових позицій фазної зони обмотки статора;  $Z = Q_s / (2p)$  - кількість інтервалів  $\Delta\alpha_z$  на напівперіоді, тобто в межах полюсного кроку  $\tau_p$ ;  $\tau_s = 360^\circ / Q_s$  - зубцевий крок статора.

Дискретна кутова функція МПС (11) розкладається в гармонійний косинусний ряд, як показано в [3], і з нього використовується перша гармоніка:

$$\Psi = \Psi_m \cos(\alpha + \gamma), \quad (12)$$

де  $\Psi_m, \gamma$  - її амплітуда і початкова фаза.

Значення  $\gamma$  якраз і визначає напрям вектора МПС на картині МП, причому геометричний кут  $\alpha$  (у звичайній кутовій мірі) пов'язаний з кутом  $\gamma$  (у електричних градусах) відомим співвідношенням  $\alpha = \gamma / p$ .

Спочатку був виконаний розрахунок МП тільки від струмів статора, що відповідало режиму НХ, що ідеалізувався, а щоб зберегти насичення магнітної системи, було прийнято  $I_s = I_\mu$ .

Розподіл струмів по обмотці статора з їх напрямками показаний на рис. 12. Тут же приведена розрахована картина силових ліній і векторів магнітної індукції, а також показаний вектор МПС  $\Psi_s$  під кутом  $\alpha_s$ , рівним нулю, як і значення  $\gamma$  з (12). Таким чином, початкова фаза першої гармоніки МПС відповідає заданій початковій фазі струмів статора, тобто  $\beta$ .

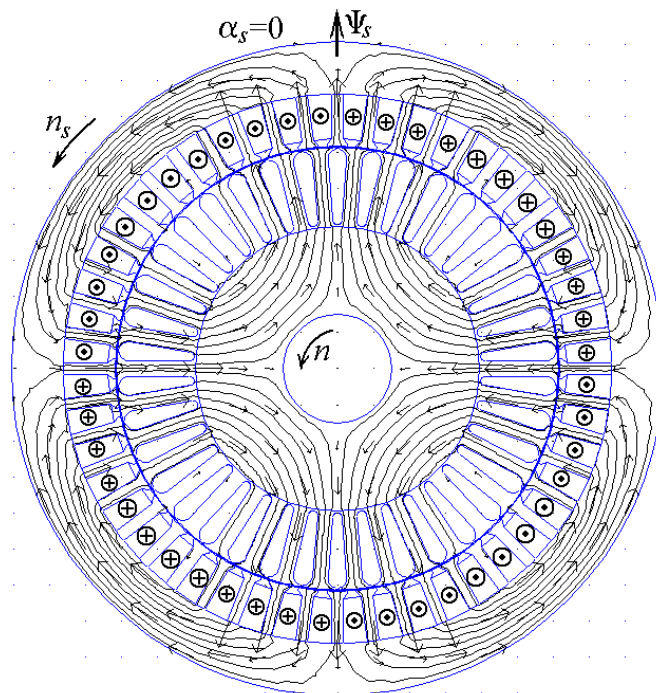


Рисунок 12 – Магнітне поле обмотки статора (режим холостого ходу, що ідеалізується)

На другому етапі був проведений розрахунок МП від струмів ротора - це відповідало деякому умовному режиму збудження. Для збереження насичення магнітної системи приведений струм ротора  $I'_r$  заданий рівним  $I_\mu$ , а потім вже перейшли до істинного струму по (6). Отримані розподіл і напрями струмів в стержнях обмотки ротора відповідно до формули (9)

дані на рис. 13 разом з розрахованою картиною МП. Вона підтвердила відповідність початкової фази МПС  $\gamma_r = -165, 12^\circ$ , виведеною з (12), і напрям вектора  $\Psi_r$  під кутом  $\alpha_r$ .

У режимі навантаження АД розподілу струмів в обмотках статора і ротора задані такими, як на рис. 12 і рис. 13, тільки для значень номінальних струмів. Картина МП в цьому режимі представлена на рис. 14. Якщо порівняти структури силових ліній МП на цьому рисунку і на рис. 12, то можна виявити поворот МП в режимі навантаження в порівнянні з режимом НХ на кут  $\alpha_l$ , значення якого визначене шляхом гармонійного розкладання (12) через  $\gamma_l = -56,94^\circ$ .

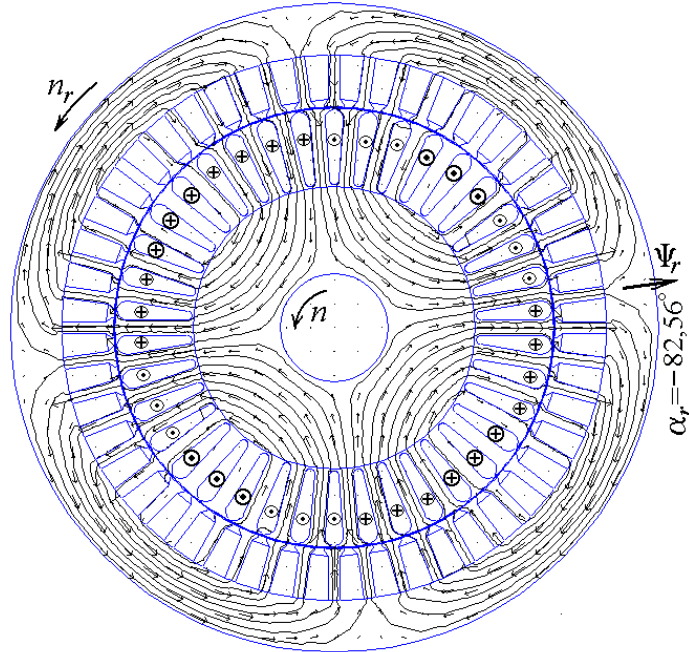


Рисунок 13 – Магнітне поле обмотки ротора

Очевидно, що  $\alpha_l$  відповідає початковій фазі струму НХ і результуючого МПС по ВД на рис. 9, в, тільки в перерахунку з електричних градусів в звичайні кутові градуси, тобто  $\alpha_l = \gamma_l / p$ , що відмічено вище.



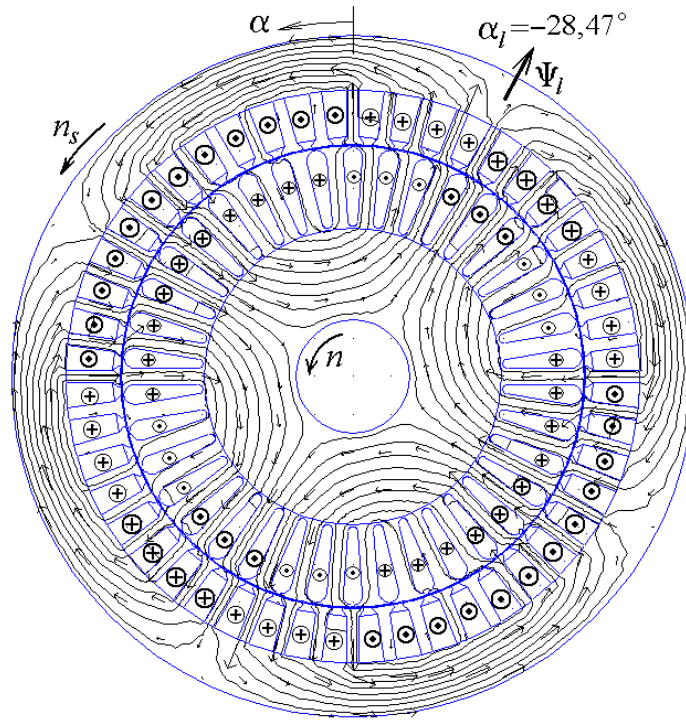


Рисунок 14 – Магнітне поле обмоток статора и ротора

### Електромагнітні параметри АД на основі розрахунку МП.

Для аналізу електромагнітних параметрів АД, і, передусім, ЕРС в обмотці статора, найважливішу роль грає МПС фазної обмотки статора. Після розрахунку МП, як вже відмічено, формується дискретна кутова функція МПС (11) і виходить її перша гармоніка (12).

З урахуванням зв'язку кута повороту МП, що обертається, з часом

$$\alpha = \frac{\omega}{p} t \quad (14)$$

кутова функція перетвориться в часову

$$\Psi = \Psi_m' \cdot \cos(\omega \cdot t + \gamma), \quad (15)$$

де зроблений перехід від кутових (14) до електричних градусів, тобто  $\alpha_{el} = \alpha \cdot p$ .

У режимі навантаження АД для першої гармоніки були набуті значення  $\Psi_l = \Psi_m' = 0,989$  Вб,  $\gamma_l = \gamma = -56,94^\circ$ .

Представлення МПС у формі (15) дозволяє на підставі закону електромагнітної індукції перейти до фазної ЕРС обмотки:

$$e_s = \omega \cdot \Psi_m' \cdot \sin(\omega \cdot t + \gamma), \quad (16)$$

де виділяється амплітуда ЕРС  $E_{sm} = \omega \cdot \Psi_m'$ .

Для зведення (16) до заданої системи фазового числення (1) ЕРС була представлена у вигляді

$$e_s = \omega \cdot \Psi_m' \cdot \cos(\omega \cdot t + \gamma - \pi/2), \quad (17)$$

і звідси отримана її початкова фаза  $\gamma - 90^\circ$ .

У результаті, діюче значення першої гармоніки фазної ЕРС обмотки статора в режимі навантаження

$$E_s = E_{sm} / \sqrt{2} = 220 \text{ В}; \quad (18)$$

і її фазове зрушення відносно струму

$$\gamma_{Es} = \beta - 90^\circ + \gamma = -146,94^\circ. \quad (19)$$

Відмітимо, що точний збіг значення ЕРС 220 В з номінальною напругою є в деякій мірі випадковим і неадекватним істині, що ще обговорюватиметься далі.

Визначення ряду додаткових параметрів АД ілюструється за допомогою ВД електромагнітних величин на рис. 15. Вона побудована на базі рис. 9 з урахуванням розрахованих співвідношень за класичними правилами.

Перевернутий вектор ЕРС  $-\underline{E}_s$  відносно струму зрушать на кут  $\phi_{Es} = 180^\circ + \gamma_{Es} = 33,06^\circ$ . До нього побудовані вектори падіння напруги на активному опорі обмотки статора  $U_{rs} = R_s I_s = 11,7 \text{ В}$  і на індуктивному опорі її лобового розсіяння  $U_{s\sigma fh} = X_{s\sigma fh} I_s = 6,8 \text{ В}$  (інші опори розсіяння вже враховані завдяки операції з повним МПС обмотки статора на її прямолінійній частині). В результаті був отриманий вектор фазної напруги

$$\underline{U}_s = -\underline{E}_s + \underline{U}_{rs} + \underline{U}_{s\sigma fh}. \quad (20)$$

Через проекції векторів на напрям вектора струму  $I_s$  виходить активна і реактивна

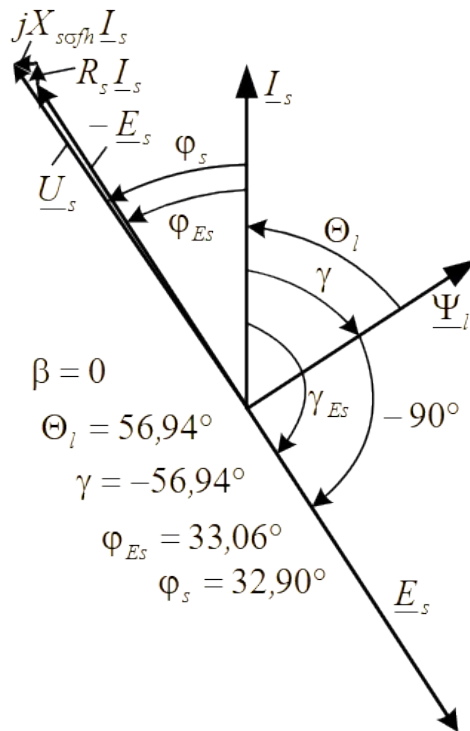


Рисунок 15 – Векторна діаграма електромагнітних величин в режимі навантаження АД

складові вектора напруги  $\underline{U}_s$ :

$$U_{sa} = E_{sa} + U_{rs} = E_s \cos \phi_{Es} + U_{rs} = 195,8 \text{ В}; \quad U_{sr} = E_{sr} + U_{scfh} = E_s \sin \phi_{Es} + U_{scfh} = 126,7 \text{ В},$$

а також діюче значення і фазове зрушення відносно вектора струму  $I_s$ :

$$U_s = \sqrt{U_{sa}^2 + U_{sr}^2} = 233,2 \text{ В}; \quad (21)$$

$$\phi_s = \arctg(U_{sr} / U_{sa}) = 32,90^\circ. \quad (22)$$

Помітимо, що фазна напруга вийшла більше номінального значення, що вимагає окремого аналізу, оскільки в режимі навантаження АД виявилось дещо перебудженим. Це пояснюється тим, що в цьому режимі в неявній формі зберігся такий струм статора, що намагнічує, який визначається при проектуванні розрахунком магнітного ланцюга в режимі НХ по приблизно заданою ЕРС цього режиму  $E_{so} = 214,5 \text{ В}$ .

Проте в режимі навантаження величина ЕРС, визначена по формулі балансу напруги в обмотці статора [10]:

$$\underline{E}_s = \underline{U}_s - R_s \cdot \underline{I}_s - j \cdot X_{cs} \cdot \underline{I}_s, \quad (23)$$

складає 200,4 В.

Цікаво, що за допомогою польового розрахунку при проектному значенні струму статора, що намагнічує, в режимі ідеального НХ АД для першої гармоніки по (12) вийшли значення  $\Psi_s = \Psi_m' = 1,036$  Вб, далі по (18) отримане  $E_s = 230$  В; по (21) -  $U_s = 236,1$  В. І це вже характеризує проблему магнітного розрахунку на основі методу магнітного ланцюга. Зрозуміло, що фазна напруга мережі  $U_{sN} = 220$  В "відмінити" не можна, а струм обмотки статора, що просто намагнічує, має бути меншим, ніж в проекті АД.

Використання для розрахунку методу магнітного ланцюга, в принципі, і неможливість його прямого використання безпосередньо в режимі навантаження і привели до невідповідності напруги по (21) заданому номінальному значенню.

### *Енергетичні параметри АД*

На підставі результатів польового розрахунку коефіцієнт потужності склав  $\cos \phi_s = 0,840$  і, відповідно, вхідна активна потужність АД

$$P_{in} = m_s U_s I_s \cos \phi_s \cdot 10^{-3} = 17,04 \text{ кВт}, \quad (24)$$

Надлишковий струм, що намагнічує, в режимі навантаження, що привів до надлишкового значення напруги, призводить до заниженого значення коефіцієнта потужності у формулі (24). Хоча в їх поєднанні погрішність визначення вхідної потужності частково нівелюється. Але, в цілому, усе відмічене проявляє проблему точності проектування АД на основі класичної методики.

Ця проблема може бути здолана при поєднанні цієї методики з чисельно-польовими розрахунками. Проте це питання виходить за рамки цієї статті і вимагає окремого детального аналізу.

Основна ж оцінка адекватності параметрів спроектованого АД початковим даним проводиться по його **вихідній потужності**. Основою польового розрахунку цієї потужності є електромагнітний момент АД.

У скрипті Lua є процедура, коли виділяються усі елементи ротора (сердечник і обмотка в пазах), а програма FEMM сама формує в проміжку кільцевий шар між радіусами кіл  $r_r$  і  $r_s$ , що обмежують поперечну площу проміжку  $S_\delta$  з боку ротора і статора. При цьому електромагнітний момент визначається через тензор магнітного натягнення Максвелла [3] як поверхневий інтеграл по цій площі кільцевого перерізу проміжку:

$$M_{em} = \frac{l_a}{\mu_0 (r_s - r_r)} \int_{S_\delta} B_r \cdot B_\alpha \cdot r \cdot dS \quad (25)$$

де  $B_r$  і  $B_\alpha$  - радіальна і кутова складові магнітної індукції;  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнітна постійна.

Для розглянутого АД це дало значення  $M_{em} = 101$  Н·м. Але тут можлива відносно невелика погрішність з огляду на те, що момент до певної міри залежить від взаємного положення ротора і статора.

Електромагнітна потужність АД:

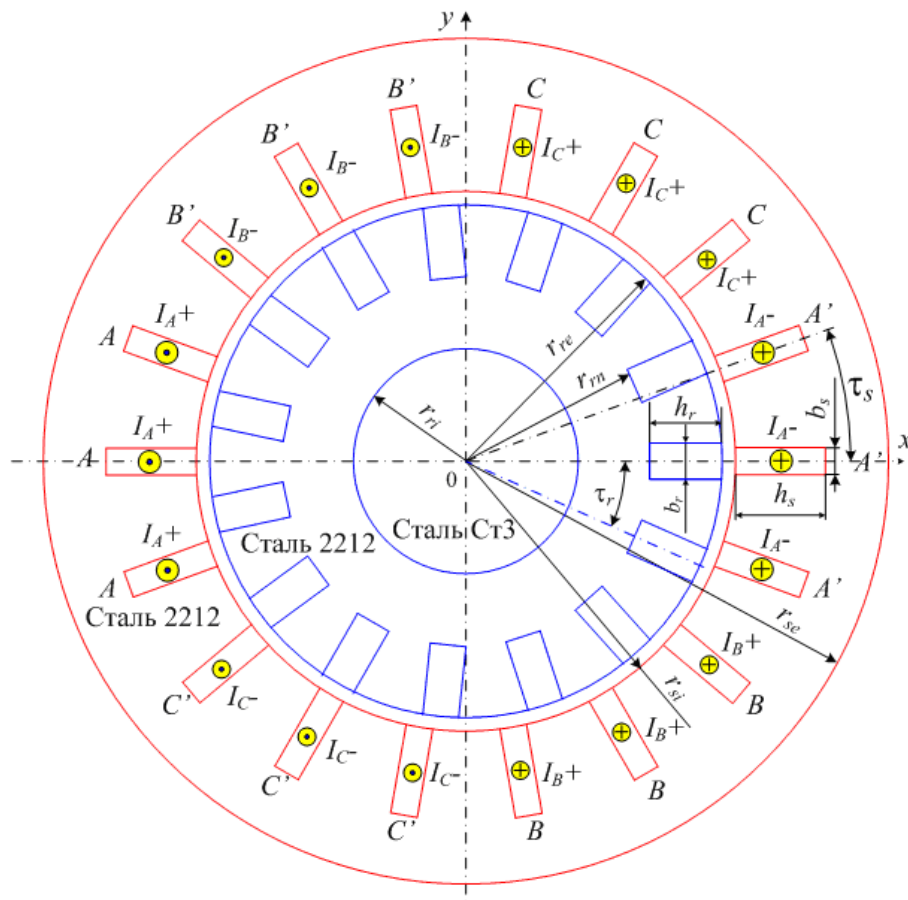
$$P_{em} = M_{em} \cdot \Omega_s \cdot 10^{-3} = 15,87 \text{ кВт}, \quad (26)$$

де кутова швидкість МП, що обертається  $\Omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s / p$ .

де втрати потужності : електричні в роторі  $P_{elr} = 410$  Вт; додаткові магнітні ротора  $P_{mag ad} = P_{ar r} + P_{pul r} = 87,3$  Вт складаються з поверхневих  $P_{ar r} = 18,2$  Вт і пульсаційних  $P_{pul r} = 69,1$  Вт; повні механічні  $P_{mec} = 117$  Вт; додаткові втрати  $P_{ad} = 84,3$  Вт.

У результаті по (27)  $P_{out} = 15,17$  кВт, що дуже близько до заданої номінальної потужності АД. Хоча погрішність могла бути і більшою, оскільки при розрахунках використовувалися цілий ряд допущень. Але, як би то не було, результати чисельно-польового розрахунку підтвердили правильність проекту даного АД в межах можливих погрішностей.

**ТРИФАЗНИЙ АСИНХРОННИЙ ДВИГУН**  
 (принципи побудови та робота в програмі FEMM)  
**Розрахункова модель**  
**двохполюсного трифазного асинхронного двигуна**



До розмірів ТАД, які вказані на рисунку, додаються такі його дані:  
 $k_{Fe}$  – коефіцієнт заповнення осердь ротора і статора;  
 $l_a$  – активна довжина ТАД, яка дорівнює аксіальним довжинам осердь статора і ротора;  
 $I_s$  – діюче значення фазного струму обмотки статора;  
 $N_{cs}$  – кількість ефективних провідників в пазу статора;  
 $\tau_s=360/Q_s$ ;  $\tau_r=360/Q_r$  – зубцеві кроки статора і ротора.

Приклад марок сталі осердь і вала вказано на рисунку.

**Система струмів в трифазній обмотці статора**

У пазах вказана система позначень фазних струмів обмотки статора.

Тут же надані відповідні напрями струмів фазних обмоток і більшими значками виділені фазні зони обмотки *A*.

У фазних обмотках мається на увазі симетрична трифазна система фазних струмів:

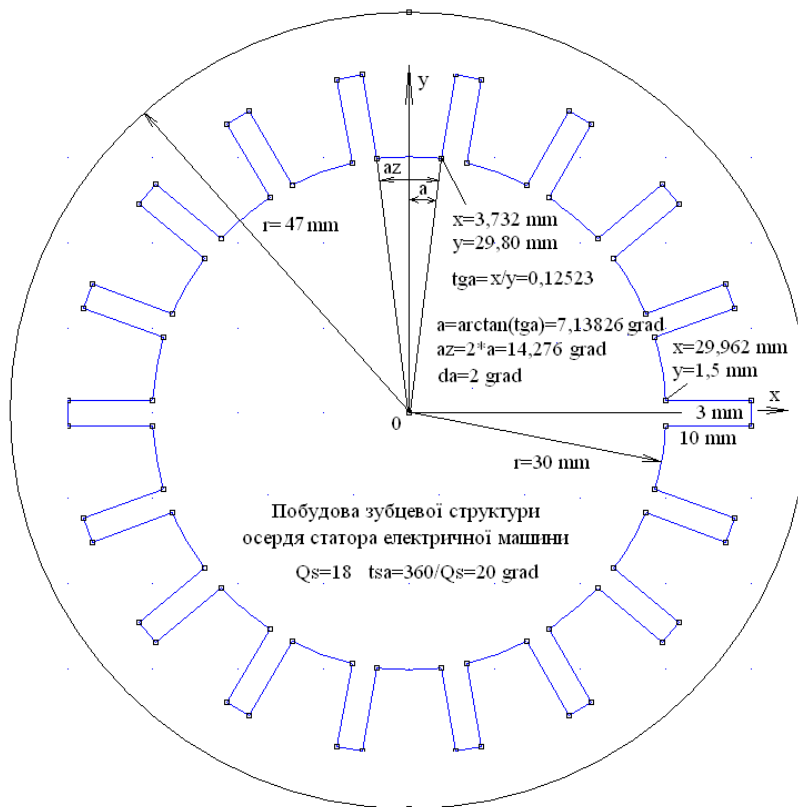
$$i_A = I_{ms} \cos(\omega t + \beta); \quad i_B = I_{ms} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \beta); \quad i_C = I_{ms} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \beta), \quad (1)$$

де  $t$  – час;  $I_{ms} = \sqrt{2} I_s$  – амплітуда,  $\omega$  – кутова частота;  $\beta$  – початкова фаза струмів статора (тут приймаємо  $\beta = 0$ );  $I_s$  – діюче значення фазного струму в обмотці статора.

