

Г. М. Варський, канд. техн. наук

СТРУКТУРНІ СХЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ І НАПРУГИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Запропоновано математичні моделі електромагнітних трансформаторів струму і напруги у вигляді структурних схем слідкувальних систем, які можуть бути використані для моделювання систем керування електроенергетичними об'єктами.

Вступ

Керування електроенергетичним об'єктом (ЕЕО), робота захисту і автоматики, діагностика, моніторинг, вимірювання параметрів режиму, облік електроенергії у високовольтних електричних мережах здійснюється на основі вимірювальної інформації, наданої вимірювальними каналами, які складаються з груп вимірювальних трансформаторів струму (ТС) і напруги (ТН), ліній зв'язку і вимірювальних приладів. І до теперішнього часу основними первинними давачами інформації про струми і напруги ЕЕО є електромагнітні вимірювальні трансформатори струму і напруги. Надійність, точність, стабільність метрологічних характеристик первинних давачів інформації є запорукою надійної і ефективної роботи електроенергосистеми в цілому. Тому дослідження роботи ТС і ТН, побудова їх точніших математичних моделей з метою визначення можливостей підвищення точності є важливою задачею [1].

Метою роботи є створення у вигляді структурних схем слідкувальних систем, математичних моделей каскадних трансформаторів струму і каскадних трансформаторів напруги, які дозволяють точніше визначити похибки вимірювання і можуть бути використані у моделюванні систем керування ЕЕО.

Математична модель каскадного ТС

Структурна схема електромагнітного одноступеневого ТС як слідкувальної системи (системи автоматичного регулювання) показана на рис. 1а [2, 3]. Вхідною величиною такої слідкувальної системи є первинний струм I_1 , а вихідною вторинний струм I_2 , який у масштабі w_1/w_2 , де w_1 і w_2 число витків первинної і вторинної обмоток, повторює вхідну величину. Первинний струм I_1 ТС, протікаючи по первинній обмотці w_1 , створює первинну магніторушійну силу (м. р. с.) $F_1 = I_1 w_1$. На структурній схемі це відображується ланкою W1 з коефіцієнтом передачі w_1 , вхідною величиною якої є первинний струм I_1 , а вихідною м. р. с. F_1 . Вторинний струм I_2 ТС, який проходить по вторинній обмотці w_2 , створює вторинну м. р. с. $F_2 = I_2 w_2$, що відображається на схемі ланкою W8 з коефіцієнтом передачі w_2 . Первинна F_1 і вторинна F_2 м. р. с. в осерді трансформатора направлені назустріч одна одній. Результуюча м. р. с., що дорівнює різниці між F_1 і F_2 , називається повною м. р. с. намагнічування $F_0 = I_0 w_1$ [4], де I_0 – струм намагнічування. Це відображується на схемі першим суматором. Під дією намагнічуючої сили F_0 у осерді ТС створюється напруженість магнітного поля $H_0 = F_0/l = I_0 w_1/l$ (ланка W2 з коефіцієнтом передачі $1/l$), де l – довжина середньої магнітної лінії осердя ТС. Напруженість магнітного поля H_0 створює у осерді ТС індукцію $B = H_0 \mu = w_1 I_0 \mu / l$ (ланка W3 з коефіцієнтом передачі μ) і потік намагнічування $\Phi_0 = B S = (S/l) w_1 I_0$ (ланка W4 з коефіцієнтом передачі S), де μ і S – абсолютна магнітна проникність та площа поперечного перерізу осердя ТС. Потік намагнічування Φ_0 , який пронизує витки вторинної обмотки, створює потокозчеплення $\psi = \Phi_0 w_2$ (ланка W5 з коефіцієнтом передачі w_2). У вторинній обмотці w_2 виникає електрорушійна сила $E_2 = -d\psi/dt = -p w_2 \Phi_0$ (диференціальна ланка W6), де p – оператор Лапласа. Напряга E_2 викликає у вторинній обмотці w_2 ТС вторинний струм I_2 , який

