

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

**РОЗВИТОК МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ  
З ТЕОРЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

*Розглянуто новий підхід до вдосконалення лабораторних робіт шляхом застосування системного підходу для оптимального планування та статистичної обробки результатів на персональній ЕОМ з метою отримання більш точної фізико-математичної моделі, яка враховує нелінійність і динамічність процесів.*

*Рассмотрен новый подход к совершенствованию лабораторных работ путем применения системного подхода для оптимального планирования и статистической обработки результатов на персональной ЭВМ с целью получения более точной физико-математической модели, которая учитывает нелинейность и динамику процессов.*

*The new going is considered near perfection of laboratory works by application of approach of the systems for the optimal planning and statistical treatment of results on PECM with the aim of receipt of more exact physical mathematical model that takes into account non-linearity and dynamic of processes.*

**Вступ.** Впровадження персональних обчислювальних машин (ПЕОМ) в навчальний процес відкрило нові можливості для подальшого вдосконалення лабораторних робіт шляхом застосування системного (модельного) підходу до планування, проведення на реальних стендах та статистичної обробки результатів на ПЕОМ. Якщо за ручних методів обробки результатів експерименту була можливість лише наближено за допомогою спрощеної математичної моделі об'єкта дослідження (ОД) визначити деякі його характеристики і параметри, то з використанням на ПЕОМ сучасних методів ідентифікації ОД та статистичного аналізу відкрилась можливість для більш глибокого вивчення ОД на рівні наукових досліджень.

З методичної точки зору можна виділити два підходи до ЛР:

- перший (класичний), за якого ігнорується нестационарність, неавтономність, нелінійність реальних ОД, має місце 100%-ва довіра до законів електрики за якими будується спрощена модель ОД;
- другий (сучасний), за якого вказані вище властивості враховуються і вимагають від студента (дослідника) не повної довіри до адекватності процесів в ОД та моделі ОД відповідним законам та бажання отримати більш точний результат.

Перший підхід методично корисний для майбутніх інженерів-проектантів, другий – для інженерів дослідників (по болонській системі перший – для спеціалістів, другий – для магістрів). З метою максимального зацікавлення в навчанні важливо своєчасно виявити у студентів прихильність до I чи II підходів, щоб кожен студент йшов своїм шляхом.

**Порівняння I і II підходів.****Дослідження резистивних елементів.**

I підхід: Закон Ома  $U = R \cdot I$ ,  $R = \text{const}$ ,  $I = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$  – все стає.

II підхід: Закони Ома, Джоуля-Ленца та термодинаміки у взаємозв'язку приводять до уточнення

закону Ома:  $U = R(I^2) \cdot I$ , де в статичі

$$R(I) \cong R(0) \left[ 1 + \alpha \frac{R(0)}{K_{me} \cdot S_{ox}} \cdot I^2 \right].$$

Тут  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору,  $K_{me}$  – коефіцієнт тепловіддачі ОД (резистора),  $S_{ox}$  – площа охолодження ОД; в динаміці

$$R(t) = R(0) \cdot \left[ 1 + \alpha \Delta \theta_{\infty}^0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}} \right) \right],$$

де  $\tau_m = \frac{cm}{K_{me} \cdot S_{ox}}$  – теплова стала часу ОД,  $c$  – коефіцієнт теплоємності,  $m$  – маса ОД.

Для потужних резисторів, реостатів стала часу може бути значною. Їхній нагрів відбувається за експоненціальним законом, відповідно за тією ж експонентою змінюється опір від  $R_0$  до  $R_{\infty}$ .

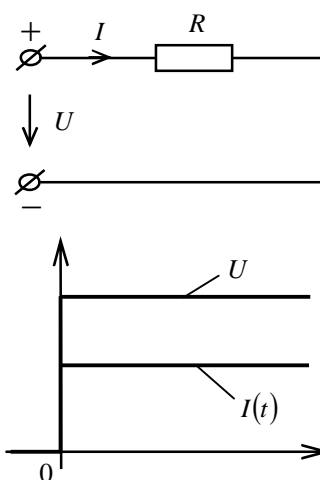


Рис.1. Схема заміщення резистивного елемента за I підходом

Тут модель ОД безінерційна.