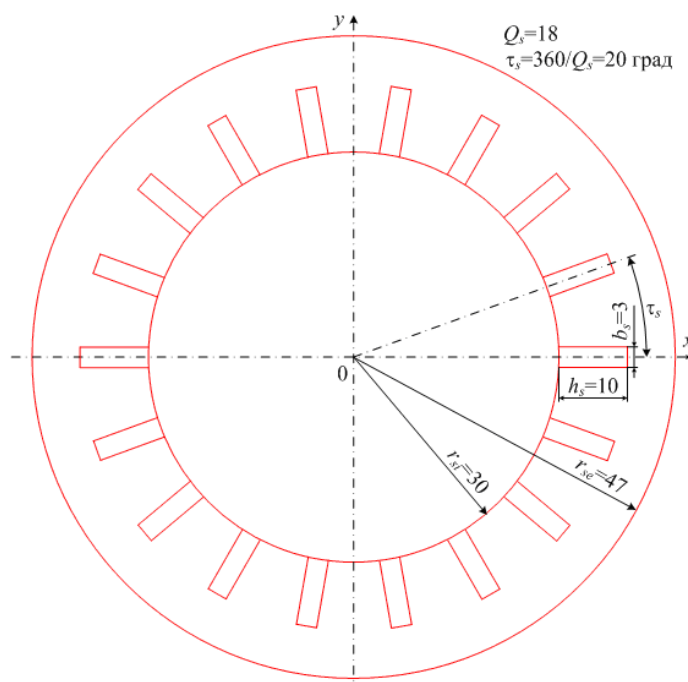


У початковий момент часу  $t = 0$  миттєве значення струму у фазній обмотці А дорівнює амплітудному значенню  $i_{sA} = I_{ms}$ , у фазних обмотках В і С струми у цей же момент часу  $i_{sB} = i_{sC} = -0,5 I_{ms}$ .

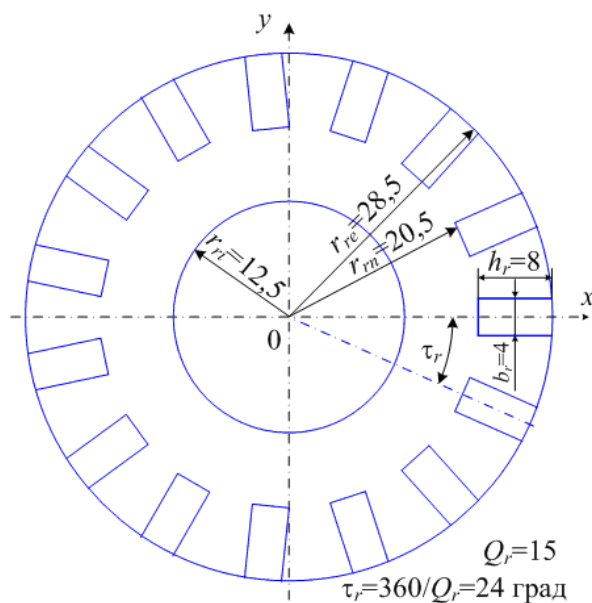
**Побудова зубцево-пазової структури статора електричної машини за координатами опорних точок**



**Побудова геометричної моделі ТАД за мінімумом параметрів  
Побудова геометричної моделі зубцево-пазової структури статора**



## Побудова геометричної моделі зубцево-пазової структури ротора



Розрахунок струмів в провідниках обмотки статора  
(демонстрація реалістичних співвідношень значень параметрів)

Діаметр неізолюваного проводу  $d_{cs}=0,9$  мм;

Площа поперечного перерізу провідника  $S_{cs}=0,25 \pi d_{cs}^2=0,638$  мм<sup>2</sup>;

Діюче значення фазного струму в обмотці статора  $I_s=3,2$  А;

Густина струму  $J_{cs} = I_s / S_{cs} = 5$  А/мм<sup>2</sup>;

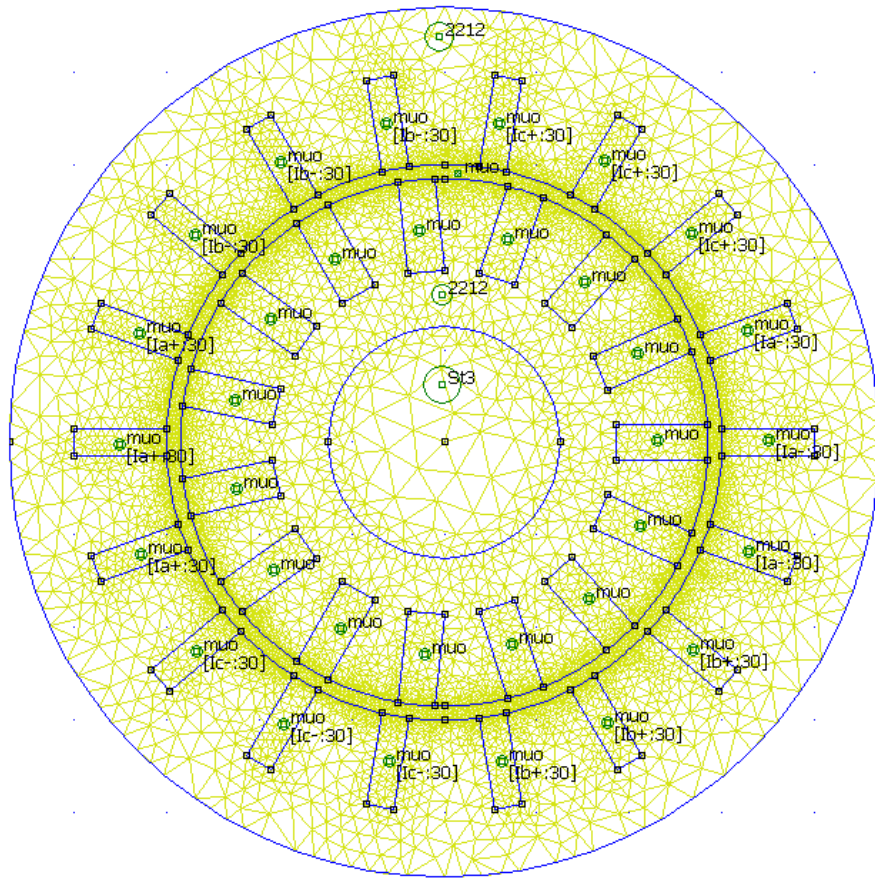
Амплітуда струму в фазній обмотці  $I_{ms} = \sqrt{2} I_s = 4,52$  А;

Миттєві значення струмів в фазних обмотках

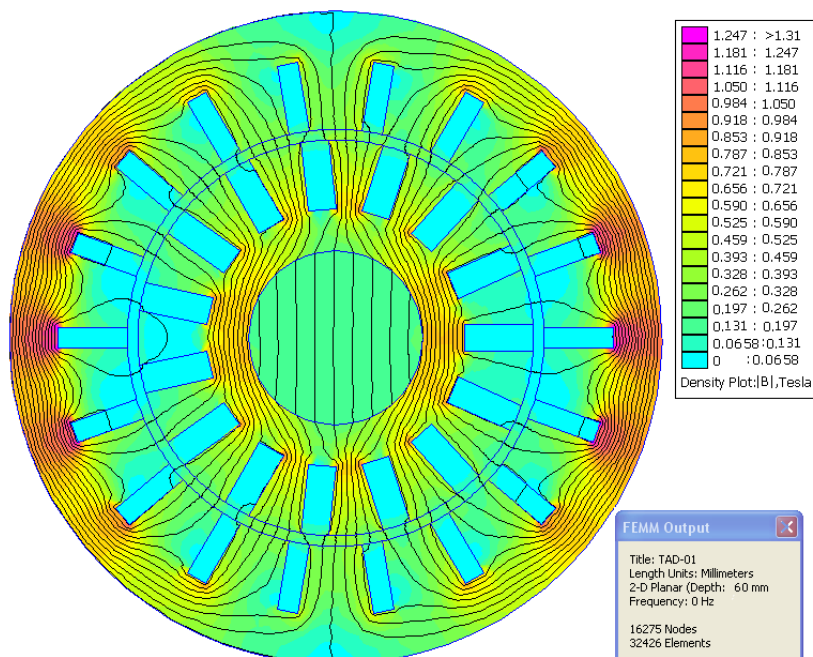
$i_A = I_m = 4,52$  А;  $i_B = -I_m/2 = -2,26$  А;  $i_C = -I_m/2 = -2,26$  А.

Необхідно створити модель ТАД і виконати розрахунки магнітного поля за програмою FEMM.

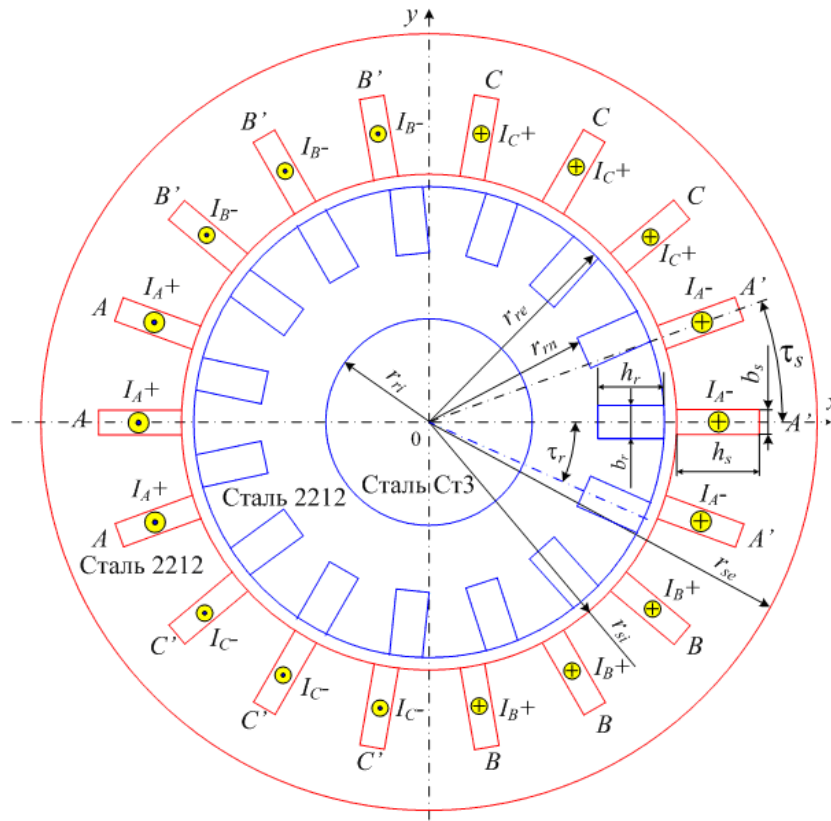
## Фізико-геометрична модель електричної машини змінного струму в середовищі програми FEMM



## Розподіл магнітного поля електричної машини змінного струму в середовищі програми FEMM



**ТРИФАЗНИЙ АСИНХРОННИЙ ДВИГУН**  
(самостійна робота в програмі FEMM)  
**Розрахункова модель трифазного асинхронного двигуна**



До розмірів ТАД, які вказані на рисунку, додаються такі його дані:

- $k_{Fe}$  – коефіцієнт заповнення осердь ротора і статора;
  - $l_a$  – активна довжина ТАД, яка дорівнює аксіальним довжинам осердь статора і ротора;
  - $I_s$  – діюче значення фазного струму обмотки статора
  - $N_{cs}$  – кількість ефективний провідників в паза статора;
  - $\tau_s=360/Q_s$ ;  $\tau_r=360/Q_r$  – зубцеві кроки статора і ротора.
- Марки сталі осердь і вала вказано на рисунку.

**Завдання для самостійної роботи**

Для самостійної роботи задаються такі параметри моделі трифазного асинхронного двигуна TAD\_mod02:  $Q_r=17$ ;  $r_{ri}=14$ ;  $r_{re}=32$ ;  $b_r=3$ ;  $h_r=11$ ;  $Q_s=24$ ;  $r_{si}=33$ ;  $r_{se}=58$ ;  $b_s=4$ ;  $h_s=12$ ;  $l_a=100$ ;  $I_s=5,5$  А;  $N_{cs}=32$ ;  $k_{Fe}=0,96$  (розміри в мм).

Необхідно створити модель ТАД і виконати розрахунки магнітного поля за програмою FEMM.

# ПРАКТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ФІЗИКО-ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА (ТАД)

## ТЕСТОВА РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ТАД

Для ілюстрацій взято чотирьополосний ( $2p = 4$ ) трифазний ( $m_s=3$ ) асинхронний двигун (ТАД) з короткозамкненою обмоткою ротора потужністю 15 кВт. Він розрахований на номінальну фазну напругу  $U_{sN}=220$  В і струм статора  $I_{sN}=29$  А при частоті  $f_s=50$  Гц. Пази ротора виконуються напівзакритими; обмотка статора одношарова, діаметральна, розподілена.

Ряд параметрів даного тестового ТАД, необхідних для формування його розрахункової моделі, наводяться в файлі вихідних даних.

Побудування супроводжуються наданням формул і розрахованим по ним значень розмірів і кутів тестової моделі ТАД.

Лінійні розміри надаються в мм, кутові – в градусах, які при необхідності можна переводити в радіани множенням на коефіцієнт  $gr=\pi/180$ .

## 1. ПОБУДОВА ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗУБЦОВО-ПАЗОВИХ СТРУКТУР ТАД

### 1.1. Конструкторська модель ТАД

Геометрія конструкторської моделі ТАД з позначенням головних розмірів показана на рис. 1.1.

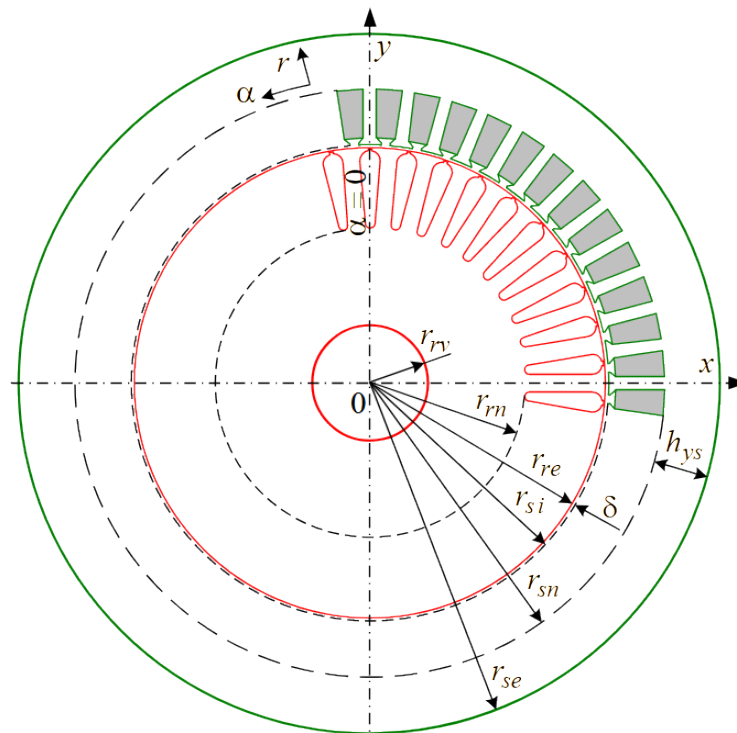


Рис. 1.1 – Конструкторська розрахункова модель ТАД

### Розміри осердь ТАД

$rrv=30.00$   $rre=92.00$   $rsi=92.50$   $hys=21.7$

$rse=rrv+hys+hys=136$  (висоту паза статора  $hs$  дивись далі)

$Qs=48$   $Qr=38$  - кількість пазів статора і ротора

$Ns=112$  – кількість послідовних витків фазної обмотки статора

## 1.2. Геометрія, розміри о побудування паза статора

Для конструкторської моделі паза статора на рис. 2.1 позначено:

$h_{s1}, b_{s1}$  – висота і ширина шлиця;

$h_s, b_{s2}, b_{s3}$  – висота я дві ширини паза – менша і більша.

$h_s=21.80$   $h_{s1}=1.0$   $h_{s2}=2.00$   $b_{s1}=3.7$   $b_{s2}=7.70$   $b_{s3}=10.20$

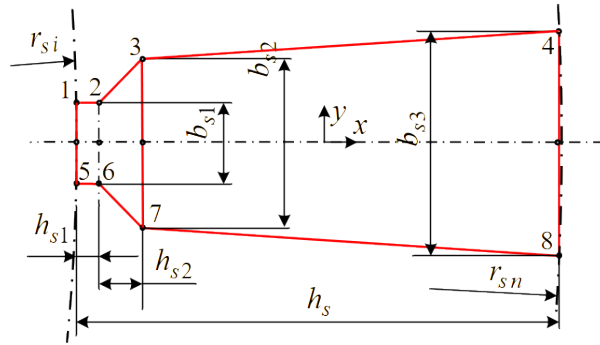


Рис. 2.1 – Конструкція паза статора

Координатні розміри елементів паза статора (рис. 2.2) обчислюються на основі рис. 2.1 за

формулами:  $y_a = b_{s1}/2$ ;  $y_b = b_{s2}/2$ ;  $y_c = b_{s3}/2$ ;  $x_a = \sqrt{r_{si}^2 - y_a^2}$ ;  $x_b = x_a + h_{s1}$ ;  
 $r_{sn} = \sqrt{(r_{si} + h_s)^2 + y_c^2}$ ;  $x_d = \sqrt{r_{sn}^2 - y_c^2}$ ;  $x_c = x_b + h_{s2}$ ; центральний кутовий розмір  
 $u_1 = \arctg(y_a/x_a)$ , зубцевий крок статора  $t_{sa} = 360/Q_s$ .

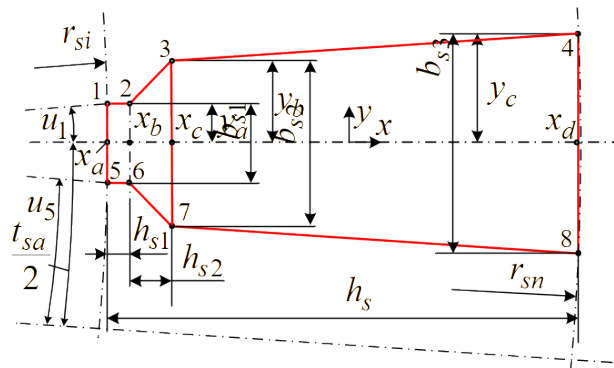


Рис. 2.2 – Геометрична модель паза статора з позначенням розмірів, реперних точок і їх координат

Координати	і	кутові	розміри	елементів	паза	статора
$x_a=92.5$	$x_b=93.5$	$x_c=95.5$	$x_d=114.3$	$r_{sn}=114.4$	$y_a=1.9$	$y_b=3.9$
$y_c=5.1$	$t_{sa}=7.50^\circ$	$u_1=1.1767^\circ$				



Готовий паз статора повертається вгору на півзубцевого кроку ( $t_{sa}/2$ ) над віссю  $x$

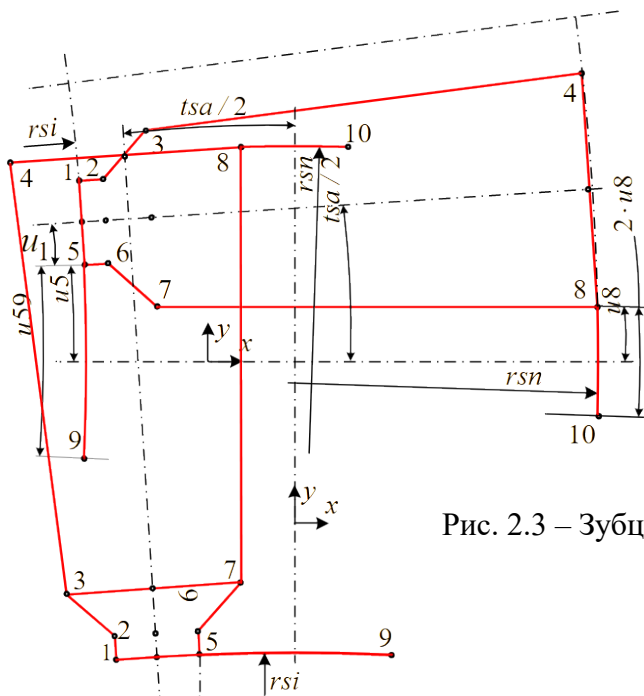


Рис. 2.3 – Зубцевий крок статора

Рис. 2.4 – Повернений зубцевий крок статора у вихідній позиції для копіювання

(показано на рис. 2.3).

Точки 5 і 8 копіюються симетрично під вісь  $x$  і виходять точки 9 і 10.

Зубець закривається дугами 5-9 і 8-10. Для них визначаються кути і координати:

$$u_5 = t_{sa}/2 - u_1, \quad u_{59} = 2u_5, \quad x_5 = r_{si} \cdot \cos(u_5), \quad y_5 = r_{si} \cdot \sin(u_5),$$

$$u_8 = t_{sa}/2 - \arctg(y_c/x_d), \quad x_8 = r_{sn} \cdot \cos(u_8), \quad y_8 = r_{sn} \cdot \sin(u_8).$$

Значення за цими формулами:

$$u_5 = 2.60^\circ \quad x_5 = 92.4 \quad y_5 = 4.2 \quad u_{59} = 2 \cdot u_5 = 5.21^\circ$$

$$u_8 = 1.19^\circ \quad x_8 = 114.4 \quad y_8 = 2.4 \quad 2 \cdot u_8 = 2.39^\circ$$

Отримується повний зубцевий крок осердя статора, виділений на рис. 2.3 червоним кольором.