складається з суми струмів: струму $I_H = E_2/Z_H$ у навантаженні Z_H і струму $I_{C_2} = E_2 p C_2$ у власній ємності вторинної обмотки w_2 . На структурній схемі це показано відповідно ланкою W7 з коефіцієнтом передачі $1/Z_H$, ланкою W10 з коефіцієнтом передачі pC_2 і відповідним суматором. Струм I_2 створює на повному опорі вторинної обмотки $Z_{w_2} = r_2 + pL_{S2}$, де r_2 – внутрішній опір вторинної обмотки, а L_{S2} – її індуктивність розсіювання, падіння напруги, яке зменшує напругу, що прикладається до Z_H і C_2 . На структурній схемі це зображено ланкою W9 і відповідним суматором, які створюють місцевий від’ємний зворотний зв’язок, зменшуючи напругу E_2 . Під дією напруги E_2 через опір втрат R_B , величина якого зведена до вторинної обмотки w_2 , протікає додатковий струм I_B , який збільшує струм намагнічування і похибку ТС. На структурній схемі цьому відповідають ланки W11, W12 і відповідний суматор. Таким чином, виходячи із загальних міркувань, побудовано структурну схему електромагнітного ТС як слідувальної системи (системи автоматичного регулювання) з урахуванням паразитних параметрів вторинної обмотки і опоры втрат.

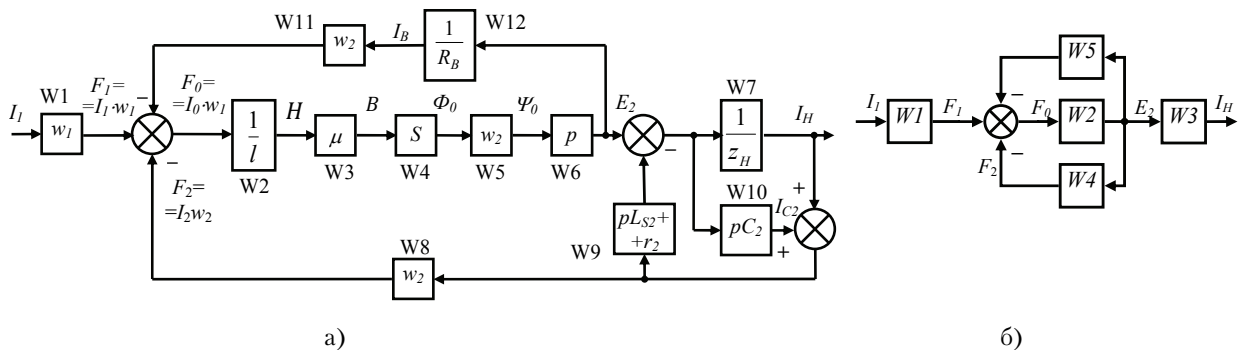


Рис. 1. Структурна схема електромагнітного одноступеневого ТС

Провівши перетворення, отримаємо структурну схему ТС (рис. 1б), передавальна функція якої визначається таким виразом:

$$W_{TC} = \frac{W_1 W_2 W_3}{1 + W_2 (W_4 + W_5)},$$

де $W_1 = w_1$; $W_2 = p(\mu S/l)w_2$; $W_3 = 1/\left(a_{30}p^3 + a_{31}p^2 + a_{32}p + a_{33}\right)$; $a_{30} = C_2 L_{S2} L_H$;

$a_{31} = (C_2 L_{S2} R_H + C_2 L_H r_2)$; $a_{32} = (L_H + L_{S2} + C_2 R_H r_2)$; $a_{33} = (R_H + r_2)$; $b_{30} = C_2 L_H$; $b_{31} = C_2 R_H$; $b_{32} = 1$; $W_4 = w_2 (b_{30} p^2 + b_{31} p + b_{32}) / (a_{30} p^3 + a_{31} p^2 + a_{32} p + a_{33})$; $W_5 = w_2 / R_B$.