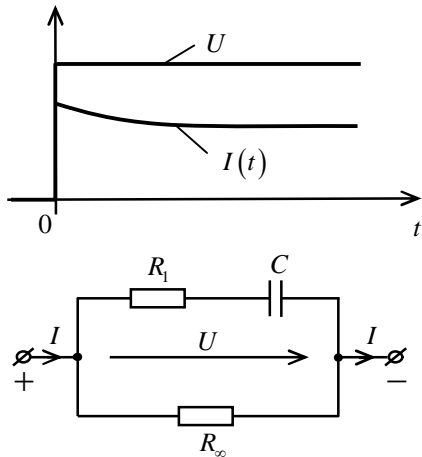


Рис.2. Схема заміщення резистивного елемента за II підходом

$$C = \frac{cm(R_\infty - R_0)}{K_{ms} \cdot S_{ox} \cdot R_\infty \cdot R_0},$$

$R_0, R_\infty$  – початкове і усталене значення опору.

Тут модель ОД інерційна:

$$I(t) = I(0) \cdot \left[ 1 - \alpha \Delta \theta_\infty^0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}} \right) \right].$$

В першому підході, як правило, мова йде про лінійні і нелінійні ОД, в другому – додається модель ОД зі слабкою нелінійністю, яку виявляють шляхом спеціальних (оптимальних за точністю виявлення слабкої нелінійності) експериментів і статистичної обробки, при цьому оцінюється різниця  $\Delta U(I^*)$  між лінійною і нелінійною моделлю  $U_{НЛ} = (\beta_0 + \beta_1 I^2) \cdot I$  в точці  $I^*$  максимальної різниці  $U_{Л}$  і  $U_{НЛ}$  (рис. 3).

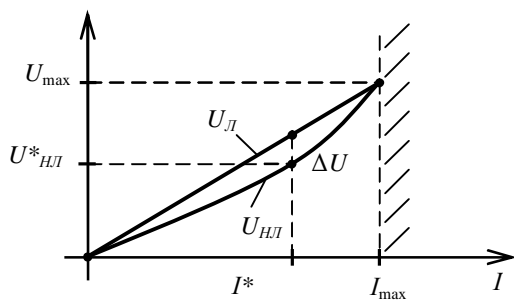


Рис.3. Вольт-амперні характеристики лінійної і нелінійної моделей ОД

$$\text{Тут } I^* = \frac{I_{\max}}{\sqrt{3}}, \hat{\beta}_1 = 3 \left[ U_{\max} - \sqrt{3} U_{НЛ}^* \right] / 2 I_{\max}^3,$$

$$\text{Дисперсія } \sigma_{\hat{\beta}_1}^2 \text{ оцінки } \hat{\beta}_1 : \sigma_{\hat{\beta}_1}^2 = \frac{9}{4} \cdot \frac{\sigma_U^2}{I_{\max}^6} \cdot \frac{1+2k}{k(1-k)n},$$

$$k^* = 0,365, n^* = 16,8 \cdot \frac{\sigma_U^2}{\sigma_{\hat{\beta}_1}^2} \cdot \frac{1}{I_{\max}^6}.$$

Так, для ОД (котушки з мідним проводом) були отримані статистично значущі оцінки  $\hat{\beta}_1 = -2,6$ ;  $\hat{\beta}_0 = 19$ .

Для дослідження нелінійних резистивних елементів (НРЕ) в основу другого підходу покладено справедливу для гладких нелінійностей модель у вигляді степеневого полінома (ряду Тейлора), яка визначається в ПЕОМ методом найменших квадратів з відповідною оцінкою достовірності. Далі вольт-амперні характеристики різних з'єднань НРЕ статичних і диференціальних опорів НРЕ розраховуються на ПЕОМ у відповідних середовищах (MATLAB, MATHCAD та ін.).

### Дослідження R-, L-, C- кіл

В роботах за другим підходом перш за все перевіряються ідеальність конденсатора, котушки індуктивності та резистора і далі будуються адекватні ним уточнені моделі:

- за нуль – гіпотезою перевіряється вплив опору R провідників на ідеальність конденсаторів;
- з експериментально знятої амплітудо-частотної характеристики конденсатора уточнюється його ємність  $\hat{C}_K = \hat{I} / \omega \sqrt{\hat{U}^2 - \hat{I}^2 \cdot \hat{R}^2}$  відносно паспортної  $C_K$ ;
- шляхом оптимально взважених за Баєсом оцінок  $\hat{L}_1$  і  $\hat{L}_2$  уточнюється оцінка  $\hat{L}^*$ :

$$L^* = \frac{\hat{L}_1 \cdot \sigma_{\hat{L}_2}^2 + \hat{L}_2 \cdot \sigma_{\hat{L}_1}^2}{\sigma_{\hat{L}_1}^2 + \sigma_{\hat{L}_2}^2},$$

$$\text{де } \hat{L}_1 = \frac{\hat{U}}{\omega \hat{I}} \cos \varphi_k, \hat{L}_2 = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\hat{U}^2}{\hat{I}^2} - R_\Sigma^2},$$

при цьому завжди  $\sigma_{\hat{L}_i}^2 < \sigma_{\hat{L}_i}^2, i = 1, 2$ .

Далі на ПЕОМ досліджуються всі варіанти R-, L-, C-кіл з уточненими моделями та перевіряється їх адекватність експериментальним даним.

### Дослідження трифазного асинхронного двигуна (ТАД) з короткозамкненим ротором.

За першим підходом знімають залежність обертів  $n_2$  ТАД від моменту  $M$  на валу в зоні стійкої роботи. Далі, користуючись формулою Клоса

$$M \cong 2M_{\max} \left/ \left( \frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}} \right) \right.$$

(де  $s_{кр}, s$  – критичне та поточне ковзання,  $M_{\max}$  – максимальний момент), та за паспортними даними будують залежність  $M(s)$  для  $s \in [0, 1]$ .

За другим підходом визначають всі параметри  $R_2', R_1, X, R_\mu, X_\mu$  схеми заміщення ТАД у вигляді Г-подібного чотириполюсника та будують по ним більш точну модель  $M(s)$

$$M(s) = C_M' \cdot \frac{R_2'}{s} \left/ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right) \right. + X^2$$

в необмеженому діапазоні  $s \in [\pm \infty]$ , де мають місце режими двигуна, генератора та гальма.

### Дослідження генератора постійного струму

Комплексне використання як стенду, так і ПЕОМ дає можливість отримати аналітичну залежність всіх характеристик генератора постійного струму (ГПС) з незалежним і самозбудженням, дослідити стійкість роботи ГПС. Як приклад, наведемо аналітичну у всьому діапазоні зміни  $I_3$  залежність  $c_e \Phi(I_3)$  у вигляді двох залежностей, взважених функціями  $\eta_1$  і  $\eta_2$ :

$$\eta_1(I_3) c_e \Phi(I_3) [c_e \Phi_0 + K_0 I_3] + \eta_2(I_3) \times \\ \times \left[ c_e \Phi_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{3 I_3}{I_{\max}}} \right) - c_e \Phi_0 e^{-\frac{3 I_3}{I_{\max}}} \right],$$

$$\text{де } \eta_1(I_3) = \left( 1 - \frac{I_3}{I_{3 \max}} \right)^{K^*}, \quad \eta_2(I_3) = \left( \frac{I_3}{I_{3 \max}} \right)^{K^*},$$

$$K^* = \arg \min_K \sum_{j=1}^n \left( c_e \Phi(I_{3j}) - c_e \Phi(I_{3j}) \right)^2.$$

**Висновки.** Даний підхід не вимагає нової лабораторної бази, а лише використовує ПЕОМ для оптимальної обробки даних експерименту з використанням системного підходу, в основі якого лежить поняття математичної моделі ОД, методів ідентифікації об'єкту та статистичних критеріїв оцінки якості апостеріорної моделі з подальшим використанням її в аналітичних задачах аналізу ОД і синтезу оптимальних режимів.

Отримано 12.07.2011



Сільвестров  
Антон Миколайович,  
д.т.н, проф. каф. теоретич.  
електротехніки Нац. техн.  
ун-ту України «КПІ»,  
м.Київ,

095-554-7571



Поворознюк  
Назар Іванович  
к.т.н., доц. каф. теоретич.  
електротехніки Нац. техн.  
ун-ту України «КПІ»,  
м.Київ,

066-661-3038



Спінул  
Людмила Юріївна,  
к.т.н., доц. каф. теоретич.  
електротехніки Нац. техн.  
ун-ту України «КПІ»,  
м.Київ,

050-383-8643



Скринник  
Олексій Миколайович,  
асистент каф. теоретич.  
електротехніки Нац. техн.  
ун-ту України «КПІ»,  
м.Київ,

050-356-0110