Цей зубцевий крок повертається на  $90^\circ$  і займає позицію першого паза, так що зубець знаходиться на осі  $y$  (рис. 2.4), як і планувалось на фізико-геометричній моделі ТАД.

З цієї позиції зубцевий крок копіюється ( $Q_s-1$ ) разів з поворотами відносно центральної осі ТАД на зубцевий крок  $t_{sa}$ , і у підсумку отримується повна зубцево-пазова структура статора.

Цю структуру треба перевірити на предмет завершеності, так щоб точки 1 і 4 першого і останнього пазів злились воедино. Це може не відбутися через недостатню точність подання розмірів дуг, які використовувались при побудовах зубцево-пазової структури.

### 1.3. Геометрія, розміри і побудовання паза ротора

Для конструкторської моделі паза ротора на рис. 3.1 позначено:

$h_r, h_{r0}$  – висота паза и товщина перемички (при  $h_{r0}=0$  перемичка відсутня, і паз становиться напівзакритим);

$h_{r1}, b_{r1}$  – висота и ширина шлиця;

$r_{r1}, r_{r2}, h_{r2}$  – радіуси утворюючих дуг і відстань між їх центрами.

Розміри елементів осердя ротора ТАД  
 $r_{re}=92.0$   $h_r=32.0$   $h_{r1}=1.0$   $h_{r2}=25.3$   $b_{r1}=1.5$   $r_{r1}=3.9$   $r_{r2}=1.9$   
 $ar1=0$  (кутова позиція першого паза ротора, тобто він буде на вертикальній осі)

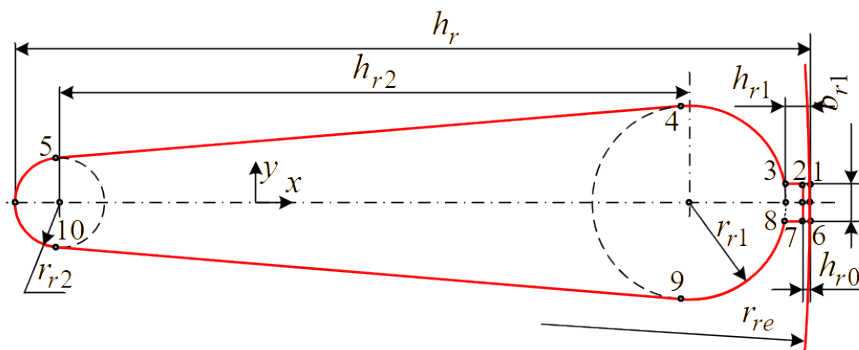


Рис. 3.1 – Конструкція паза ротора

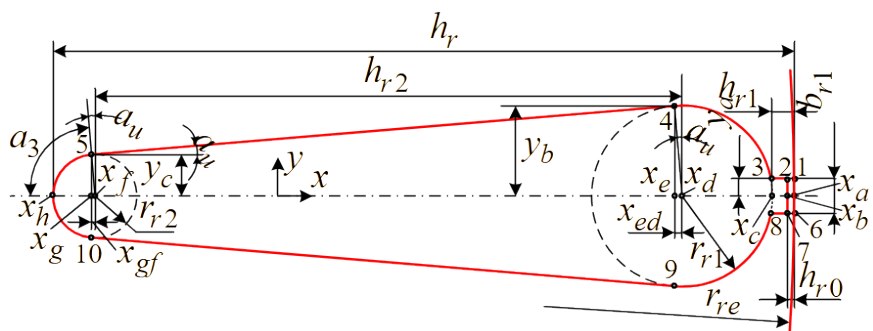


Рис. 3.2 – Паз ротора з позначенням розмірів, реперних точок і їх координат

Координатні і кутові розміри елементів паза ротора (рис. 3.2) обчислюються за формулами з урахуванням додаткових позначень на рис. 3.3:  $y_a = b_{r1}/2$ ;

$$\alpha_u = \arctg \frac{r_{r1} - r_{r2}}{\sqrt{h_{r2}^2 - (r_{r1} - r_{r2})^2}}; \quad \alpha_1 = \arctg \frac{y_a}{\sqrt{r_{r1}^2 - y_a^2}}; \quad x_a = \sqrt{r_{re}^2 - y_a^2};$$

$$\alpha_2 = 90 - \alpha_1 + \alpha_u; \quad \alpha_3 = 90 - \alpha_u; \quad y_b = r_{r1} \cos \alpha_u; \quad x_{ed} = r_{r1} \sin \alpha_u; \quad y_c = r_{r2} \cos \alpha_u;$$

$$x_{gf} = r_{r2} \sin \alpha_u.$$

Їх значення  $x_a=92.0$   $x_c=91.0$   $x_d=87.2$   $x_e=86.9$   $x_f=61.9$   $x_g=61.7$

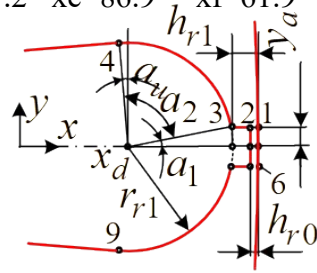


Рис. 3.3 – Верхня частина паза ротора

$x_h=60.0$   $y_a=0.8$   $y_b=3.9$   $y_c=1.9$

$a_u=4.53^\circ$   $a_1=11.09^\circ$   $a_2=83.45^\circ$   $a_3=85.47^\circ$

Готовий паз ротора повертається вгору на півзубцевого кроку ( $tra/2$ ) над віссю  $x$  (рис. 3.4).

Точка 6 копіюється симетрично під вісь  $x$  і отримується точка 11.

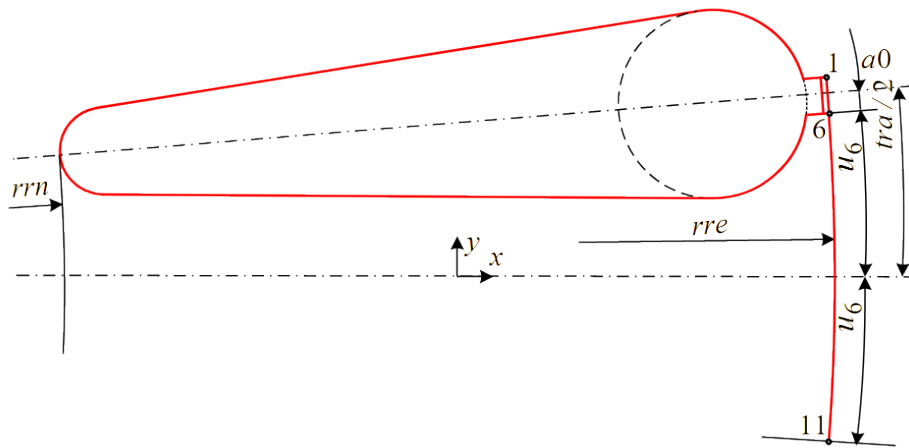


Рис. 3.4 – Повернутий зубцевий крок ротора для копіювання

Зубець закривається дугою 6-11 з опорним кутом ( $2 u_6$ ). Для її побудовання визначаються кути і координати точки 6 за формулами:

$$t_{ra} = \frac{360}{Q_r}; \quad \alpha_0 = \arctg \frac{y_a}{x_a}; \quad u_6 = \frac{t_{ra}}{2} - \alpha_0; \quad x_6 = r_{re} \sin u_6; \quad y_6 = r_{re} \cos u_6.$$

Розраховані значення

$$tra=9.4737^\circ \quad a_0=0.47^\circ \quad u_6=4.27^\circ \quad x_6=91.7 \quad y_6=6.8 \quad 2*u_6=8.54^\circ.$$

Отримується повний зубцевий крок осердя ротора, виділений на рис. 3.4 червоним кольором.

Цей зубцевий крок повертається на кут  $u=90-tra/2+ar1$  і займає позицію першого паза, так що зубець виявляється повернутим від осі  $y$  (рис. 3.5) на кут  $ar1$  (на даному рисунку взято  $ar1=tra/2$ , а для фізико-геометричної моделі ТАД заплановане, що  $ar1=0$ ).

З цієї позиції зубцевий крок копіюється  $(Q_r-1)$  разів з поворотами відносно центральної осі ТАД на зубцевий крок  $tra$ , і у підсумку отримується повна зубцево-пазова структура ротора.

Цю структуру треба перевірити на предмет завершеності, так щоб точки 11 першого і останнього пазів злились воедино. Це може не відбутися через недостатню точність подання розмірів дуг, які використовувались при побудовах зубцево-пазової структури ротора.

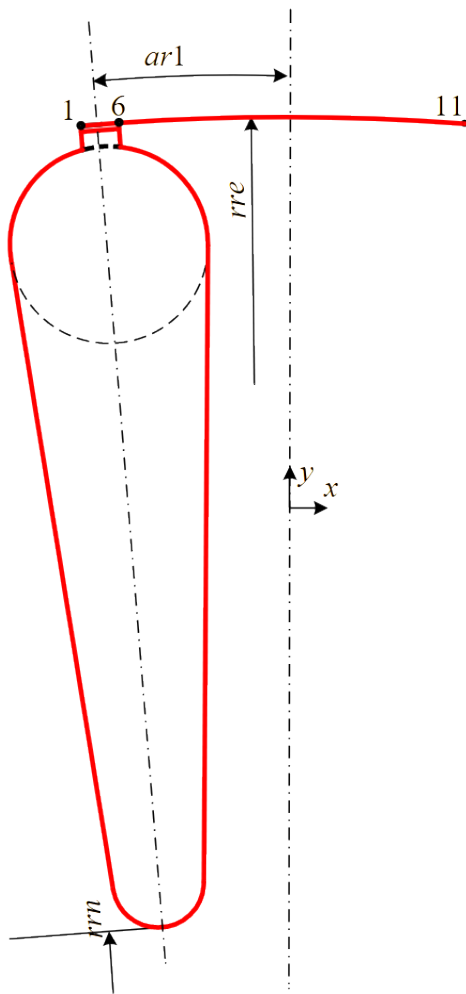


Рис. 3.5 – Повернутий зубцевий крок ротора для його копіювання

Посередині проміжку проводиться окружність для технологічних цілей з метою виділення зон з дуже «мількими» скінченими елементами, а також для зручного «витягнення» результатів після розрахунку магнітного поля. Мітки властивостей в частках розділеного проміжку в діаметрально розташованих точках показано на рис. 3.6.

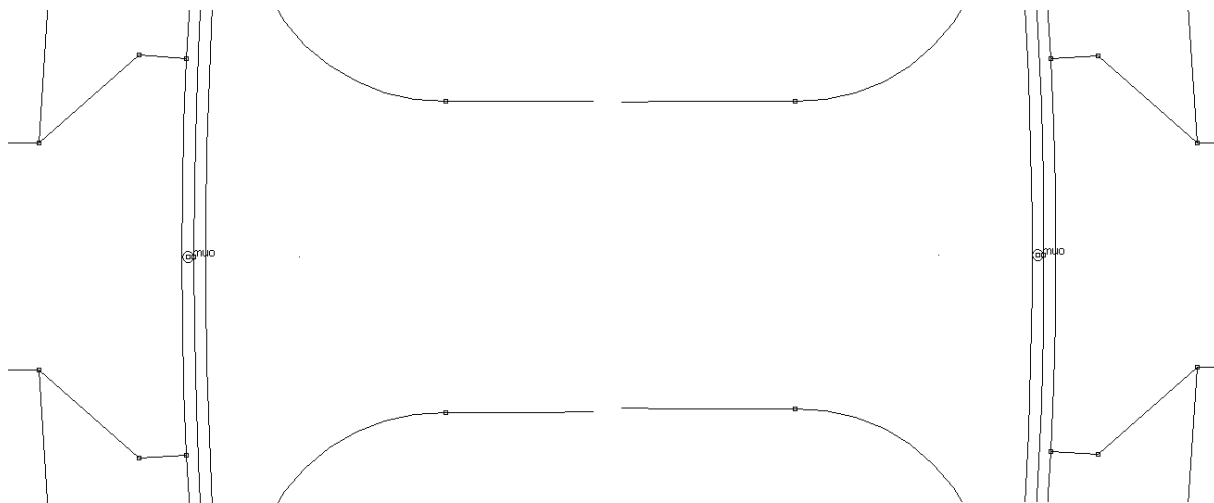


Рис. 3.6 – Фрагменти геометричної моделі ТАД з технологічною окружністю посередині проміжку

#### 1.4. Геометрична модель ТАД в цілому

Повні геометричні зубцево-пазові структури статора и ротора показано на рис. 4.1, де геометричну модель ТАД завершили добудовані окружності зовнішньої поверхні осердя статора і внутрішньої поверхні осердя ротора (під вал). Додана також окружність під зубцями осердя ротора для відокремлення їх від його спинки (ця окружність не повинна торкатися точок на контрах пазів).

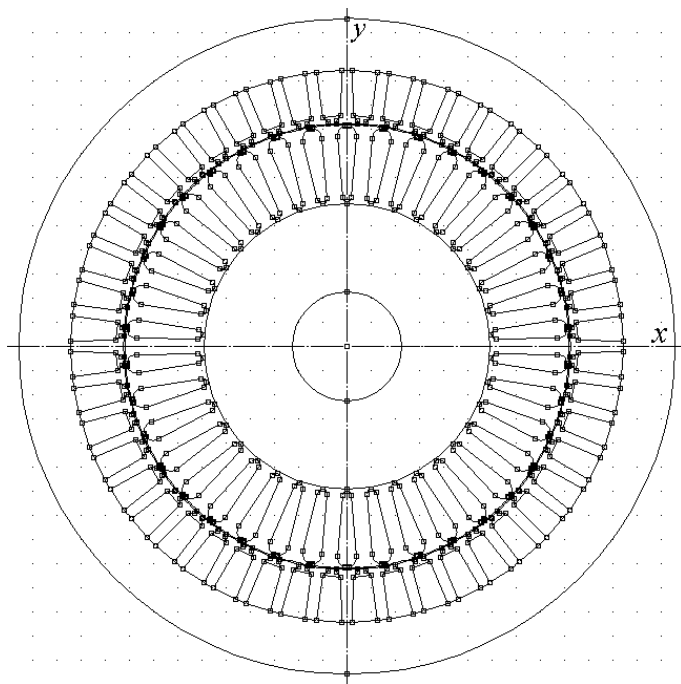


Рис. 4.1 – Геометрична модель ТАД координатні осі x і y додані для наочності)



## СТВОРЕННЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ТАД

Фізична модель електромагнітної системи ТАД в його поперечному перерізі виглядає так, як на рис. 1. Тут різним штрихуванням провідників в пазах статора показані фазні зони обмотки статора  $A-A'$ ,  $B-B'$  и  $C-C'$ , ідентифіковані позначеннями миттєвих значень фазних струмів  $i_{sA}$ ,  $i_{sB}$  и  $i_{sC}$ .

При побудовах моделей ТАД в скриптах Lua використовується прямокутна система координат  $x, y$ , а також полярні координати  $r, \alpha$ . Кутова координата  $\alpha$  відраховується від осі  $y$  і спрямована у бік обертання магнітного поля (МП) - по стрілці з символом  $n_s$ .

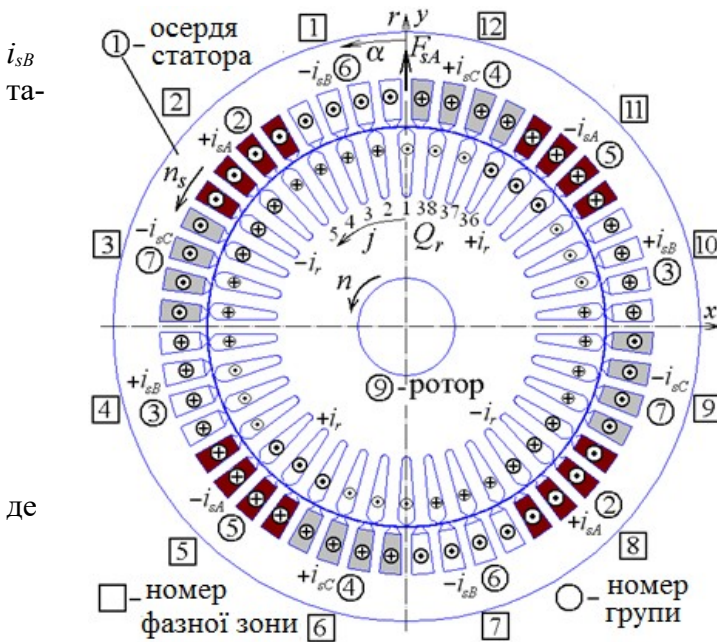
В обмотці статора розуміється симетрична трифазна система фазних струмів:

$$i_{sA} = I_{ms} \cos(\omega_s t); \quad i_{sB} = I_{ms} \cos(\omega_s t - \frac{2}{3}\pi); \quad i_{sC} = I_{ms} \cos(\omega_s t + \frac{2}{3}\pi), \quad (1)$$

де  $t$  - час;  $I_{ms}$  - амплітуда,  $\omega_s$  - кутова частота.

В початковий момент часу при  $t=0$  струм в фазній обмотці  $A$  дорівнює амплітудному значенню  $i_{sA}=I_{ms}$ , в фазних обмотках  $B$  и  $C$  складає відповідно  $i_{sB}=i_{sC}=-0,5I_{ms}$ . В пазах статора на рис.1 показано відповідні напрямки фазних струмів, знаки  $+$  та  $-$  перед символами струмів повинні бути ще додані до їх миттєвих значень. Тобто, якщо, наприклад, струм вийшов негативним, то для мітки  $i_{sB}+$  він ким і задається, а для мітки  $i_{sB}-$  змінює знак і задається з позитивним значенням.

Задаючи струм статора, треба вказувати кількість ефективних провідників у його пазу



де

Рис.1 - Розрахункова модель електромагнітної системи ТАД в його поперечному перерізі

$$N_{cs} = \frac{a_s N_s}{p q_{sp}},$$

використовується кількість пазів на полюс та фазу

$$q_{sp} = \frac{Q_s}{2 p m_s},$$

кількість паралельних віток обмотки

статора  $a_s = 1$  (за цими формулами виходять значення  $q_{sp}=4$ ;  $N_{cs}=14$ ). Прийнято, що МРС  $F_{sA}$  фазної обмотки  $A$  на полюсному кріці зверху орієнтована за віссю  $y$ . Так фіксуються фазні обмотки і відповідно осердя статора, тому його верхній зубець розташований по вертикальній осі, фазні зони конструктивно є симетричними щодо цієї осі, а за напрямками струмів - асиметричні. Решта приймає свої позиції автоматично залежно від значення кількості пар полюсів  $p$ , що може бути будь-яким.

Кутова позиція ротора може бути довільною, а його пронумеровані пази фіксуються завданням координати першого паза  $\alpha_{r1}$ , найближчого до вертикальної осі, і зсунуті один від одного на просторовий кут  $\alpha_{rm}=360^\circ/Q_r$ , де  $Q_r$  - кількість пазів ротора ( $\alpha_{rm} = t_{ra}$ ).

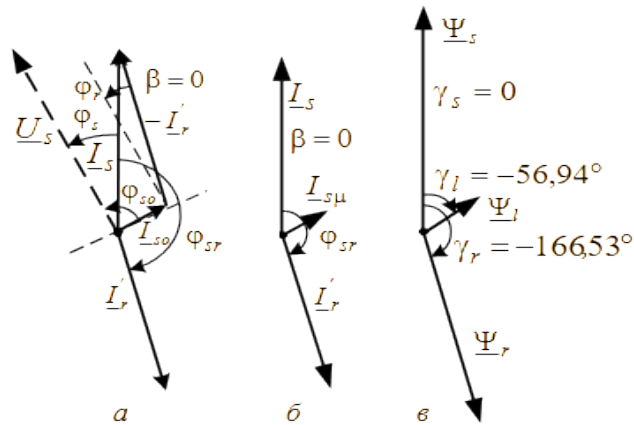


Рисунок 9 – Векторна діаграма до визначення струму ротора при навантаженні ТАД (а) та подібні діаграми струмів (б) і МПЗ (в)

Визначення струму ротора в режимі номінального навантаження. Важливим аспектом підготовчої роботи до розрахунку МП ТАД є визначення значень струмів обмотки ротора, а також їх фазового зсуву  $\alpha_{sr}$  по відношенню до струмів обмотки статора, які вже задані з узагальненою нульовою початковою фазою (1). Це можливо при врахуванні проєктних даних ТАД з використанням векторної діаграми, що детально надано в [7] і показано тут на рис. 9.

На основі цього формула струмів багатозазної системи їх миттєвих значень у стрижнях короткозамкненого ротора має вигляд:

$$i_{rk} = I_{mr} \sin \left\{ p \left[ (k-1) \alpha_{rn} + \alpha_{sr} + \alpha_{r1} \right] \right\}, \quad (2)$$

де  $k=1, 2, \dots, Q_r$  - номер паза відповідно нумерації на рис.1;  $I_{mr} = \sqrt{2} I_r$  – амплітуда фазного струму ротора.

Діюче значення фазного струму ротора  $I_r$  та фазовий зсув  $\alpha_{sr}$  для (2) беруться безпосередньо з проєктних даних [6] або визначаються на їх основі за методикою, викладеною в [7, 8]. Так, для аналізованого ТАД  $I_r=440$  А і  $\alpha_{sr}=-83,27^\circ$ , причому негативне значення кута дає відставання «хвилі» струмів ротора (2) від «хвилі» струмів статора (1).

Розподіл струмів по пазах статора і ротора у безрозмірній формі проілюстровано на рис. 10 (тут позначено  $\tau_p$  – полюсний крок).