На схемі (рис. 1б) виділені лінійні W1, W3, W4 і нелінійні W2, W5 ланки. Передавальна функція ланки W2 може бути обчислена, якщо відомі геометричні розміри та характеристика намагнічування (нелінійна залежність $B_m = f(H_m)$) осердя ТС, число витків його вторинної обмотки, або визначена експериментально на реальному ТС як залежність напруги E_2 на розімкненій вторинній обмотці ТС від намагнічувальної сили F_0 , створюваної струмом I_0 у первинній обмотці трансформатора. У останньому випадку точність визначення залежності $E_2 = f(F_0)$ більш висока, бо враховує відхилення величин μ , S , l і w_2 від номінальних (довідникових) значень. Передавальна функція ланки W5 визначається опором втрат R_B у осерді і є нелінійною функцією від середнього за період значення індукції у осерді, або, що теж саме, від середнього (діючого) значення напруги E_2 . Тому величина R_B визначається один раз за період робочої частоти і вважається постійною на цьому періоді. Передавальні функції лінійних ланок W1, W3, W4 визначаються кількістю витків первинної w_1 і вторинної w_2 обмоток, паразитними параметрами C_2 і L_{S2} вторинної обмотки, її внутрішнім опором r_2 , а також індуктивністю L_H і активним опором R_H навантаження ТС ($Z_H = pL_H + R_H$).

На основі структурної схеми одноступеневого ТС (рис. 1б) можна побудувати аналогічні математичні моделі для дво- і триступневих каскадних ТС. Так, наприклад, структурна схе-

ма триступеневого каскадного ТС (рис. 2) складається з послідовного з'єднання трьох одноступеневих структур та додаткових зв'язків $W_6 = \omega_{12}/\omega_{22}$ і $W_7 = \omega_{13}/\omega_{23}$, які враховують вплив навантаження нижнього каскаду на величину навантаження верхнього каскаду ТС. Тут ω_{12} і ω_{13} — кількість витків первинних, а ω_{22} і ω_{23} — вторинних обмоток трансформаторів другого і третього ступенів каскадного ТС.

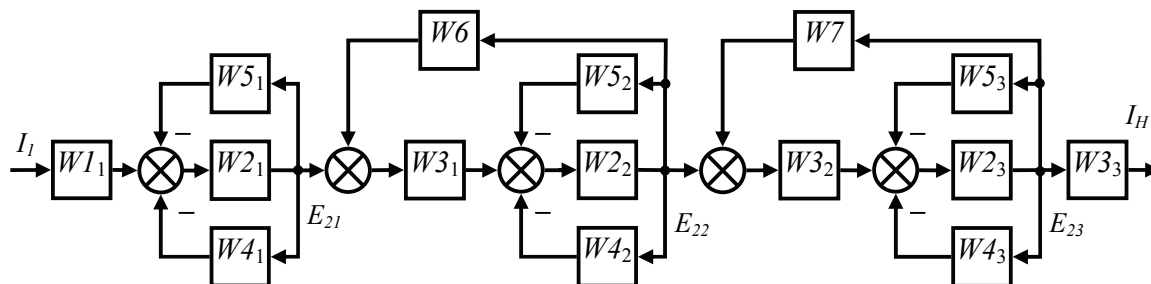


Рис. 2. Структурна схема триступеневого каскадного ТС

На рис. 2: $W_{11} = \omega_{11}$; $W_{2K} = p(\mu_K S_K / l_K) \omega_{2K}$;

$W_{3K} = \omega_{1(K+1)} / (a_{30K} p^3 + a_{31K} p^2 + a_{32K} p + a_{33K})$, де $a_{30K} = C_{2K} L_{S2K} L_{HK}$;