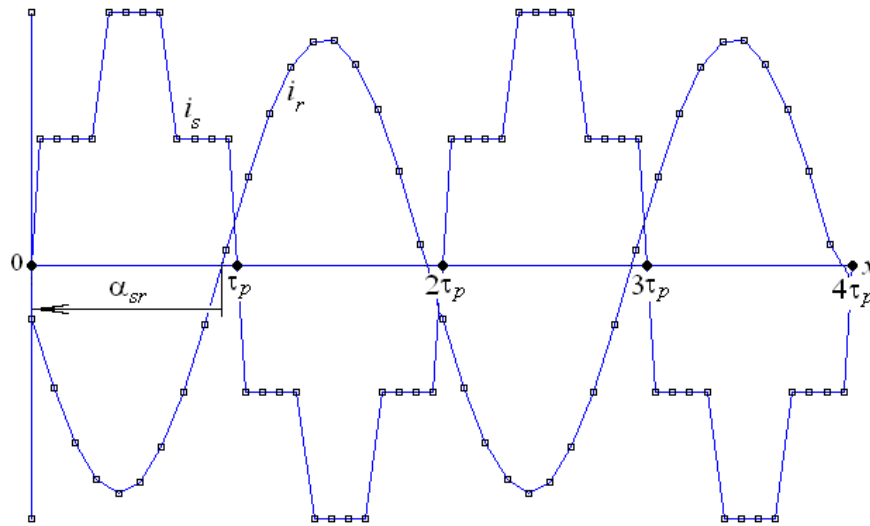


Рис. 10. Функції розподілу струмів статора  $i_s$  і ротора  $i_r$  по їх пазах уздовж лінії розгортки  $x$ , яка проходить по проміжку

Кількість ефективних провідників в кожному пазу ротора з короткозамкненою обмоткою  $N_{cr}=1$ .

Струми статора і ротора і їх фазові співвідношення:  
 $p=2$      $I_s=28.80$      $I_r=441.8$      $Q_s=48$      $Q_r=38$      $q_{sp}=4$ ;  $N_{cs}=14$   
 $\psi_{sr}=166.53$      $\alpha_{sr}=83.27$      $\text{tra}=9.47368$      $\text{ar1}=0.00$

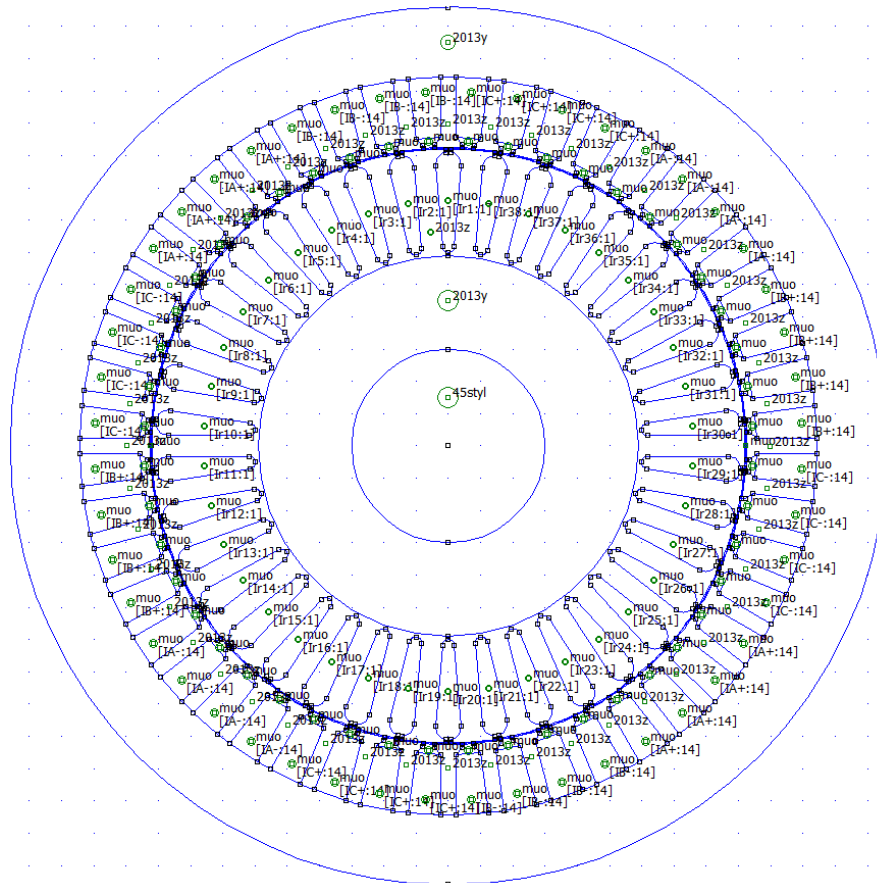
Амплітуди струмів статора та ротора  
 $I_{sm}=40.73\text{ A}$ ;  $I_{sm}/2=20.36\text{ A}$ ;  $I_{rm}=624.8\text{ A}$ .

Масив струмів ротора по пазах  $I_{rk}[1..38]$  (зазначені також кутові позиції пазів ротора  $\alpha_k$ )

$k$	$\alpha_k$	$I_{rk}$	$k$	$\alpha_k$	$I_{rk}$
1	0.00	145.5	2	9.47	-59.6
3	18.95	-258.4	4	28.42	-429.1
5	37.89	-553.3	6	47.37	-617.6
7	56.84	-614.9	8	66.32	-545.6
9	75.79	-417.2	10	85.26	-243.6
11	94.74	-43.5	12	104.21	161.2
13	113.68	348.5	14	123.16	498.0
15	132.63	593.5	16	142.11	624.7
17	151.58	588.3	18	161.05	488.1
19	170.53	334.9	20	180.00	145.5
21	189.47	-59.6	22	198.95	-258.4
23	208.42	-429.1	24	217.89	-553.3
25	227.37	-617.6	26	236.84	-614.9
27	246.32	-545.6	28	255.79	-417.2
29	265.26	-243.6	30	274.74	-43.5
31	284.21	161.2	32	293.68	348.5
33	303.16	498.0	34	312.63	593.5
35	322.11	624.7	36	331.58	588.3

Для всіх струмів у пазах ротора та статора необхідно розставити мітки властивостей та присвоїти їм конкретні параметри (магнітні властивості – символи струмів та числа ефективних провідників у кожному пазу). Для феромагнітних сердечників та валу необхідно також розставити мітки властивостей та вказати для них позначення кривих намагнічування, заздалегідь підготовлених у бібліотеці матеріалів. Зазначимо, що для зубців та спинок сердечників у ТАД використовуються різні криві намагнічування однієї і тієї ж електротехнічної сталі. На дугових лініях зовнішньої поверхні осердя статора необхідно встановити граничні умови Діріхле  $A_z=0$  для векторного магнітного потенціалу. Ці умови з конкретним ім'ям (наприклад, A=0) повинні бути визначені у програмі FEMM.

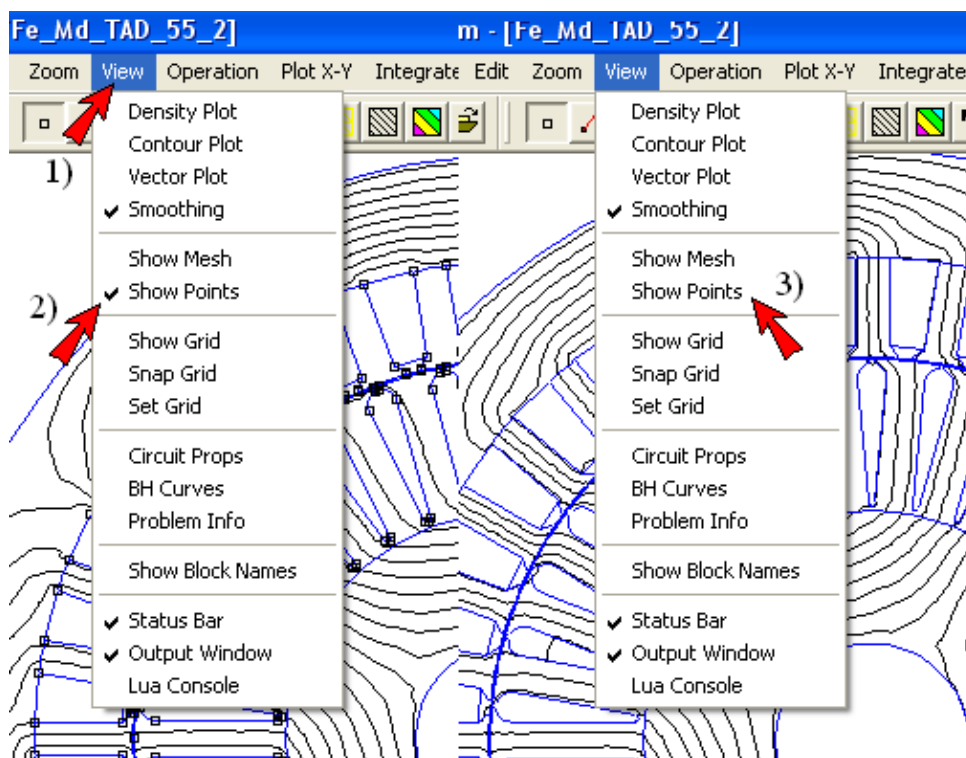
Фізико-геометрична модель ТАД, побудована на екрані комп'ютера, має вигляд, зображений на такому рисунку.



## ОТРИМАННЯ ІЛЮСТРАЦІЙ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРОГРАМОЮ FEMM

*Примітка 1:* На рисунках червона стрілка – це курсор, яким треба натиснути (кликнути) у показаному місці.

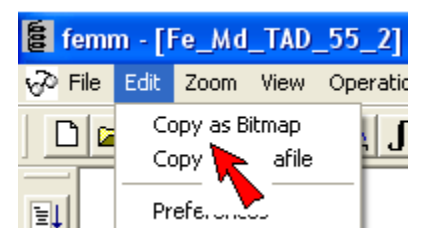
*Примітка 2:* Щоб на рисунках моделі ТАД позначення вузлів (node) у вигляді маленьких квадратиків (на рисунку ліворуч) не заважали якості зображення, слід у меню View за допомогою курсору «погасити» галочку перед опцією Show Points. На рисунку вказана послідовність дій 1) – 2) – 3), а оновлене зображення надано праворуч.



*Примітка 3.* Визначення отримання графічних зображень та електромагнітних і силових параметрів трифазного асинхронного двигуна у «ручному режимі» можливе з використанням файлу (прикладом, *Fe\_Md\_TAD\_55\_2*) з розширенням **Femview Document**.

*Примітка 4:* Поточні зображення, які створені власне програмою FEMM у межах графічної частини її робочого вікна, можна копіювати, натиснувши опцію Copy as Bitmap в меню Edit. Для подальшого опрацювання створену копію слід розмістити в середовище точкового графічного редактора Paint, а з нього – у текст і редакторі Word.

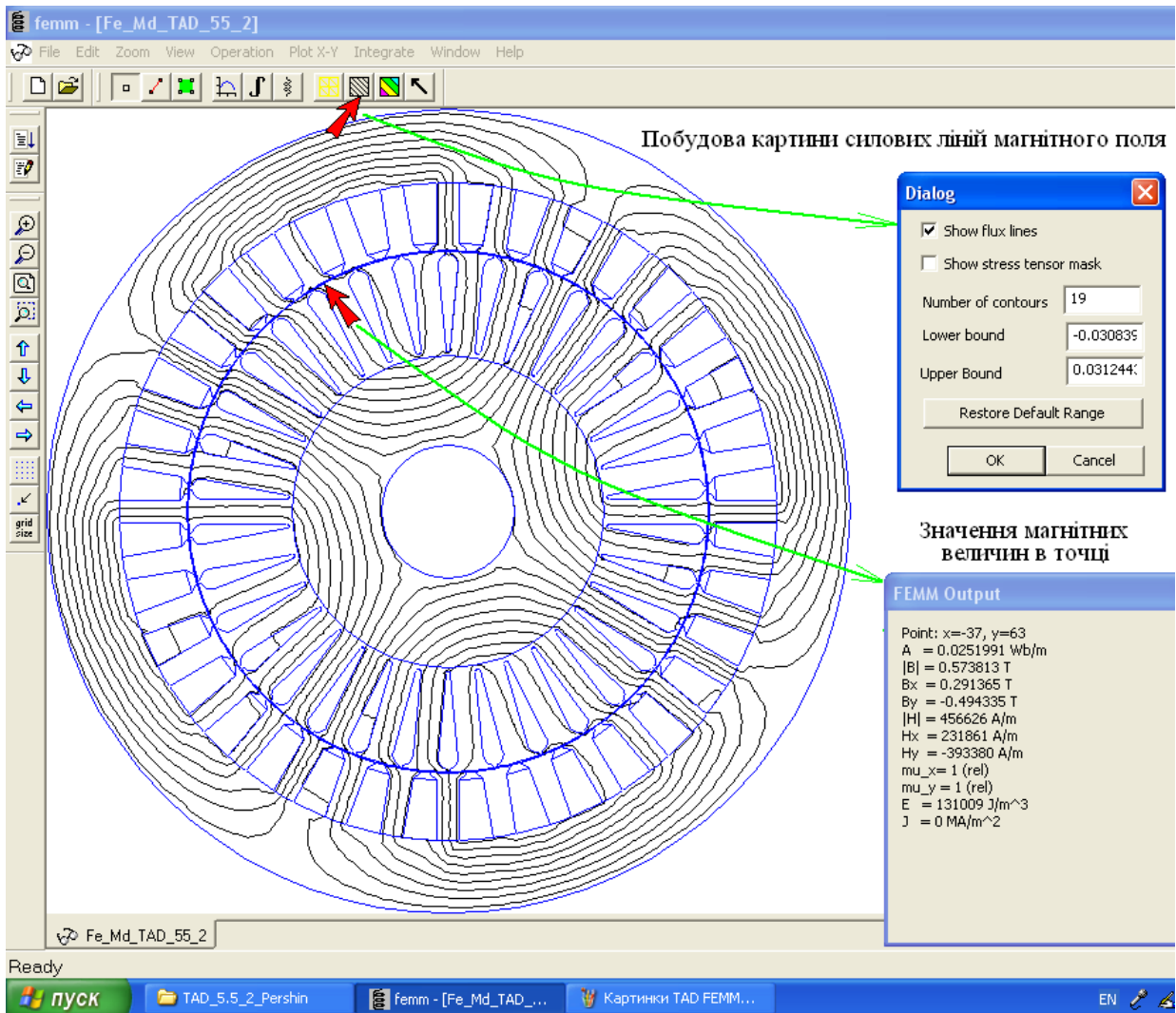
Якщо бажано отримати повну копію екрану, то треба скористатися кнопкою Print Screen на клавіатурі комп'ютера.



## ГРАФІЧНЕ ПОДАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ТРИФАЗНОМУ АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ

### 1. Картина силових ліній магнітного поля и значення параметрів магнітного поля в точках, що обираються курсором

Для того, щоб з'явилась картина силових ліній, треба в горизонтальному ряду кнопок натиснути на заштрихований квадратик, і у віконці, що відкриється, можна вказати бажану кількість ліній. Кнопкою ОК операція побудови картини магнітного поля реалізується (див. рисунок).



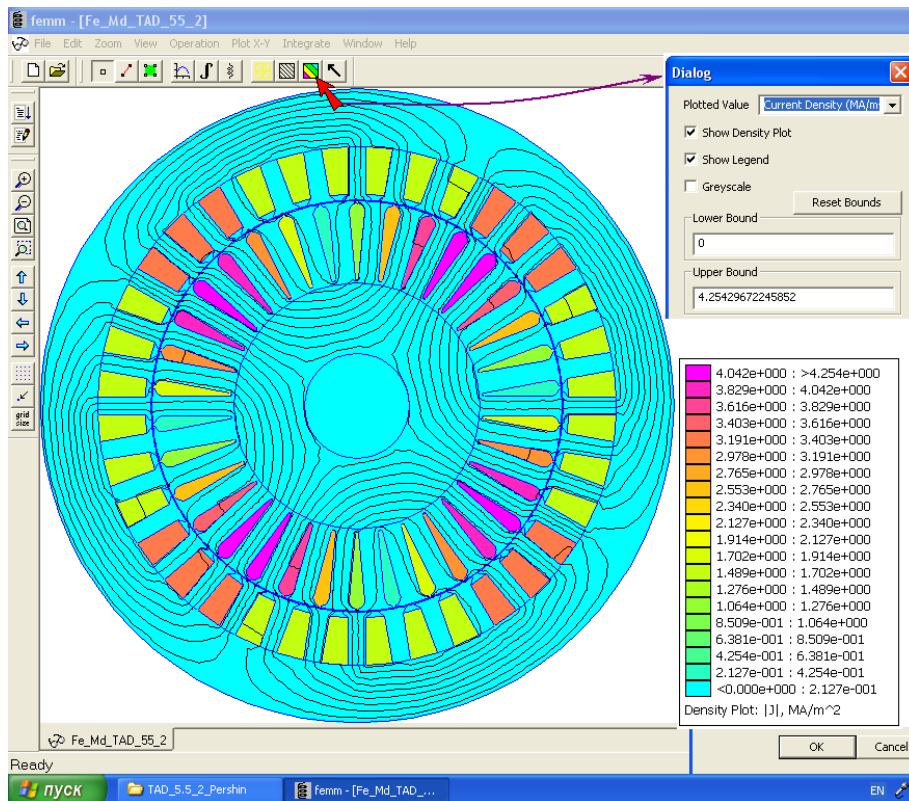
### 2. Визначення максимальних значень магнітної індукції в серединах зубців ротора і статора, в спинках осердь ротора і статора – по точкам на цих ділянках магнітопроводу

Для цього по черзі курсором вибираються точки в зазначених місцях, визначається модуль магнітної індукції  $|B|$ . З усіх отриманих значень вибирається найбільше для конкретної зубцевої структури, що і є результатом пошуку.



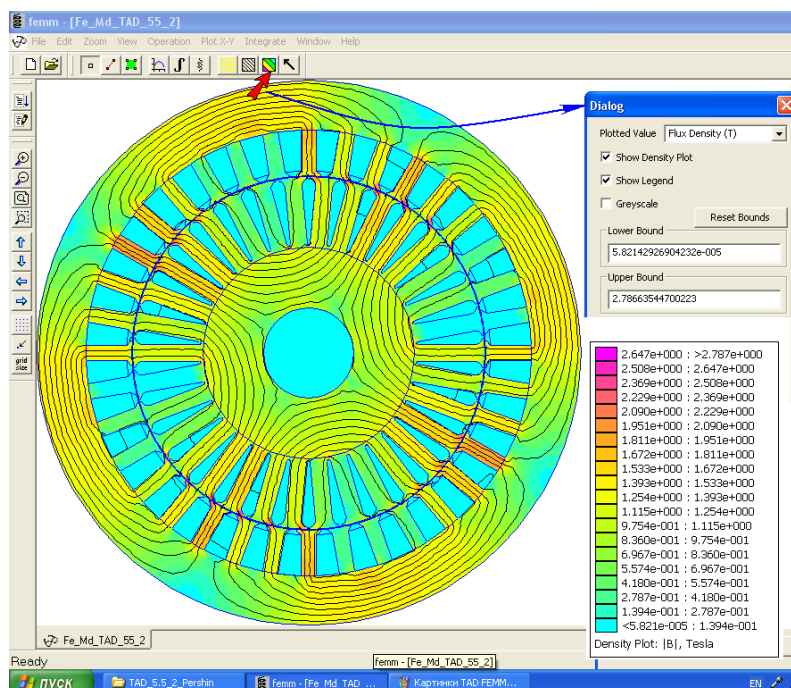
### 3. Тонована картина розподілу густини струмів в обмотках ТАД

На рисунку показана послідовність дій і шукана картина разом із кольоровою масштабованою шкалою густини струмів  $J$  у  $\text{МА}/\text{м}^2$ , що еквівалентно  $\text{А}/\text{мм}^2$



### 4. Тонована картина розподілу магнітної індукції

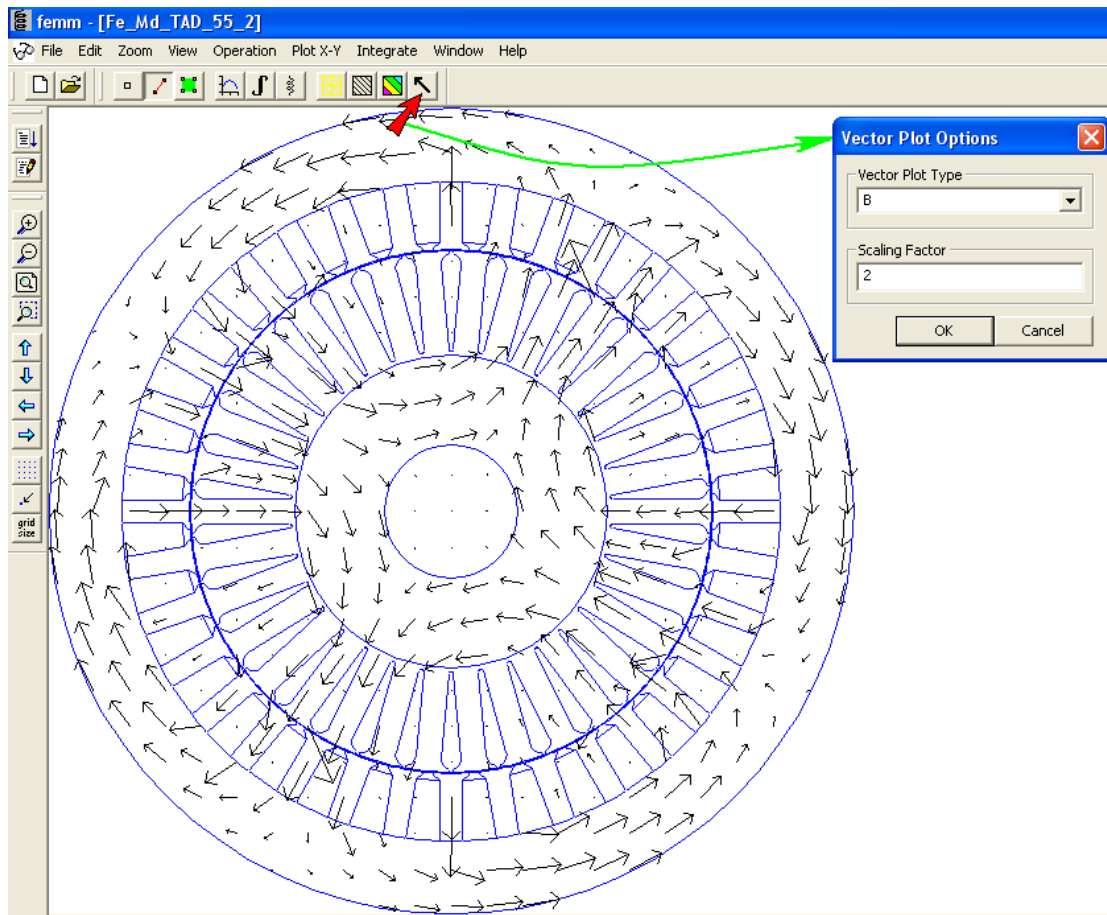
На рисунку показана послідовність дій і шукана картина разом із кольоровою масштабованою шкалою модуля магнітної індукції  $B$  у Тл.





## 5. Векторна картина розподілу магнітної індукції

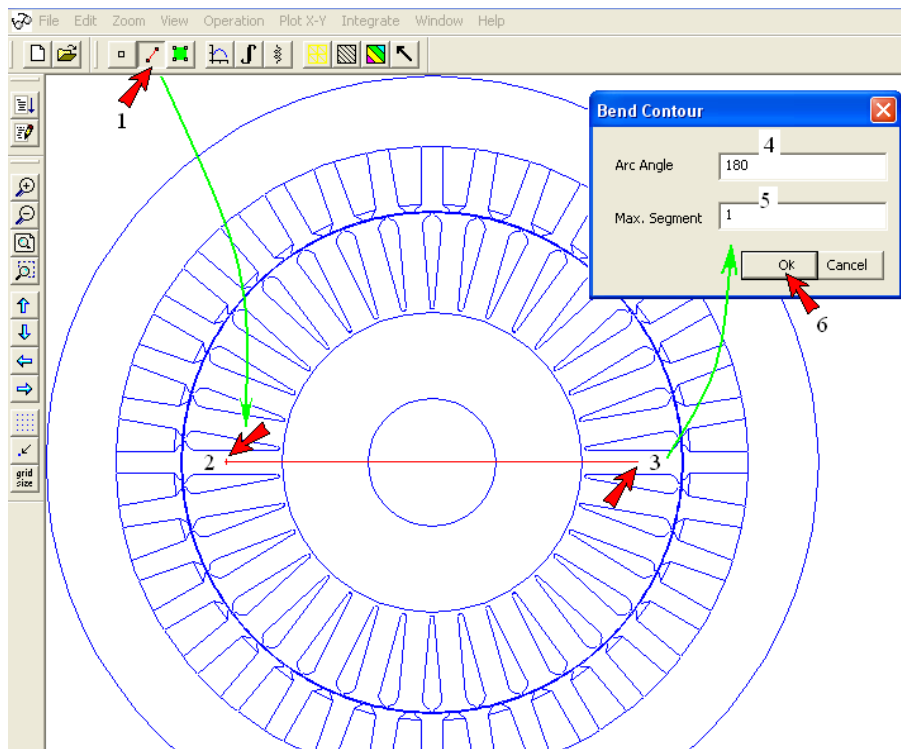
На рисунку показана послідовність дій і картина розподілу векторів магнітної індукції  $B$ . У віконці Scaling Factor задається масштабована довжина найбільшого вектора.



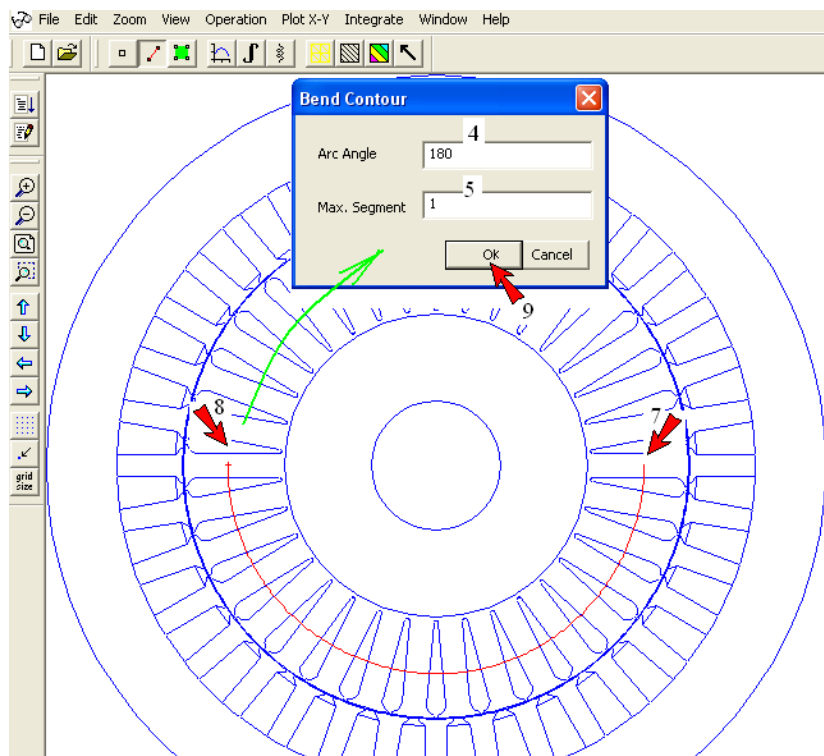
## 6. Графік розподілу радіальної складової магнітної індукції на лінії окружності, яка проходить на середньому рівні зубців ротора

На чотирьох наступних рисунках показана послідовність побудови зазначеної лінії, вибір величини для побудови графіка і власне сам графік.

Робота ведеться в режимі сегмента (позиція 1). Спочатку робляться послідовні кліки курсору у двох точках (позиції 2 і 3), на які буде опиратися дуга в зубцово-пазовому шарі ротора. З'являється прямий відрізок і ще – віконце, у якому треба задати кутовий розмір дуги у градусах (позиція 4) і розмір прямих сегментиків, з яких вона складається (це кут у градусах, який доводиться на один сегментик).



Після натиснення на кнопку ОК (позиція 6) прямий відрізок перетворюється на дугу (напівокружність), яка показана на наступному рисунку.



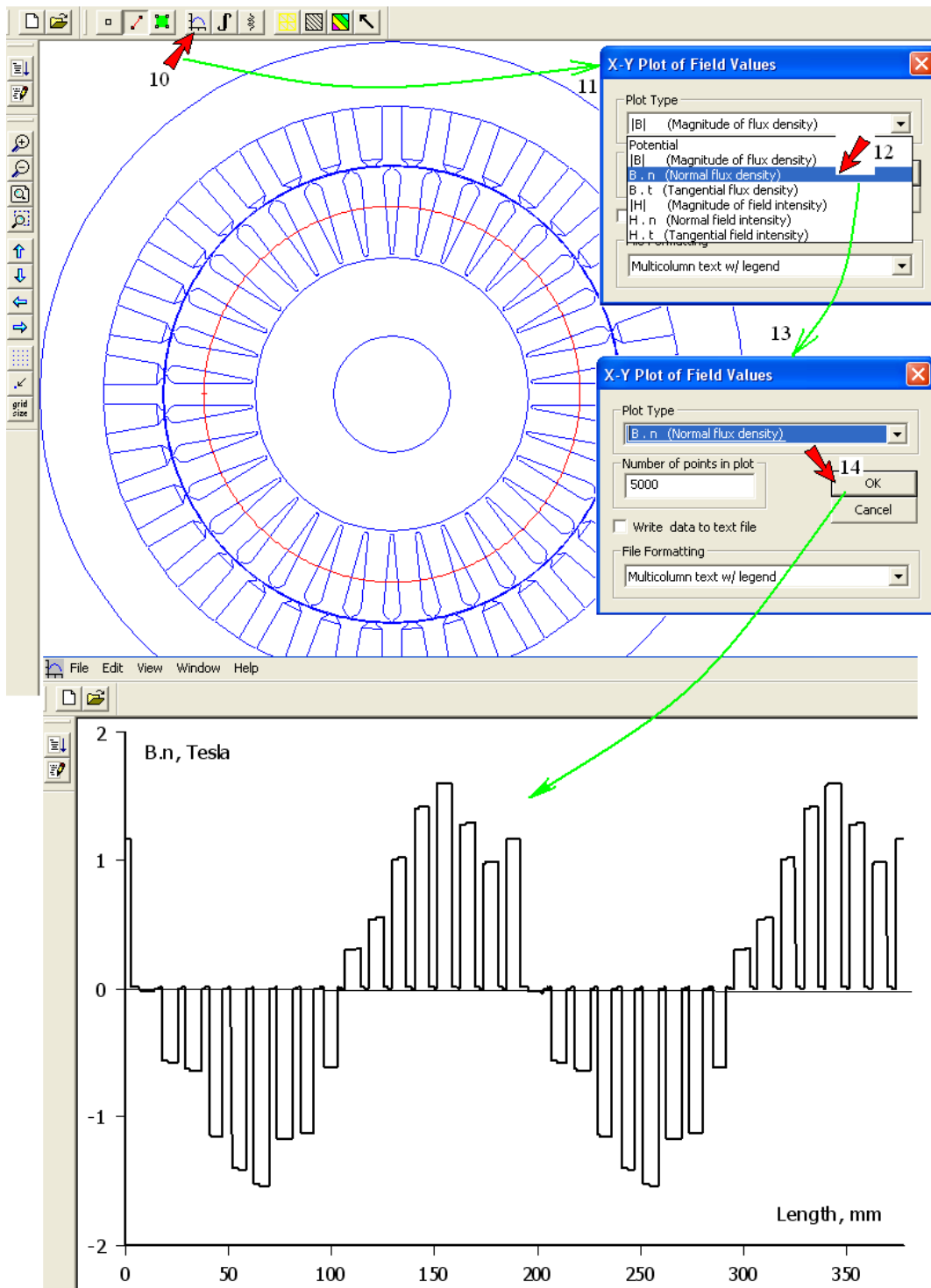
Зазначені вище дії треба повторити, але тепер у послідовності від позиції 7 до позиції 8. Знов з'явиться прямий відрізок і віконець для параметрів дуги, і після натиснення кнопки ОК (позиція 9) він перетворюється на другу дугу.

Таким чином в зубцово-пазовій структурі ротора виявиться повна окружність (див. наступний рисунок), на розгортці який буде побудований графік заданої величини.

Для початку процедури побудови графіку треба натиснути кнопку з відповідною піктограмою (позиція 10) і з'явиться вікно (позиція 11).

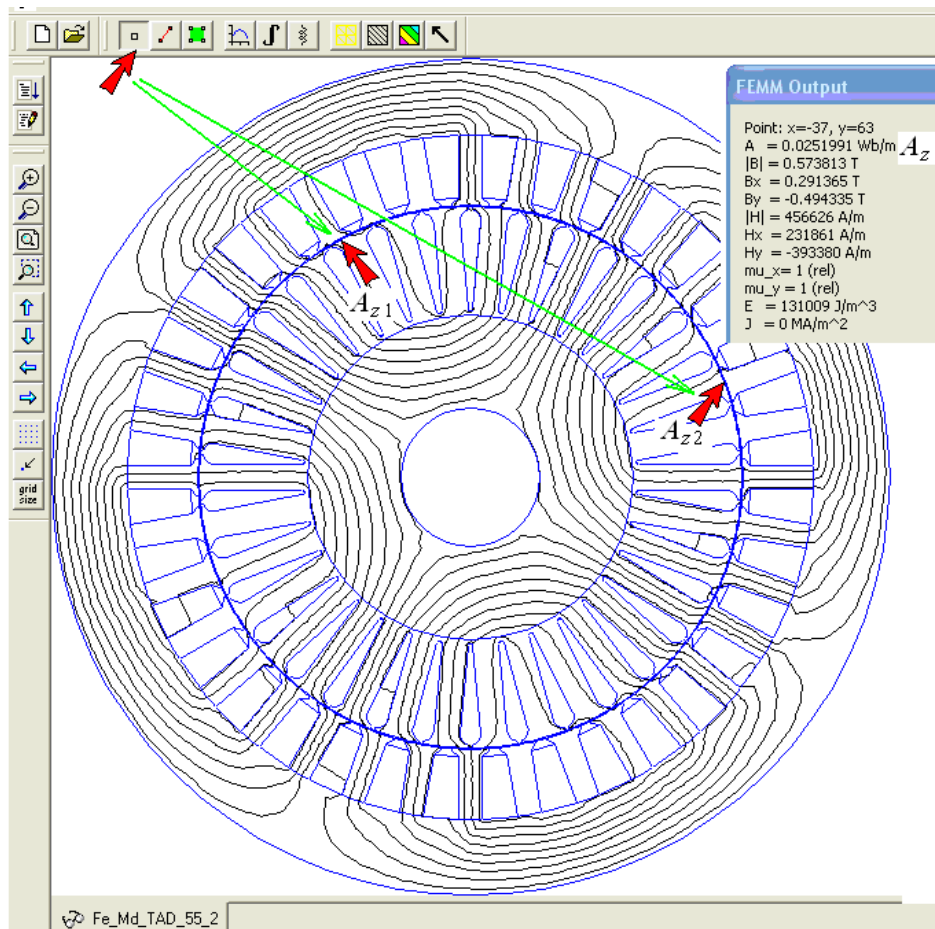
З наданих пропозицій обираємо нормальну складову магнітної індукції  $B_n$  (у полярних координатах це буде радіальна складова  $B_r$ ). Клікком курсору (позиція 12) відкривається додаткове віконце (позиція 13), де задається кількість інтервалів на графіку, приміром 5000) – велика кількість забезпечує якість зображення.

Після натиснення кнопки ОК (позиція 14) на екрані з'являється графік залежності  $B_n(x)$ , де  $x$  (або Length), поточна лінійна координата на розгорнутій окружності, яка була побудована на середньому рівні зубцево-пазової структури ротора.



## ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВОГО РОЗРАХУНКУ ЙОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

7. *Визначення магнітного потоку, що проходить через частину циліндричної поверхні на середній лінії проміжку на полюсному кроці*



За допомогою курсору на лінії окружності в проміжку треба знайти точку з максимальним позитивним  $A_{z1}$  значенням векторного магнітного потенціалу. Ці значення відображаються у вікні FEMM Output (див на рисунок).

Потім таким же чином треба знайти точку з максимальним негативним  $A_{z2}$  значеннями векторного магнітного потенціалу.

Отримані значення зберігаються з відповідним знаком (плюс або мінус).

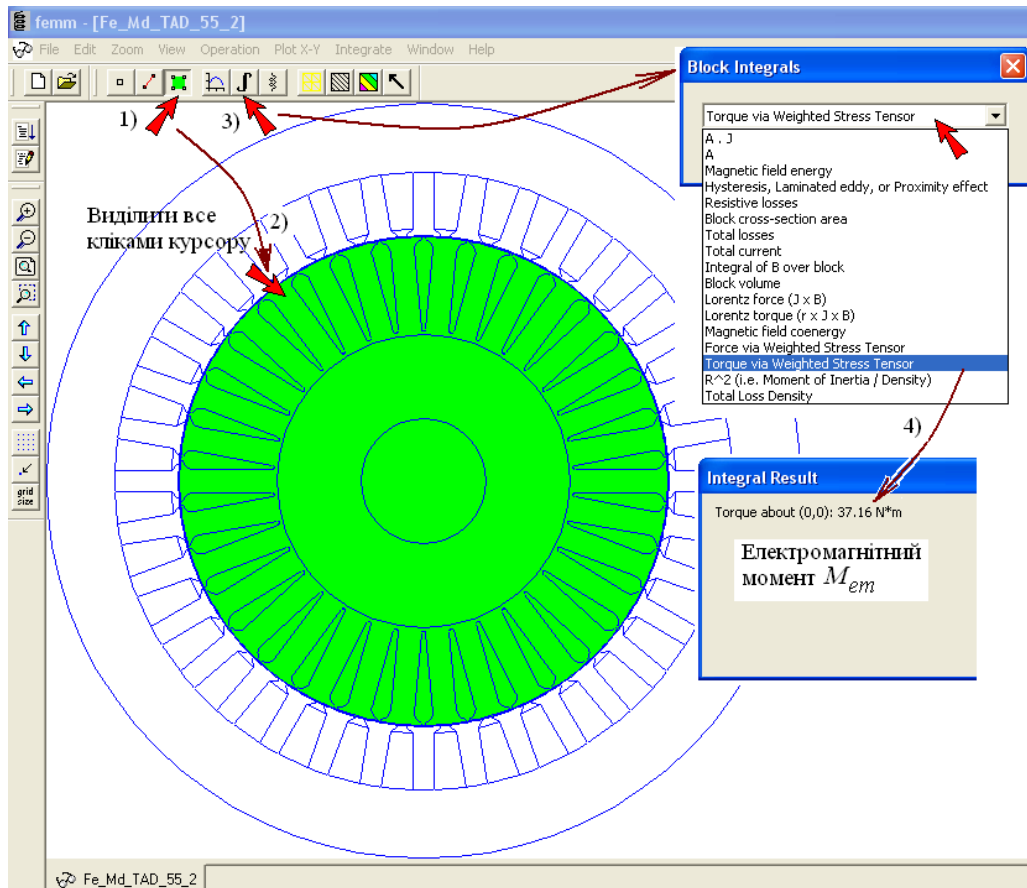
Тоді магнітний потік визначається за формулою:  $\Phi = (A_{z,1} - A_{z,2})' \cdot l_a$ , де  $l_a$  – активна довжина ТАД.

### 8. *Електромагнітний момент, що діє на ротор ТАД*

Послідовність дій вказана на рисунку.

Спочатку в режимі блока (позиція 1) курсором виділяються всі елементи ротора (позиція 2) і все в ньому стає зеленим. Потім натискається кнопка з зображенням інтеграла (позиція 3) і у вікні, що виникає, треба обрати опцію Torque via Waighted Stress Tensor (момент через тензор магнітного натягнення).

Після кліку курсором на назві даного параметра з'являється вікно (позиція 4) зі значенням електромагнітного моменту у Н·м.



### 9. Сили, що діють: на провідники в пазах ротора або провідники в пазах статора

Розглянемо визначення сил на прикладі паза статора, що показано на рисунку.

Щоб визначити сили, що діють на провідники, треба перейти в режим блока (позиція 1) і виділити зону потрібного паза (позиція 2).

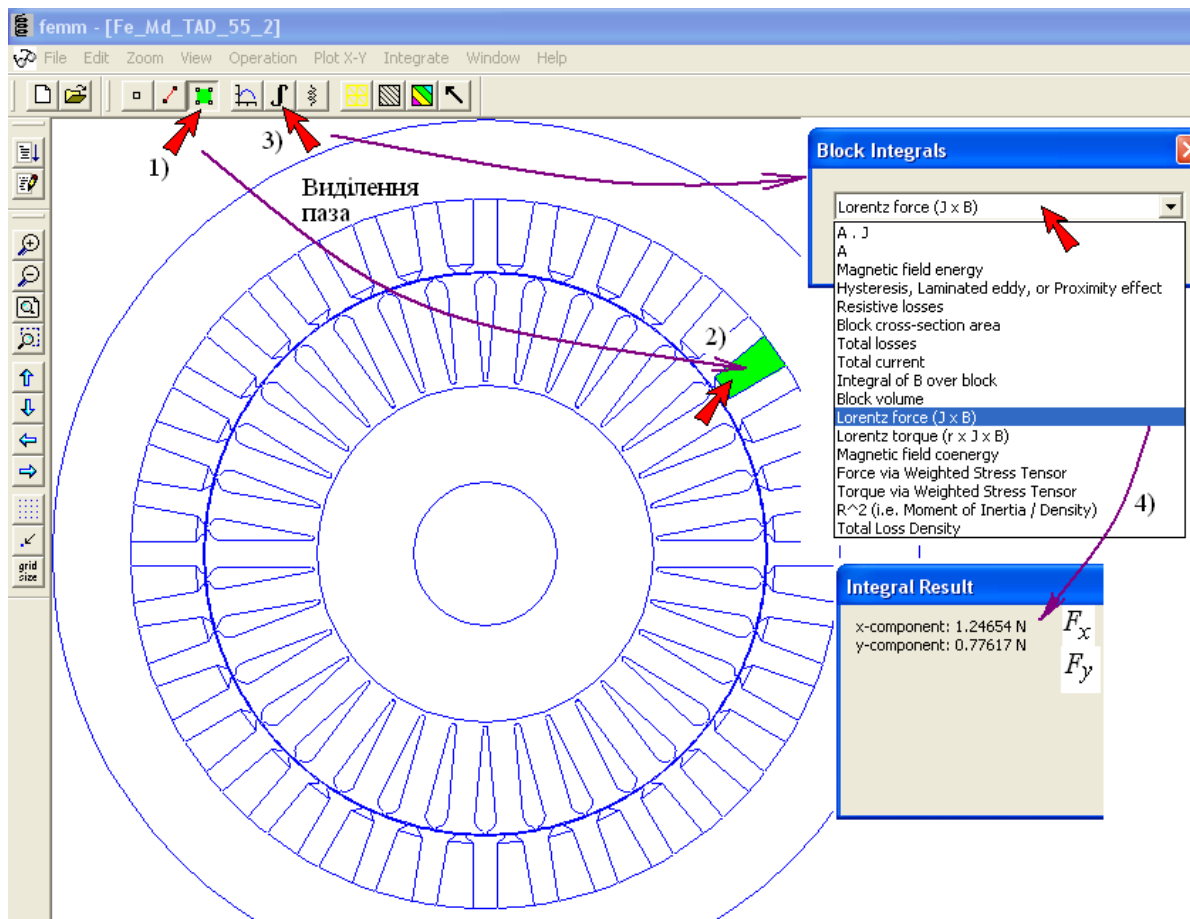
Потім натискається кнопка з зображенням інтеграла (позиція 3) і у вікні, що виникає, треба обрати опцію Lorentz force ( $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ ) (сила Лоренца). Після кліку курсором на назві даного параметра з'являється віконце (позиція 4) зі значенням координатних складових сили  $F_x$  та  $F_y$ .

За отриманими складовими сили далі визначається її модуль:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \text{ у Н.}$$

За складовими сили можна побудувати її вектор.

Перебираючи по чергово спочатку пази ротора, а потім статора, можна визначити максимальні значення сил, що діють на розташовані в них провідники, а також напрямки їх дії.