$a_{31K} = (C_{2K} L_{S2K} R_{HK} + C_{2K} L_{HK} r_{2K})$, $a_{32K} = (L_{HK} + L_{S2K} + C_{2K} R_{HK} r_{2K})$; $a_{33K} = (R_{HK} + r_{2K})$;

$\omega_{14} = 1$; $W_{4K} = \omega_{2K} (b_{30K} p^2 + b_{31K} p + b_{32K}) / (a_{30K} p^3 + a_{31K} p^2 + a_{32K} p + a_{33K})$,

де $b_{30K} = C_{2K} L_{HK}$, $b_{31K} = C_{2K} R_{HK}$, $b_{32K} = 1$; $W_{5K} = \omega_{2K} / R_{BK}$, $K = 1, 2, 3$ — номер ступеня каскадного ТС. Навантаженням кожного верхнього ступеня є індуктивність розсіювання і внутрішній опір первинної обмотки відповідної нижньої ступені каскадного ТС. Навантаженням останнього нижнього ступеня є навантаження каскадного ТС.

Передавальна функція такого ТС матиме вигляд

$$W_{3TC} = \frac{W_1 W_{21} W_{22} W_{23} W_{31} W_{32} W_{33}}{(1 + W_{21} W_{451}) [1 + W_{22} (W_{452} + W_{31} W_6)] [1 + W_{23} (W_{453} + W_{32} W_7)]}$$

Математична модель каскадного ТН

Індуктивні ТН типу НКФ для забезпечення необхідного рівня ізоляції виконуються каскадними і складаються, в залежності від напруги, з декількох блоків: НКФ напругою до 132 кВ — з одного блоку, НКФ 220 і 330 кВ — відповідно з двох і трьох блоків, НКФ 400 і 500 кВ — із чотирьох блоків. Магнітопровід блоку замкнутий, двострижневий, стрижні розташовані горизонтально один над одним. На кожному стрижні Т1 і Т2 блоків Б1, Б2...БJ розміщено три концентричні обмотки (рис. 3а), одна з яких — первинна (П), дві інші — зрівняльні. Внутрішня зрівняльна обмотка — вирівнювальна (В) — з'єднується з такою ж обмоткою на сусідньому стрижні і призначена для створення сильного електромагнітного зв'язку між обмотками обох стрижнів Т1 і Т2 одного блоку. Зовнішня зрівняльна обмотка — сполучна (С) — призначена для створення зв'язку між обмотками сусідніх блоків каскаду. Сполучна обмотка верхнього стрижня Т1 нижнього блоку через прохідні ізолятори з'єднується з такою ж обмоткою нижнього стрижня Т2 верхнього блоку. Первинна обмотка П кожного стрижня розташована посередині, між двома зрівняльними. Первинні обмотки всіх стрижнів сполучені послідовно і утворюють обмотку вищої напруги всього ТН. Конструкція всіх блоків каскаду приблизно однакова. Дещо відрізняються тільки крайні блоки: у верхнього блоку на верхньому стрижні Т1 відсутня сполучна зрівняльна обмотка, у нижнього — нижній стрижень Т2 містить дві зовнішні обмотки, що слугують обмотками НН.

На основі електричної схеми каскадного ТН (рис. 3а) можна побудувати його математичну модель у вигляді структурної схеми слідкувальної системи (рис. 3б).