### 10. Сили, що діють на зубці осердя статора

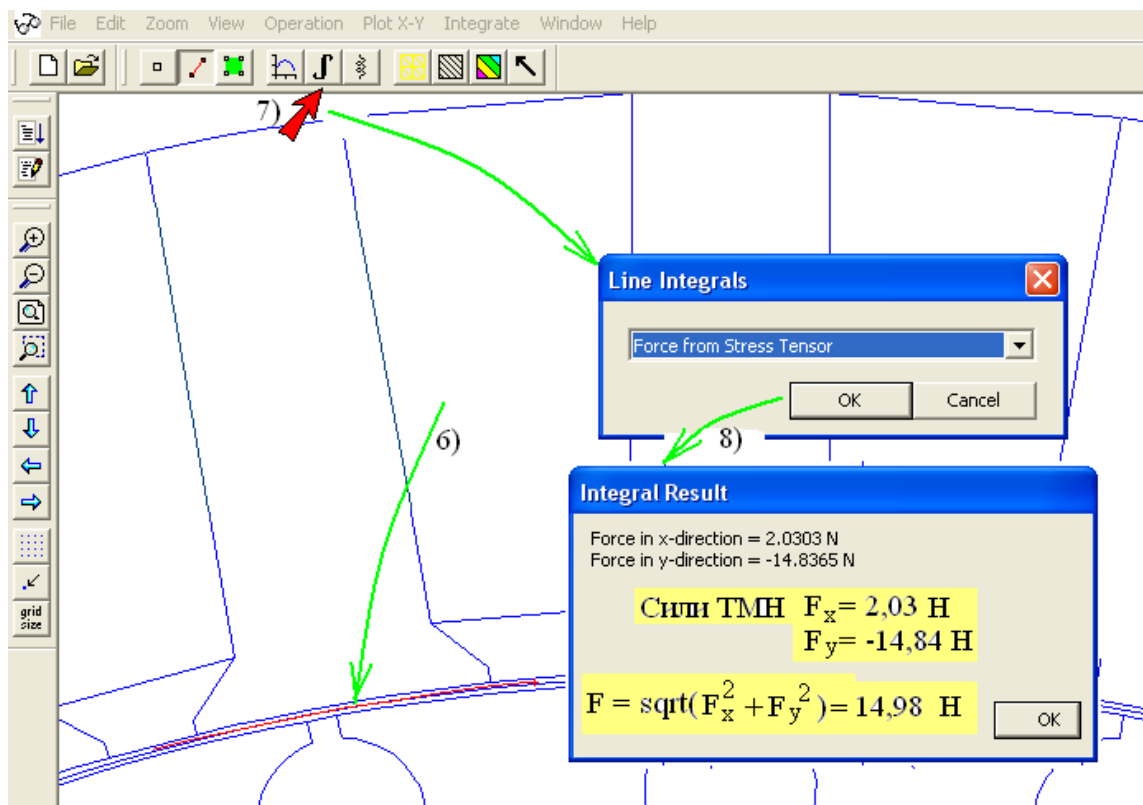
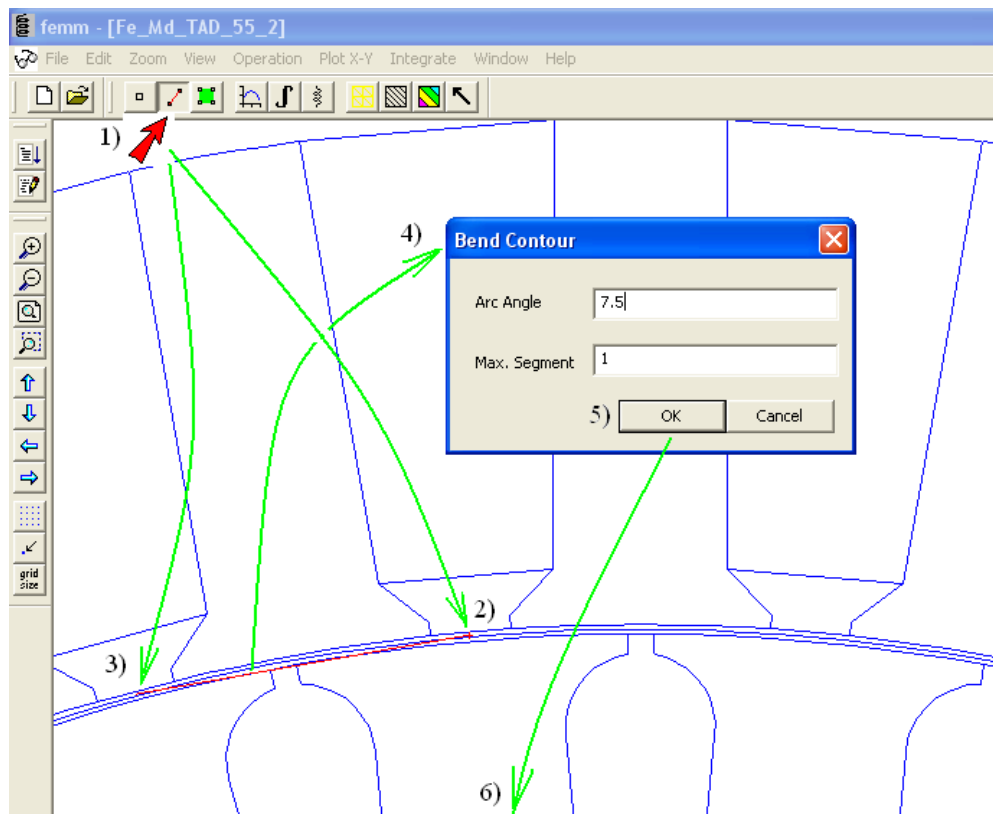
Ці сили визначаються на дузі зубцевого кроку через тензор магнітного натягнення (ТМН). Пояснення цього надається на наступних двох рисунках.

Спочатку у режимі сегмента (позиція 1) робляться послідовно два кліки у позиціях 2 і 3, які обов'язково знаходяться у повітряному проміжку. На екрані з'являється прямий відрізок і відкривається віконце (позиція 4), сенс якого вже розглянуто в пункті 6 вище за текстом. Але у даному разі кут (Arc Angle) повинен дорівнювати зубцевому кроку статора  $\tau_s = 360 / Q_s$ , де  $Q_s$  – кількість пазів статора ( $\tau_s$  у градусах). Після натиснення кнопки ОК (позиція 5) прямий відрізок у проміжку стає дугою (перехід за стрілкою 6).

Потім натискається кнопка з зображенням інтегралу (позиція 7 на другому рисунку) і у вікні, що виникає, треба обрати опцію Force from Stress Tensor (сила через тензор магнітного натягнення). Після кліку курсором на назві даного параметра з'являється віконце (позиція 8) зі значенням координатних складових сили  $F_x$  та  $F_y$ .

За отриманими складовими сили далі визначається її модуль: 
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \text{ у Н.}$$

За складовими сили можна побудувати її вектор.



Перебираючи по чергово зубцеві кроки статора, можна визначити максимальні значення сил, що діють на зубці статора, а також напрямки їх дії.

Все те, що зроблено для визначення сил, що діють на зубці статора, можна зробити і для визначення сил, що діють на зубці ротора.



## 11. Струм будь-якої обмотки двигуна, її магнітне потокозчеплення та індуктивність

Визначення зазначених параметрів надається на прикладі фазної обмотки статора  $A$ , і робота йде окремо з її частинами з позитивними ( $IA+$ ) і негативними ( $IA-$ ) напрямками струму в фазних зонах/

Натисненням кнопки (позиція 1) включається режим електричного кола і відкривається меню Circuit Properties з переліком струмів. З них обираємо частину фазної обмотки  $A$  з позитивними струмами (позиція 2). Після цього вікно Circuit Properties розширюється (позиція 3) в ньому з'являються електромагнітні параметри частини обмотки, що розглядається. Тут для даної частини обмотки виводяться струм  $i_{sA+}$ , магнітне потокозчеплення  $\Psi_{sA+}$  та індуктивність  $L_{sA+}$ . Значення величин  $\Psi_{sA+}$  та  $L_{sA+}$  враховують дію усіх обмоток, в яких були задані струми під час розрахунку магнітного поля ТАД.

Ті ж саме дії виконуються для частини фазної обмотки  $A$  з негативним напрямком струму ( $IA-$ ) за позиціями 4 і 5, і виводяться її струм  $i_{sA-}$ , магнітне потокозчеплення  $\Psi_{sA-}$  та індуктивність  $L_{sA-}$ .

На рисунки показано, як визначається магнітне потокозчеплення  $\Psi_s$  всієї фазної обмотки. Воно стосується активної довжини ТАД, тобто без врахування лобових частин.

1) **Circuit Properties**

Circuit Name: IA+ 3)

Results:

- Total current = 40.5573 Amps  $\rightarrow i_{sA+}, A$
- Voltage Drop = 0 Volts
- Flux Linkage = 0.254338 Webers  $\rightarrow \Psi_{sA+}, B\delta$
- Flux/Current = 0.00627108 Henries  $\rightarrow L_{sA+}, \Gamma H$
- Voltage/Current = 0 Ohms
- Power = 0 Watts

2) **Circuit Properties**

Circuit Name: IA- 5)

Results:

- Total current = -40.5573 Amps
- Voltage Drop = 0 Volts
- Flux Linkage = -0.233954 Webers  $\rightarrow \Psi_{sA-}, B\delta$
- Flux/Current = 0.00576848 Henries
- Voltage/Current = 0 Ohms
- Power = 0 Watts

**Магнітне потокозчеплення фазної обмотки статора  $A$**

$$\Psi_s = \Psi_{sA+} - \Psi_{sA-} = 0.2543 - (-0.2340) = 0.4883 \text{ Вб}$$

$L_{sA+}$  — сумарна індуктивність половини обмотки з позитивними напрямками струмів в фазних зонах (зазначимо, що враховуються взаємні зв'язки з рештою обмоток ТАД, по яких проходять струми



## 12. Магнітне потокозчеплення провідників в зоні, що виділяється

Магнітне потокозчеплення можна визначити для провідників в одному або декількох будь-яких пазах електричної машини, у тому числі – ТАД.

На рисунку конкретно розглядаються провідники в чотирьох пазах статора – це можуть бути пази однієї фазної зони, хоча і не обов'язково.

Виконання завдання проводиться в режимі блоку (позиція 1). При натиснутій кнопці курсором виділяються обрані пази – вони будуть мати зелений колір.

Потім натискається кнопка з зображенням інтегралу (позиція 2) і у вікні Block Integrals (позиція 3), що виникає, треба обрати опцію A (позиція 4) – буде інтегруватися векторний магнітний потенціал.

У вікні Integral Result (позиція 5) знаходиться значення магнітного потокозчеплення  $\Psi_s$ , сенс якого пояснено на рисунку. Там же показано, як перейти до магнітного потокозчеплення частини обмотки або котушки, провідники якої розташовані в розглянутих пазах, у разі якщо вони мають кількість  $N_z$  і усі з'єднані послідовно.

Зазначимо, як і раніше, що магнітне потокозчеплення враховують магнітне поле тільки на активній довжині ТАД, тобто без врахування лобових частин обмоток або котушок.

Integral Result

Integral of A over selection:  
1.52809e-006 Henry Amp meter<sup>2</sup>  
Integral of A / selected area:  
0.00227043 Henry Amp  $\Psi_s$ , Вб

Block Integrals

A

A, J

A

- Magnetic field energy
- Hysteresis, Laminated eddy, or Proximity effect
- Resistive losses
- Block cross-section area
- Total losses
- Total current
- Integral of B over block
- Block volume
- Lorentz force ( $J \times B$ )
- Lorentz torque ( $r \times J \times B$ )
- Magnetic field coenergy
- Force via Weighted Stress Tensor
- Torque via Weighted Stress Tensor
- $R^2$  (i.e. Moment of Inertia / Density)
- Total Loss Density

$S_z$  - площа виділеної зони selected area

$\Psi_s$  - магнітне потокозчеплення зони (це деяке МПЗ умовного усередненого провідника в цієї зони на активній довжині машини)

Якщо в пазах зони знаходиться  $N_z$  послідовно з'єднаних провідників, то їх сумарне МПЗ  $\Psi_{sz} = N_z \cdot \Psi_s$

Fe\_Md\_TAD\_15\_2

# АВТОМАТИЗОВАНЕ ФОРМУВАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ДЛЯ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА FEMM на алгоритмічній мові Lua

**Вступ.** Існують програмні продукти для чисельних розрахунків магнітних полів (МП) різних електротехнічних пристроїв. Програми дозволяють враховувати досить точно реальну геометрію пристроїв і нелінійні магнітні властивості феромагнітних осердь. Серед таких продуктів широкого поширення набула програма FEMM [1], заснована на методі кінцевих елементів і орієнтована на розрахунок двомірних МП. Цього вистачає для електричних машин (ЕМ) класичної конструкції, що мають практично плоскопаралельне МП в межах аксіальної довжини їх активної частини.

Програма FEMM для розрахунку МП вже не вимагає від користувача розробки яких-небудь математичних моделей - формул і систем рівнянь. Досить наслідувати інструкції, що додаються, при побудові *геометричних моделей*, що відображують конструкцію ЕМ, і *фізичних моделей*, що відображують фізичні властивості матеріалів і струмові параметри обмоток і постійних магнітів. Потрібно наслідувати інструкції і при витяганні результатів розрахунку МП і їх використання.

При експлуатації програми FEMM обумовлені дії виконувалися і ще виконуються вручну. Найбільший час розраховувачі витрачають на формування геометричних і фізичних моделей і витягання отримуваних результатів розрахунків, а також на перетворення їх у форму, придатну для подальшого використання в процесі проектування і дослідження ЕМ.

Проблеми витрат часу розраховувачів стають ще більш серйозними при багатоваріантних розрахунках МП і електромагнітних параметрів ЕМ, у випадках варіювання їх геометрією, розмірами, струмами, розташуванням рухомих частин.

Обумовлені проблеми можна здолати автоматизацією побудови геометричних і фізичних моделей ЕМ, управління розрахунком і перебору параметрів, а також витягання, обробки і приведення в необхідну форму результатів. Такі можливості користувачам програми FEMM надає інтегрована в неї алгоритмічна мова Lua. І завдання тепер полягає в написанні відповідного комплексу програм (*скриптів*). Це завдання є дуже складним, оскільки вимагає володіння знаннями в областях ЕМ, програмування і теорії МП. Але це завдання цілком виправдане, оскільки програма пишеться один раз, а використовується безліч разів і будь-якою кількістю користувачів.

Скрипти Lua дозволяють багаторазово підвищити продуктивність розраховувачів, і при цьому ще забезпечити можливість отримання таких параметрів і характеристик електричних машин, які практично неможливо отримати в "ручному" режимі роботи з програмою FEMM.

## Загальна характеристика скрипта Lua

*Lua* - це швидка, легка і зручна скриптовий мова програмування, яка створювалася для програмування баз даних. Простий синтаксис і легкість вбудовування Lua в інші програми забезпечили Lua широке поширення. Реалізація Lua має окремо компілятор з початкової мови у виконуваний код і віртуальну машину для виконання генерованого коду. Lua являє собою мову з динамічним визначенням типів даних. Змінні мови можуть містити значення будь-якого типу. Усі значення в Lua можуть зберігатися в змінних, використовуватися як аргументи при виклику функцій і повертатися у вигляді результату їх виконання. Lua являє собою ядро мови, яке можна вбудовувати в прикладну програму, наприклад, в FEMM.

Файл скрипта Lua пишеться в текстовому редакторі, але повинен мати тип "LUA", файли даних і результатів - тип Текстовий документ.

Тексти файлів скриптів і файлів даних можна писати в редакторі *Блокнот*. У рядках цих файлів усе після подвійного дефіса (--) програма сприймає як *коментарі* і для роботи не використовує.

Імена змінних записуються на латиниці і можуть бути довільними, але повинні починатися з букви.

У коментарях після подвійного дефіса (--) можна використовувати як латиницю, так і кирилицю.

Програми Lua, як і інші мови програмування, оперують з різними **типами даних**, причому тип даних заздалегідь оголошувати не потрібно, оскільки він встановлюється автоматично після першого використання відповідного ідентифікатора, наприклад

Str1="RezTAD\_3\_1" - строкова змінна;

ja=15 - цілочисельна змінна; Is=12.135 - змінна з фіксованою точкою; Rrp=1.540e-5 - змінна з плаваючою точкою.

Є ще Булеві змінні.

Lua, як і інші мови програмування, дозволяє створювати функції (*function*), наприклад:  
function Force\_xy(x, y, grupe) { *оператори програми* } end  
Звернення до функції повторює її ім'я із заміною формальних змінних на фактичні Force\_xy(x2, y2, gr), причому значення x2, y2, gr перед зверненням повинні бути визначені.

Lua може оперувати з *циклами* (повторюваними діями), наприклад: цикл перебору із заданим числом і кроком повторень

for q=1, qsp, 1 do { оператори програми } end

цикл перебору із завершенням по виконання постумови

b=0 repeat b=b+1 { оператори програми } until (b==10)

Використовуються також умовні оператори:

if hr0>1e-2 then mi\_addnode(xb,ya) end

if i2>=10 then x=0.5 y=2.35 else x=2.3 y=2.35e2 end

В умовних операторах використовуються операції порівняння :

==, >, <, >=, <=, !=

Є також логічні операції and (и) or (чи), not (ні), за допомогою яких виходять складені умови логіки, наприклад,

if (a>0) and (b==1) then, if (a<=0) or (a>10) then.

Змінні можна об'єднувати в одновимірні або двовірні масиви.

Оголошення одновимірного масиву виглядає так

F = {}

і тоді цей масив використовується, наприклад, так:

for i=1,qsp,1 do F[i] = Ns\*A/S Fsin=2\*F[i]\*sin(alk)/qp1 end

Можна робити обчислення по **стандартних функціях**: *sqrt* - корінь квадратний; *sin*, *cos*, *tan*, *atan*, *atan2* - синус, косинус, тангенс, арктангенс та ін.

Записувані **свої формули** використовують звичайні арифметичні і алгебраїчні дії, наприклад:

y=2.5\*x^3/(b+c\*d1) c=sqrt(a^2+b^2) a=c\*cos(fi) b=c\*sin(fi)

Для тригонометричних функцій кути (fi) потрібно задавати в радіанах, а при побудові геометричних об'єктів Lua оперує кутами – в градусах.

**Команди параметрів *Задачу*** в скриптах Lua (для побудови фізико-геометричних моделей і виконання розрахунків):

**create(0)** – вказівка на початок з «чистого аркуша» нової задачі розрахунку магнітного поля;

**mi\_probdef(0,"millimeters","planar",1E-8,la,a\_ce)** – вказівка параметрів завдання : частота (для стаціонарного магнітного поля - 0), одиниці виміру розмірів (мм), тип координат (прямокутні), активна довжина по аксіальній осі, точність рішення рівнянь магнітного поля (нев'язка), мінімально допустимий кут трикутників :

**mi\_analyze(1)** – команда початку виконання розрахунку магнітного поля

`mi_loadsolution()` – команда завантаження і показу рішення, відповідного об'єкту, що розраховується.

Побудова геометричних моделей пристроїв, що розраховуються, за допомогою Lua заснована на командах розставляння вузлів - координатних точок  $(x, y)$ . На їх основі своїми командами будуються *прямі відрізки* і *дуги*.

У замкнених підобластях, що утворюються, - *блоках* ставляться їх *мітки*, через які їм приписуються фізичні властивості.

Ці властивості задаються окремими командами, в яких вказуються усі необхідні магнітні параметри матеріалів, значення струмів, розміри трикутників скінченно-елементної структури та ін. Є також свої команди для вибору і розставляння *граничних умов* (`mi_addboundprop`).

Перелічені вище об'єкти можна об'єднувати в нумеровані *групи*, щоб оперувати з усіма об'єктами групи відразу.

Наведемо команди, що часто зустрічаються, де  $(x, y)$ ,  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  – координати вузлів:

1) додавання об'єктів:

`mi_addnode(x,y)` – вузол;

`mi_addsegment(x1,y1,x2,y2)` – відрізок між вузлами;

`mi_addarc(x1,y1,x2,y2,angle,maxseg)` – дуга між вузлами з опорним кутом '*angle*' з кутових сегментів розміром '*maxseg*';

`mi_addblocklabel(x,y)` – ярлик блоку;

2) вибір найближчих до точки  $(x, y)$  об'єктів:

`mi_selectnode(x,y)` – вузол;

`mi_selectsegment(x,y)` – відрізок;

`mi_selectarcsegment(x,y)` – дуга;

`mi_selectlabel(x,y)` – ярлик блоку;

`mi_selectgroup(n)` – *n*-а група;

3) копіювання:

`mi_mirror(x1,y1,x2,y2,edit)` – вибраних об'єктів відносно лінії, що проходить через точки  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ , де *edit* – дія редагування : 0 - для вузлів, 1 - відрізків, 2 - дуг, 3 - міток, 4 - груп;

`mi_copyrotate(bx, by, angle, copies, edit)`, де *copies* – стільки разів з поворотом на кут *angle* відносно базової точки *bx, by*; *edit* – див. вище;

`mi_copytranslate(dx, dy, copies, edit)` – копіювання вибраних об'єктів з переміщенням на відстані *dx, dy* по прямокутних координатах, *copies* - кількість копій, *edit* – див. вище.

4) очищення виділення усіх раніше вибраних об'єктів: `mi_clearselected()`;

5) завдання властивостей матеріалів

`mi_addmaterial("materialname", mu_x, mu_y, H_c, Jr, Ji, Cduct, Lam_d, Phi_hmax, Lam_fill, Lam_Type, Phi_hx, Phi_hy)` – додає новий матеріал з ім'ям "materialname" з матеріальними властивостями:

- *mu\_x* – відносна магнітна проникність в *x* - або *r* - напрямку,

- *mu\_y* – відносна магнітна проникність в *y* - або *z* - напрямку,

- *H\_c* – постійна коерцитивна сила магніту в ампер/метрах,

- *Jr* – реальна (у фазі) і *Ji* – уявна частині густини струму в Ампер/мм<sup>2</sup>,

- *Cduct* – електрична питома провідність матеріалу в МСм/м (MS/m),

- *Lam\_d* – товщина розшарування матеріалу в міліметрах (товщина листів);

- *Phi\_hmax* – кут запізнювання при гістерезисі (у градусах), використовуваний для нелінійних кривих В-Н,

- Lam\_fill – коефіцієнт заповнення розширеного (шихтованого) феромагнетика (це параметр, як правило, задається значенням 1 в діалоговому вікні femte препроцесора, тому що, за умовчанням, залізо цілком заповнює об'єм);
- Lam\_type – встановити тип розширення : 0 - не шаруватий або шаруватий в площині розрахунку; 1 - листовий в площині  $x$  або  $r$ ; 2 - листовий в площині  $y$  або  $z$ ; 3 - магнітний провідник; 4 - багатожильний провід; 5 - дріт типу литца (Litz), 6 - квадратний дріт;
- Phi\_hx, Phi\_hy – для лінійних завдань кути запізнювання на гістерезис в  $x$  - і  $y$  – напрямках (у градусах).

Приклади команд:

`mi_addmaterial("muo",1,1)` - матеріал блоків з немагнітними властивостями;

`mi_addmaterial(bh_name,0,0,0,0,0,dsl,0,kFe,0,0)` – матеріал феромагнітної ділянки магнітного ланцюга з ім'ям кривої намагнічення `bh_name`.

б) установка властивості матеріалу конкретної підобласті - блоку:

`mi_setblockprop("blockname", automesh, meshsize, "incircuit", magdir, group, turns)`, где `"blockname"` – ім'я ярлика для магнітних властивостей блоку, `automesh` - вибір способу триангуляції скінчених елементів, `meshsize` - обмежуючий розмір елемента, `"incircuit"` - символ струму, `magdir` - напрям намагнічення, `group` - номер групи, `turns` - кількість ефективних провідників із струмом.

Наприклад,

```
-- Матеріал для спинки осердя статора
x=0 y=rse-hys/2 mi_addblocklabel(x,y) mi_selectlabel(x,y)
mi_setblockprop(bhy,0,fe2," ",0,1,0) mi_clearselected()
--Завдання властивостей струму в пазу статора
```

```
x=-40 y=60 mi_addblocklabel(x,y) mi_selectlabel(x,y)
mi_setblockprop("muo",0,fe4,IA+,0,4,Ncs) mi_clearselected()
```

Для відкриття файлу даних з ім'ям DanTAD\_PN\_p на читання використовується команда `f_d = openfile("DanTAD_PN_p" .. ".txt","r")`

Оператор читання `read(f_d, "*n", "*l")` з чергового рядка файлу даних бере значення стількох числових або строкових даних, скільки разів в нім фігурує опція `"*n"`, а опцією `"*l"` буде зроблено переведення на новий рядок, тобто що залишився в рядку будь-який текст ігнорується і використовується розраховувачем як коментар (тут його прийнято відділяти символом:)

```
PN=read(f_d, "*n", "*l")    -- номінальна потужність ТАД, кВт
Usn=read(f_d, "*n", "*l")  -- номінальна фазна напруга, В
Is=read(f_d, "*n", "*l")   -- діюче значення фазного струму.
```

Для цих команд у файлі даних мають бути передбачені відповідні рядки

```
3   : PN   - номінальна потужність ТАД, кВт
220 : Usn  - номінальна фазна напруга, В
5.95 : Is  - діюче значення фазного струму статора, А
```

Після введення усіх даних файл `f_d` закривається командою `closefile(f_d)`.

Для відкриття текстового файлу результатів з ім'ям RezDanTAD\_PN\_p на запис використовується команда:

`writeto("RezDanTAD_PN_p")`

Оператор `write` записує дані у файл результатів, в нім опція `"\r\n"` дає перехід на новий рядок, а символ `%b.3f` є форматом (`format`) числа, тобто в цьому прикладі під число виділяється 6 позицій, у тому числі 3 - під дробову частину.



```
write(format(" ms=%1.0f",ms),format(" p=%1.0f",p),format(" fs=%2.0f",fs),"r\n",
format(" PN=%5.2f",PN),format(" Usn=%3.0f",Usn),
format(" Is=%5.1f",Is),"r\n","r\n")
```

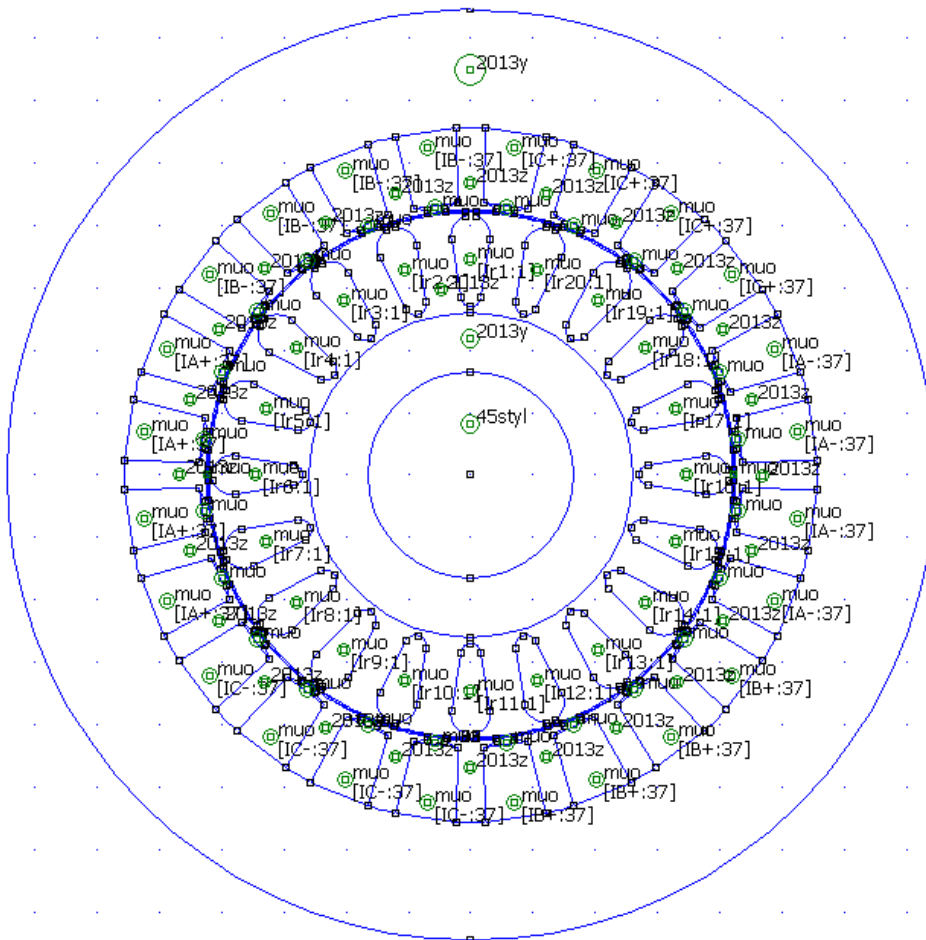
Після запису усіх необхідних даних файл результатів закривається командою `writeto()`.

Файл програми і файли початкових даних повинні знаходитися в загальній для них теці, там же з'являться усі файли результатів.

Скрипти запускаються з робочого вікна в FEMM "кнопкою" *Open Lua Script* в меню *File*.

У вікні, що з'являється, необхідно встановитися згадану теку і курсором "кликнути" ім'я скрипта Lua. Далі залишається відстежувати хід роботи програми і дочекатися її завершення. Після цього можна розглядати результати роботи програми в графічних і текстових файлах.

Повніший набір команд і процедур знаходиться в додатку до програми FEMM, які в перекладі надані у файлі «FEMM\_Lua\_proc».



Приклад фізико-геометричної моделі ТАД

**Приклад створення скрипту Lua  
для побудови в програмному середовищі FEMM  
геометричних моделей зубцево-пазових структур електричних машин**

Приклад, що надається, стосується зубцево-пазової структури трифазного асинхронного двигуна (ТАД).

**1 Конструкторська модель ТАД**

Типову конструкторську модель ТАД показано на рис. 1, де також подано позначення й напрямки прямокутної  $x, y$  та полярної  $r, \alpha$  систем координат, що використовуються.

Вихідні параметри ТАД, що задаються у файлі даних для повного формування геометричної моделі осердя статора і ротора ТАД:

$l_a$  – активна довжина статора і ротора;

$r_{rv}, r_{re}, r_{si}$  – радіуси окружностей вала і поверхонь осердя ротора та розточення осердя статора;

$h_{ys}$  – висота спинки осердя статора;

$Q_r, Q_s$  – кількості пазів ротора і статора.

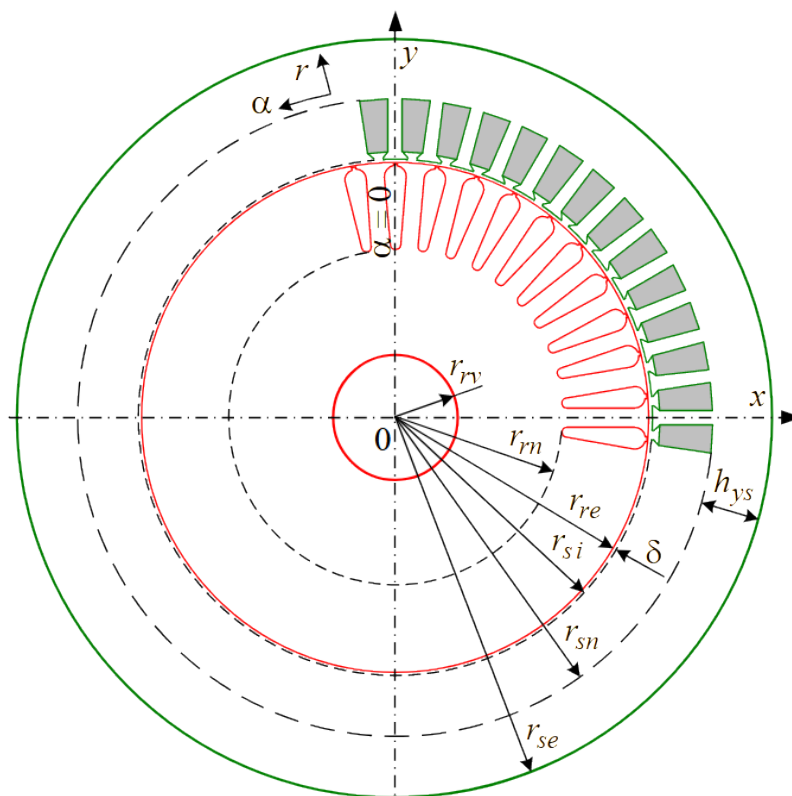


Рисунок 1 – Конструкторська розрахункова модель ТАД

Деталізації вимагають зубцево-пазові структури статора і ротора. Прийняті форми їх пазів з позначенням мінімуму розмірів і опорних точок подано на рис. 2 і рис. 3.

Для паза статора на рис. 2 позначено:

$h_{s1}, b_{s1}$  – висота і ширина шліца;

$h_s, b_{s2}, b_{s3}$  – висота і дві ширини паза.

Для паза ротора на рис. 3 прийняті позначення:

$h_r$  – висота паза;

$h_{r1}, b_{r1}$  – висота і ширина шліца;

$r_{r1}, r_{r2}, h_{r2}$  – радіуси утворювальних кіл і відстань між їх центрами.

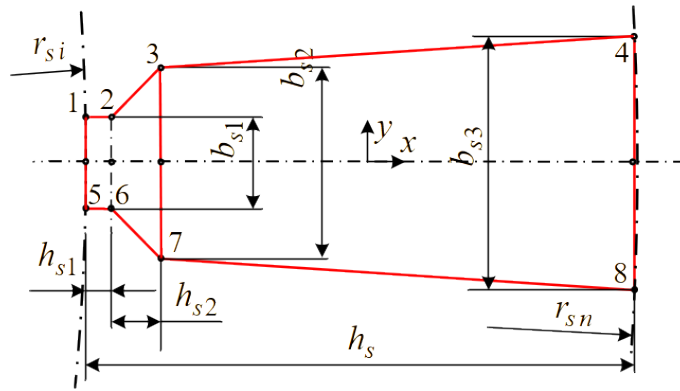


Рисунок 2 – Конструкція паза статора

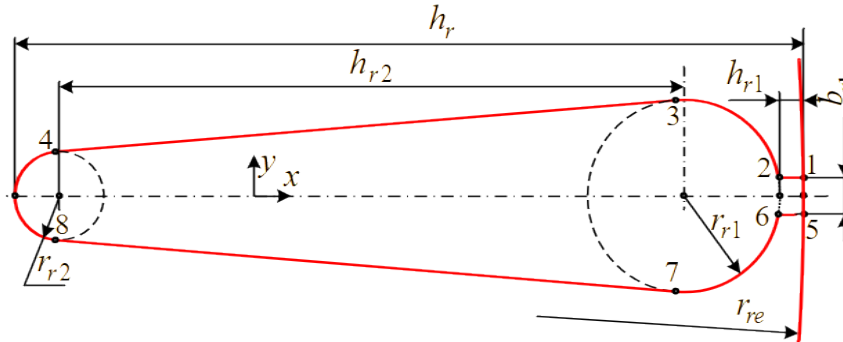


Рисунок 3 – Конструкція паза ротора

На основі представлених вихідних даних обчислюються додатково параметри геометричної моделі ТАД:

$r_{se}=r_{si}+h_s+h_{ys}$  – радіус статора зовнішній;

$r_{sn}=\sqrt{x^2+y^2}$  – радіус по кутах дна пазів статора, де  $x=r_{si}+h_s$ ,  $y=b_{s3}/2$ ;

$h_{yr}=r_{re}-h_r-r_{rv}$  – висота спинки осердя ротора;

$\delta=r_{si}-r_r$  – повітряний проміжок (потім замість  $\delta$  буде  $delta$ );

$t_{sa}=360/Q_s$ ;  $t_{ra}=360/Q_r$  – зубцево-пазові кроки статора і ротора в градусах.

Пази статора і ротора будуються за координатами вузлових точок (реперні точки), які пронумеровані на рис. 2 і рис. 3. Для визначення цих координат пази повторено на рис. 4 і рис. 5 з додаванням необхідних позначень розмірів і кутів.

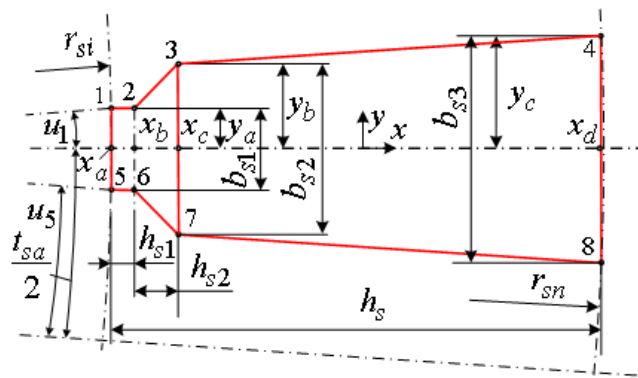


Рисунок 4 – Паз статора з позначенням розмірів, реперних точок і їх координат



Координатні розміри елементів паза статора (рис. 4) обчислюються за формулами:  
 $y_a = b_{s1}/2$ ;  $y_b = b_{s2}/2$ ;  $y_c = b_{s3}/2$ ;  $x_a = \sqrt{r_{si}^2 - y_a^2}$ ;  $x_b = x_a + h_{s1}$ ;  $x_d = \sqrt{r_{sn}^2 - y_c^2}$ ;  $x_c = x_b + h_{s2}$ ; центральні  
 кутові розміри:  $u_1 = \arctg(y_a/x_a)$ ;  $u_5 = t_{sa}/2 - u_1$ , і додатково – кут наконечника зубця  
 $u_{59} = t_{sa} - 2 \cdot u_1$ .

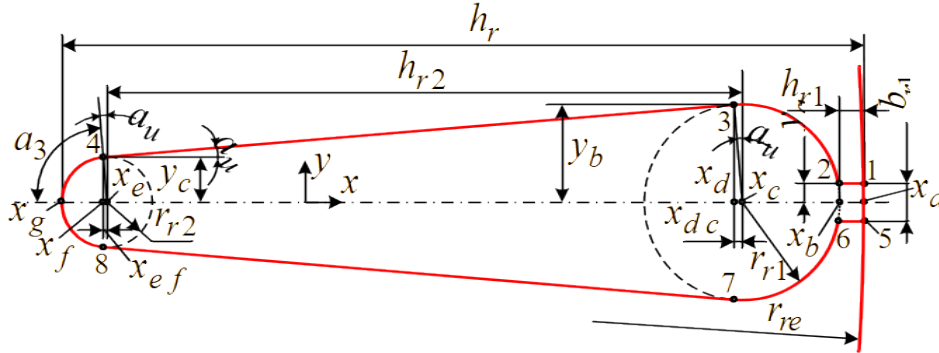


Рисунок 5 – Паз ротора з позначенням розмірів, реперних точок і їх координат

Для обчислення координатних розмірів паза ротора (рис. 5) важливу роль відіграє кут  $\alpha_u$ . Його визначення пояснімо за допомогою рис. 6, який є спрощеним варіантом рис.5.

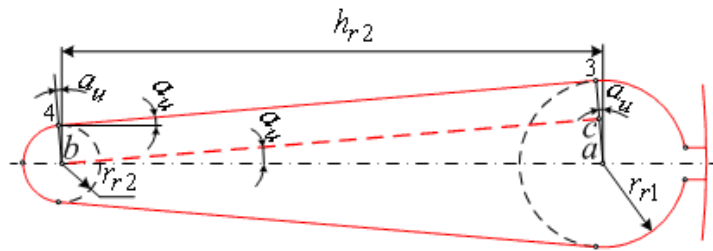


Рисунок 6 – Побудова паза ротора для визначення кута  $\alpha_u$

Відрізок 3-4 є дотичним до кіл з радіусами  $r_{r1}$  та  $r_{r2}$ , тому радіальні відрізки 3-а та 4-б перпендикулярні до нього. Відрізок  $bc$  проведено паралельно відрітку 3-4, тому зберігається кут  $\alpha_u$ , і ще трикутник  $abc$  є прямокутним. В ньому катет  $ac = r_{r1} - r_{r2}$ , гіпотенуза  $ab = h_{r2}$  і тоді ще катет  $bc = \sqrt{h_{r2}^2 - (r_{r1} - r_{r2})^2}$ . У підсумку маємо шуканий кут

$$\alpha_u = \arctg \frac{r_{r1} - r_{r2}}{\sqrt{h_{r2}^2 - (r_{r1} - r_{r2})^2}}$$

З урахуванням цього та інших позначень на рис. 5 решта координатних і кутових розмірів елементів паза ротора обчислюються за наступними формулами з урахуванням додаткових позначень на рис. 7:

$$y_a = b_{r1}/2; \quad \alpha_1 = \arctg \frac{y_a}{\sqrt{r_{r1}^2 - y_a^2}}; \quad x_a = \sqrt{r_{re}^2 - y_a^2}; \quad \alpha_2 = 90 - \alpha_1 + \alpha_u; \quad \alpha_3 = 90 - \alpha_u;$$

$$y_b = r_{r1} \cos \alpha_u; \quad x_{ed} = r_{r1} \sin \alpha_u; \quad y_c = r_{r2} \cos \alpha_u; \quad x_{gf} = r_{r2} \sin \alpha_u; \quad \alpha_0 = \arctg \frac{y_a}{x_a};$$

$$\alpha_{r1} = \frac{t_{ra}}{2} - \alpha_0; \quad \text{координати точки 6} \quad x_6 = r_{re} \sin \alpha_{r1}; \quad y_6 = r_{re} \cos \alpha_{r1}.$$

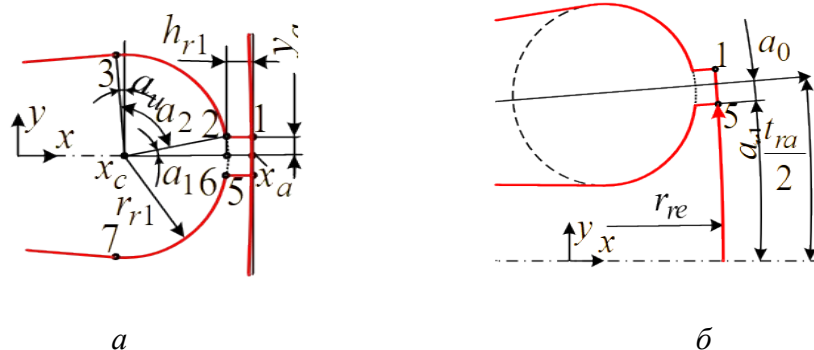


Рисунок 7 – Верхня частина паза ротора

Кут повороту із позиції, що зображена на рис. 7, а, в позицію на рис. 7, б складає півзубцевого кроку пазів ротора, тобто  $0,5t_{ra}$ .

Далі в тексті використовуювані величини позначені таким чином, як це вимагають правила ідентифікації в скрипті Lua. При цьому шрифт стає прямим і індекси піднімаються до рівня основного символу.

## 2 Структура програми побудови геометричної моделі ТАД

Представлений нижче алгоритм побудови моделей ТАД по суті є послідовним. У ньому виділені основні логічні частини програми, які виконуються одна за одною. Аналогічні назви дій можна знайти потім і в програмі у вигляді коментарів. Але в програмі є ще багато проміжних коментарів, які пояснюють локальні дії всередині умовно виділених логічних частин в представленому переліку:

1. Завдання імені файлу вихідних даних.
2. Відкриття зовнішнього файлу і читання з нього вихідних даних.
3. Організація файлу результатів розрахунку.
4. Призначення імені геометричній моделі.
5. Розрахунок додаткових параметрів на основі вихідних даних.
6. Видача вихідних і додаткових даних в файл результатів.
7. Створення файлу для магнітної задачі і завдання її параметрів.
8. Створення центральної точки і опорних точок для поверхні статора, створення цієї поверхні.
9. Створення зубцево-пазової структури статора.
10. Створення зубцево-пазової структури ротора.
11. Створення окружності вала ротора.
12. Запам'ятовування створеної моделі ТАД.

## 3 Файл вихідних даних для програми на скрипті Lua

Файл вихідних даних пишеться, як і програма, в текстовому редакторі «Блокнот». Цей файл починається з двох рядків коментарів, які не беруть участі в роботі програми. Але ці рядки при введенні інформації головною програмою повинні бути «зняті» як текстові рядки.

У рядках вихідних даних для прикладу взято числові дані для конкретного ТАД. І для головної програми вводяться і становлять інтерес саме числа, або текстові позначення в подвійних лапках (" ") відповідних строкових даних. Все інше, як зазначалося, програма сприймає як коментарі і для роботи не використовує.

Одиниця виміру геометричних розмірів повинна бути такою, яка вказана в заданій інструкції для головного процесора програми FEMM – зазвичай приймаються міліметри.

У наступному тексті файлу даних містяться всі задані вихідні параметри, які вже представлені вище.

Файл даних для побудови геометричної моделі ТАД має такий вигляд:

Файл даних для побудови графічної моделі ТАД програмою LuaTAD\_M

```
-----  
"TAD_M" : name_TAD - ім'я моделі ТАД  
"11.09.2019" : data_dan - дата даних  
"RezTAD_M" : name_rez - файл для результатів  
130 : la -активна довжина статора  
48 : Qs -кількість пазів статора  
92.5 : rsi -радіус розточення статора  
21.7 : hys -висота спинки статора  
21.8 : hs -висота паза статора  
1 : hs1 -висота шлиця паза статора  
2 : hs2 -висота скошеної частки паза  
3.7 : bs1 -ширина шлиця паза статора  
7.7 : bs2 -ширина узької частки паза  
10.2 : bs3 -ширина широкої частки паза  
38 : Qr -кількість пазів ротора  
92 : rre -радіус ротора зовнішній  
22.5 : rrv -радіус вала  
32 : hr -висота паза ротора  
0.7 : hr1 -висота шлиця паза ротора  
25.3 : hr2 -висота між центрами паза  
1.5 : br1 -ширина шлиця паза ротора  
3.9 : rr1 -1-ий радіус паза ротора  
1.9 : rr2 -2-ий радіус паза ротора
```

#### 4 Програмна реалізація розрахункової моделі ТАД

Далі наводиться повний текст програми на скрипті Lua, яка після її виклику в середовищі FEMM формує графічну модель ТАД.

Рядки програми, що починаються з подвійного дефіса --, як вже зазначалося, є коментарями, і вони ніяк не впливають на роботу програми. Ці коментарі пояснюють суть виконуваних дій в інших – командних і обчислювальних рядках.

Тут представлено лістинг програми. По ходу програми вставлені рисунки, які показують результат виконання тих чи інших команд і процедур на даний момент її роботи. У програмі використовується нумерація точок пазів статора і ротора, яка представлена на рис. 2 – рис. 7.

```
--ПРОГРАМА для побудови геометричної моделі ТАД  
--Приклад для виконання завдання студентами з курсу ОНД  
name_prog="LuaTAD_M" --ім'я програми  
data_prog=" 09.09.2019" --дата версії  
--Завдання файлу вихідних даних  
f_d=prompt("Введіть ім'я файлу з даними => DanTAD_M")
```

```

--Відкриття файлу даних
f_d = openfile(f_d .. ".txt","r")
--Зчитування трьох рядків заголовка в ньому
for i=1,3 do str = read(f_d,"*l") end
gr=Pi/180 --коефіцієнт переводу з градусів в радіани
--Введення даних з файлу f_d
name_TAD=read(f_d,"*n","*l") --ім'я ТАД
data_dan=read(f_d,"*n","*l") --дата
name_rez=read(f_d,"*n","*l") --файл результатів
la=read(f_d,"*n","*l") --активна довжина
--Параметри і розміри осердя статора
Qs=read(f_d,"*n","*l") --кількість пазів статора
rsi= read(f_d,"*n","*l") --радіус розточення статора
hys=read(f_d,"*n","*l") --висота спинки осердя
hs =read(f_d,"*n","*l") --висота паза
hs1=read(f_d,"*n","*l") --висота шлиця
hs2 = read(f_d,"*n","*l") --висота скошеної частини паза
bs1=read(f_d,"*n","*l") --ширина шлиця
bs2=read(f_d,"*n","*l") --ширина узької частини паза
bs3=read(f_d,"*n","*l") --ширина широкої частини паза
--Параметри і розміри осердя ротора
Qr=read(f_d,"*n","*l") -- кількість пазів ротора
rre=read(f_d,"*n","*l") --радіус осердя зовнішній
rrv=read(f_d,"*n","*l") --радіус вала
hr=read(f_d,"*n","*l") --висота паза
hr1=read(f_d,"*n","*l") --висота шлиця
hr2=read(f_d,"*n","*l") --міжцентрова відстань
br1=read(f_d,"*n","*l") --ширина шлиця
rr1= read(f_d,"*n","*l") --1-ий радіус
rr2= read(f_d,"*n","*l") --2-ий радіус
closefile(f_d) --закриття файлу даних
-- Дорахування геометричних параметрів
rse=rsi+hs+hys --радіус статора зовнішній
--Радіус по кутам дна пазів статора
x=rsi+hs y=bs3/2 rsn=sqrt(x*x+y*y)
hуr=rre-hr-rrv --висота спинки осердя ротора
delta=rsi-rre --повітряний проміжок
--Пазові кроки статора і ротора, градус
tsa =360/Qs tra=360/Qr
--Формування файлу результатів
writeto(name_rez) --name_rez – ім'я
--Ім'я геом. моделі ТАД - тип fem
geom_mod="Fe_Md_"..name_TAD..".fem"
--Видання даних в файл name_rez
write(" МОДЕЛЬ ТАД: "..name_TAD.." від "..data_dan,"\r\n")
write(" Програма ",name_prog," от ",data_prog,"\r\n")
Start_date=date() --зчитування поточного часу
write(" Поточний час ",Start_date,"\r\n","\r\n")
write(format(" Qs=%3.0f",Qs),format(" Qr=%3.0f",Qr),
format(" la=%3.0f",la),format(" delta=%4.2f",delta),"\r\n")
write(format(" rrv=%5.1f",rrv), format(" rre=%5.1f",rre),
format(" rsi=%5.1f",rsi), format(" rsn=%5.1f",rsn),

```

```

format(" rse=%5.1f",rse), "\r\n")
write(format(" hys=%5.1f",hys), format(" hs=%5.1f",hs),
format(" hs1=%4.1f",hs1), format(" hs2=%4.1f",hs2),"\r\n",
format(" bs1=%4.1f",bs1), format(" bs2=%4.1f",bs2),
format(" bs3=%4.1f",bs3),"\r\n")
write(format(" hr=%5.1f",hr), format(" hr1=%4.1f",hr1),
format(" hydr=%5.1f",hydr),format(" hr2=%5.1f",hr2),"\r\n",
format(" br1=%4.1f",br1),format(" rr1=%4.1f",rr1),
format(" rr2=%4.1f",rr2),"\r\n"),
format(" tra=%5.2f",tra),format(" tsa=%5.2f",tsa),"\r\n")

```

--ПОЧАТОК РОБОТИ ПРОГРАМИ FEMM

--Побудова документа магнітної задачі

--і задання її параметрів

create(0)

mi\_probdef(0, "millimeters", "planar", 1E-8, la)

--Збереження файлу FEMM з ім'ям geom\_mod

mi\_saveas(geom\_mod)

--ФОРМУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ТАД

--Зовнішня поверхня осердя статора

--Ставляться точки центра, верху і низу окружності

mi\_addnode(0,0) mi\_addnode(0,rse) mi\_addnode(0,-rse)

--Дуги поверхні статора

m\_seg=5 --розмір сегмента дуг, градуси

--Ліва і права півокружності

mi\_addarc(0,rse,0,-rse,180,m\_seg)

mi\_addarc(0,-rse,0,rse,180,m\_seg)

--Робимо розмір екрана за зовнішніми лініями моделі ТАД

mi\_zoomnatural()

--Побудова зубцево-пазового слою

--статора і об'єднання його в групу 1

--Координатні розміри елементів паза статора (рис. 2, 4)

ya=bs1/2 yb=bs2/2 yc=bs3/2 xa=sqrt(rsi^2-ya^2)

xb=xa+hs1 xc=xb+hs2 xd=xa+hs

--Ставляться точки від 1 до 4

mi\_addnode(xa,ya) mi\_addnode(xb,ya)

mi\_addnode(xc,yb) mi\_addnode(xd,yc)

--Проводяться лінії між ціма точками

mi\_addsegment(xa,ya,xb,ya) mi\_addsegment(xb,ya,xc,yb)

mi\_addsegment(xc,yb,xd,yc)

--Розмічаються ці точки і лінії

mi\_selectnode(xa,ya) mi\_selectnode(xb,ya)

mi\_selectnode(xc,yb) mi\_selectnode(xd,yc)

x=(xa+xb)/2 mi\_selectsegment(x,ya)

x=(xb+xc)/2 y=(ya+yb)/2 mi\_selectsegment(x,y)

x=(xc+xd)/2 y=(yb+yc)/2 mi\_selectsegment(x,y) --100

--Призначення точкам і лініям групи 1

mi\_setnodeprop(" ",1) --точки

mi\_setsegmentprop(" "," ",1,0,1) --лінії

mi\_clearselected()

pause() --Результат давись на рис. 8, а

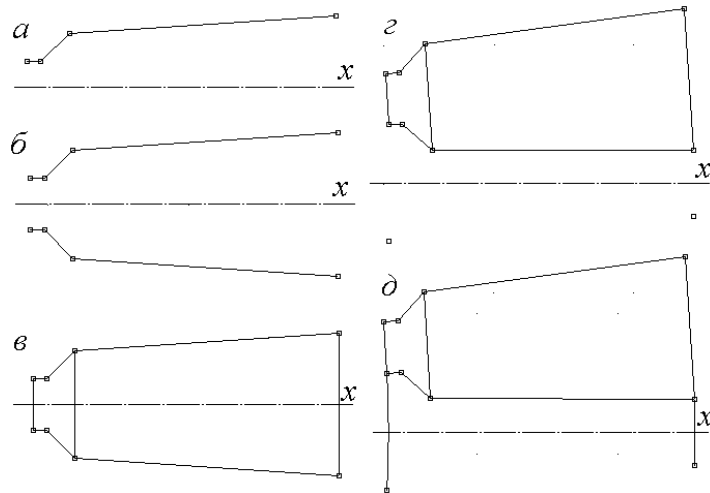


Рисунок 8 – Кроки побудування паза статора

--Виділення стінки паза і її відображення симетрично відносно осі x  
`mi_selectgroup(1) mi_mirror(0,0,rse,0,4) mi_clearselected()`

--Результат дивись на рис. 8, б

--Проведення ліній 1-5, 3-7 та 4-8, їх розмічення

--і призначення їм групи 1

`mi_addsegment(xa,ya,xa,-ya) mi_addsegment(xc,yb,xc,-yb)`

`mi_addsegment(xd,yc,xd,-yc) mi_selectsegment(xa,0)`

`mi_selectsegment(xc,0) mi_selectsegment(xd,0)`

`mi_setsegmentprop(" ", " ", 1, 0, 1) mi_clearselected()`

`pause()` --Результат дивись на рис. 8, в

--Виділен. і поворот паза на півзубц. крок уверх над віссю x

`mi_selectgroup(1) mi_moverotate(0,0,tsa/2,4)`

--Коорд. тчк 5, 8 і копіювання їх під вісь x - тчк. 9, 10

`u5=0.5*tsa*gr-atan(ya/xa) x5=rsi*cos(u5) y5=rsi*sin(u5)`

`u8=0.5*tsa*gr-atan(yc/xd) x8=rsn*cos(u8) y8=rsn*sin(u8)`

`mi_selectnode(x5,y5) mi_selectnode(x8,y8)`

`mi_mirror(0,0,rse,0,0)`

`pause()` --Результат дивись на рис. 8, г

--Проводимо дуги між точками 5-9 і 8-10

`m_seg=1 ua=2*u5/gr ub=2*u8/gr`

`mi_addarc(x5,-y5,x5,y5,ua,m_seg)`

`mi_addarc(x8,-y8,x8,y8,ub,m_seg)`

--Виділення дуг і призначення групи 1

`mi_selectarcsegment(rsi,0) mi_selectarcsegment(rsn,0)`

`mi_setarcsegmentprop(1, " ", 0, 1) mi_clearselected()`

`pause()` --Результат дивись на рис. 8, д

--Поворот зубцевого кроку за віссю y

`mi_selectgroup(1) mi_moverotate(0,0,90,4)`

--Копіювання зубців і отримання повної

--зубцево-пазової структури статора

`mi_selectgroup(1) mi_copyrotate(0,0,tsa,(Qs-1),4)`

`pause()` --модель статора готова

--Побудова зубцево-пазового слою ротора і

--призначення його елементам групи 9

--Координатні розміри паза ротора (рис. 3, 5- 7)

`y=rr1-rr2 x=sqrt(hr2^2-y^2) au=atan(y/x) ya=br1/2`

```

x=sqrt(rr1^2-ya^2) a1=atan(ya/x) a2=90+(au-a1)/gr --град.
a3=90-au/gr yb=rr1*cos(au) yc=rr2*cos(au)
xa=sqrt(rre^2-ya^2) xb=xa-hr1 xc=xb-rr1 xdc=rr1*sin(au)
xd=xc-xdc hef=rr2*sin(au) xe=xc-hr2 xf=xe-xef xg=xe-rr2
--Ставляться точки від 1 до 4-ой і 8
mi_addnode(xa,ya) mi_addnode(xb,ya)
mi_addnode(xd,yb) mi_addnode(xf,yc)
--Проводяться лінії між точками 1-2, 3-4
mi_addsegment(xa,ya,xb,ya) mi_addsegment(xd,yb,xf,yc)
--Проводяться дуги між точками 2-3 і 4-8
m_seg=10 --розмір сегмента дуг, в градусах
mi_addarc(xb,ya,xd,yb,a2,m_seg)
pause() --Результат дивись на рис. 9, а

```

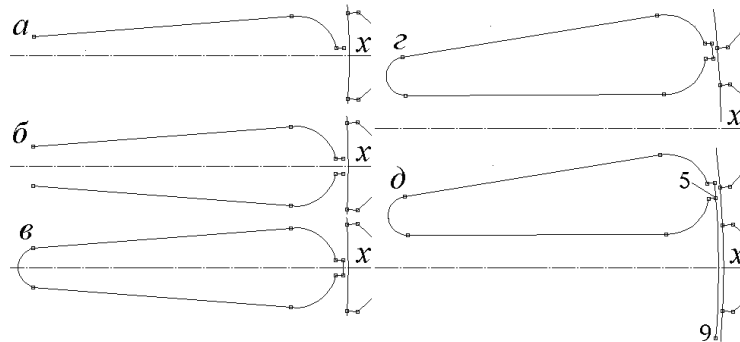


Рисунок 9 – Кроки побудування паза ротора

```

--Розмічаються точки від 1 до 4-ой
mi_selectnode(xa,ya) mi_selectnode(xb,ya)
mi_selectnode(xd,yb) mi_selectnode(xf,yc)
--Розмічення ліній між точками 1-2, 3-4
x=(xa+xb)/2 mi_selectsegment(x,ya)
x=(xd+xf)/2 y=(yb+yc)/2 mi_selectsegment(x,y)
--Розмічення дуги між точками 2-3
y=rr1*sin(Pi/4) x=xc+y mi_selectarcsegment(x,y)
--Призначення точкам, лініям і дузі групи 9
mi_setnodeprop(" ",9) mi_setsegmentprop(" "," ", 1,0,9)
mi_setarcsegmentprop(m_seg, " ", 0, 9) mi_clearselected()
--Виділення отриманої стінки паза і відображення відносно осі x
mi_selectgroup(9) mi_mirror(0,0,rre,0,4)
mi_clearselected()
pause() --Результат дивись на рис. 9, б
--Рисуються і розмічаються дуги 1-5 і 4-8 в групу 9
a0=2*atan(ya/xa) m_seg=0.5
mi_addarc(xa,-ya,xa,ya,a0,m_seg)
mi_addarc(xf,yc,xf,-yc,2*a3,m_seg)
mi_selectarcsegment(rre,0)
mi_setarcsegmentprop(m_seg, " ",0,9) mi_clearselected()
mi_selectarcsegment(xg,0) m_seg=20
mi_setarcsegmentprop(m_seg, " ",0,9) mi_clearselected()
pause()--Результат дивись на рис. 9, в
--Виділення і поворот паза на півзубц. крок уверх над x
mi_selectgroup(9) mi_moverotate(0,0,tra/2,4)
pause() --Результат дивись на рис. 9, г

```

```

--Координати тчк 5 і копіювання її під вісь x - тчк.9
u6=tra*gr/2-atan(ya/xa) x6=rre*cos(u6)
y6=rre*sin(u6) mi_addnode(x6,-y6)
--Проводимо дугу між точками 5-9
m_seg=1 u=2*u6/gr mi_addarc(x6,-y6,x6,y6,u,m_seg)
--Виділяємо тчк. 9 і дугу та відносимо їх в групу 9
pause() --Результат дивись на рис. 9, д
mi_selectnode(x6,-y6) mi_selectarcsegment(rre,0)
mi_setnodeprop(" ",9) mi_setarcsegmentprop(m_seg,"",0,9) mi_clearselected()
--Зубцевий поділ ротора копіюється Qr-1 разів з кутовим
--шагом tra, і отримується структура пазів ротора
mi_selectgroup(9) mi_copyrotate(0,0,tra,(Qr-1),4)
--Рисуємо окружність вала ротора
--Точки верху і низу окружності
mi_addnode(0,rrv) mi_addnode(0,-rrv) m_seg=10
--Ліва і права півокружності
mi_addarc(0,rrv,0,-rrv,180,m_seg)
mi_addarc(0,-rrv,0,rrv,180,m_seg)
pause() --геометрична модель готова
--Результат дивись на рис. 10 ф рис. 11
mi_saveas(geom_mod) --запом'ятовується модель ТАД

```

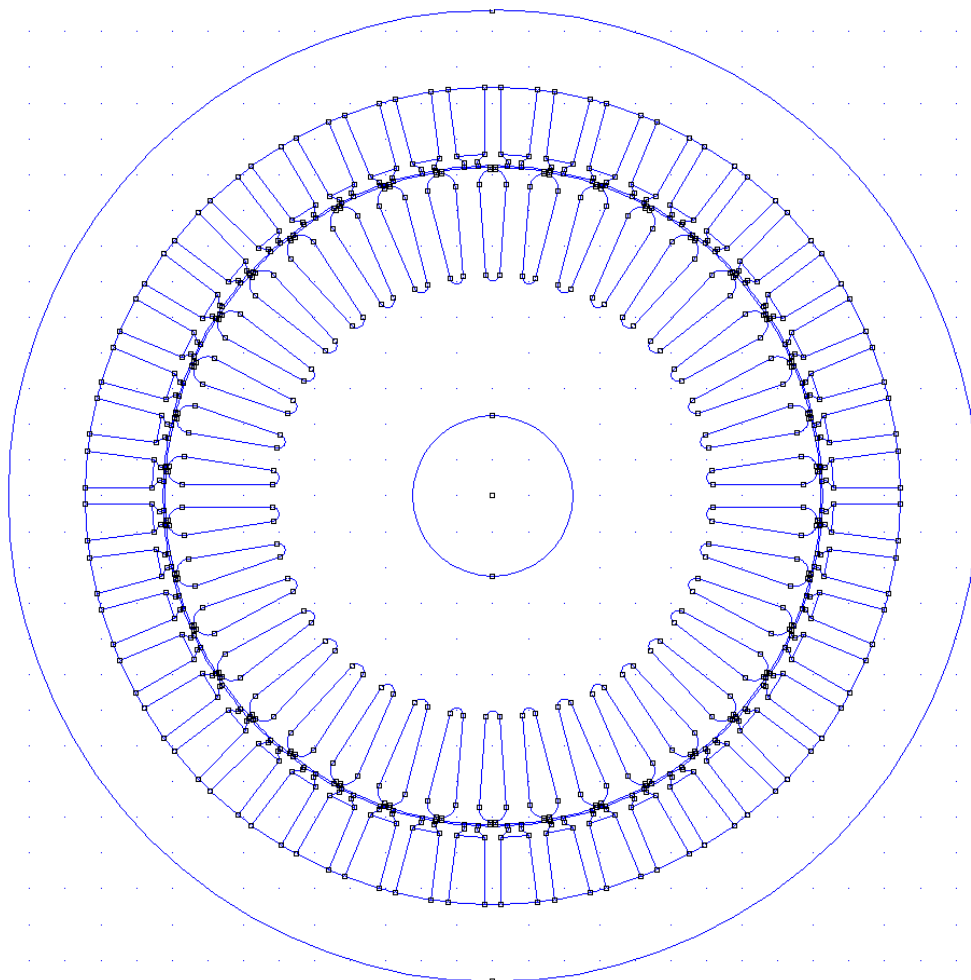


Рисунок 10 – Геометрична модель ТАД



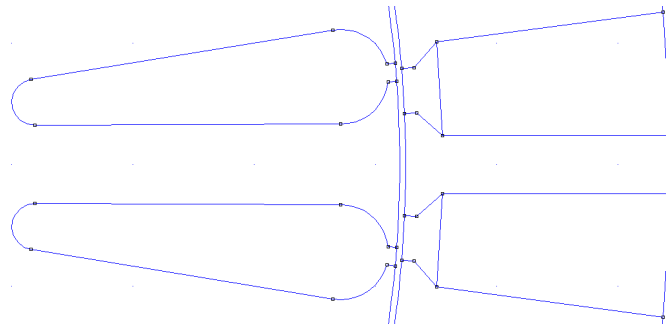


Рисунок 11 – Фрагмент геометричної моделі ТАД

--Резерв для розширення знань:

--mi\_analyze(1) --Почати і виконати розрахунок магнітного поля

--mi\_loadsolution() --Перейти до показу результатів розр.

Write("Успішне завершення всієї програми розрахунків")

writeto() --закриття файлу результатів

### 5. Інструкція з використання скрипта

Для використання скрипта побудови геометричної моделі ТАД, необхідно наступне:

1) файл скрипта з розширенням \* .lua, а також файли з вихідними даними для побудови геометрії повинні знаходитися в одній папці;

2) запускаємо програму FEMM і в меню File вибираємо Open Lua script;

3) далі у вікні, яке з'являється, треба вибрати наявну папку зі скриптом Lua, вибрати або ввести необхідне ім'я файлу з програмою побудови геометричної моделі ТГ і клавішею Enter або подвійним кліком клавіші «миші» запустити програму, яка активізує цей файл;

4) подальші побудови моделі ТАД програма Lua виконує автоматично. При бажанні в програму можуть бути вставлені команди Pause(), які забезпечать зупинку програми в кожному конкретному місці. Після перегляду поточного зображення на екрані комп'ютера клавішею Enter можна продовжити виконання програми;

5) вставлені в бажаних місцях програми команди mi\_saveas(name) дозволяють зберегти черговий файл з поточним – проміжним результатом побудови моделі ТАД під довільним ім'ям name, наприклад, name="geom\_mod\_01.fem".

Саме таким способом збережені ілюстрації – рис. 8 – 11, що супроводжують наведений текст – скрипта Lua.

### 6 Результати роботи програми FEMM зі скриптом Lua

Файл результатів, отриманий у підсумку роботи наданого скрипту Lua, має такий вигляд:

МОДЕЛЬ ТАД: TAD\_M від 11.09.2019

Програма LuaTAD\_M від 09.09.2019

Поточний час 09/11/19 09:43:36

Qs= 48 Qr= 38 Ia=130 delta=0.50

rrv= 22.5 rre= 92.0 rsi= 92.5 rsn=114.4 rse=136.0

hys= 21.7 hs= 21.8 hs1= 1.0 hs2= 2.0

bs1= 3.7 bs2= 7.7 bs3=10.2

hr= 32.0 hr1= 0.7 hr2= 37.5 hr2= 25.3

br1= 1.5 rr1= 3.9 rr2= 1.9

tra= 9.47 tsa= 7.50

Успішне завершення всієї програми розрахунків