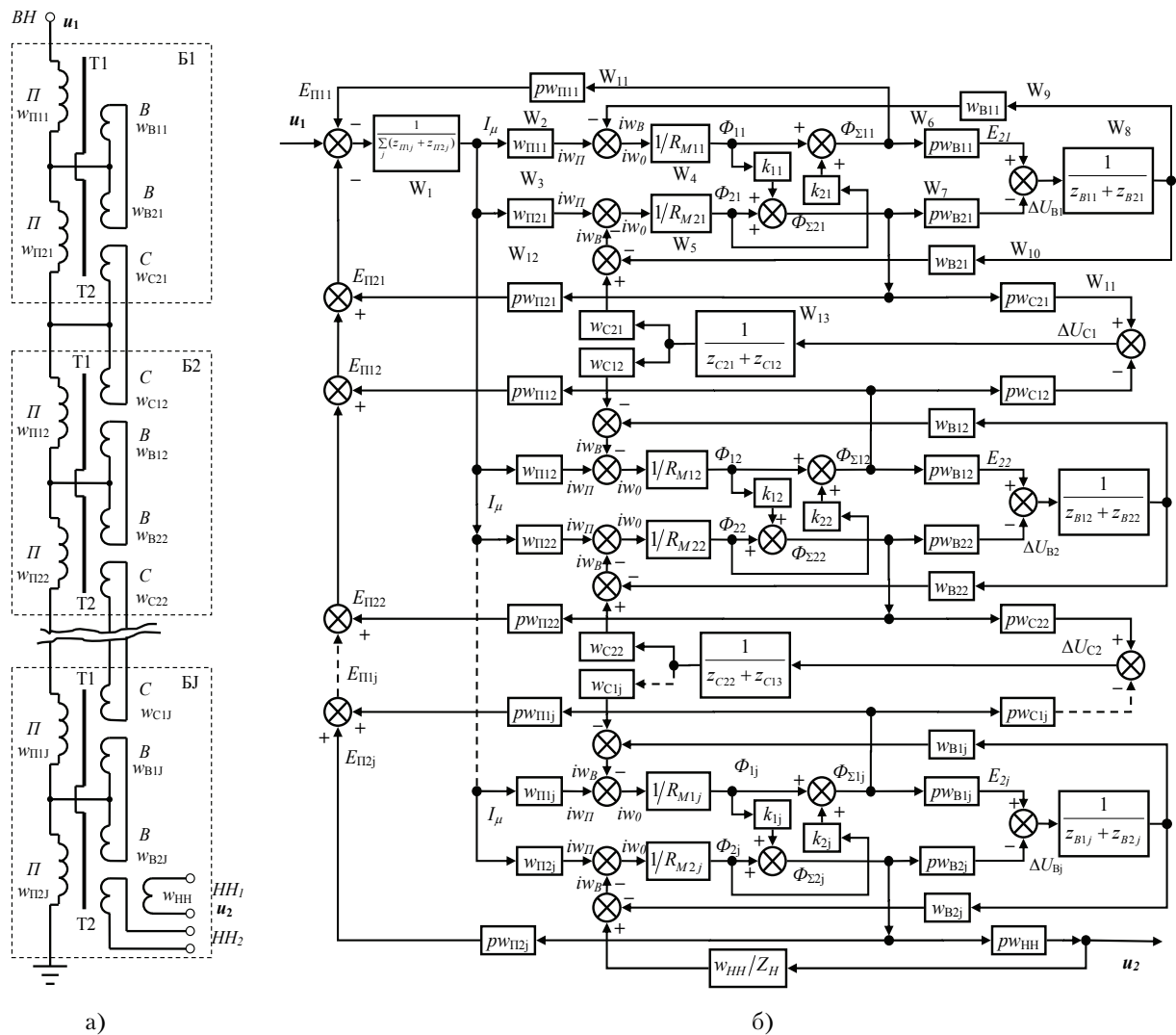


Рис. 3. Структурна схема каскадного ТН

Під дією первинної напруги u_1 в з'єднаних послідовно первинних обмотках П блоків ТН ($w_{\Pi 11} \dots w_{\Pi 1j}$ і $w_{\Pi 21} \dots w_{\Pi 2j}$), протікає однаковий струм намагнічування I_μ , який створює намагнічуючу силу iw_Π (магнітний потенціал) в верхньому і нижньому стрижнях магнітопроводу кожного блоку каскаду. Під дією намагнічуючої сили в стрижнях магнітопроводу відповідно до їх магнітного опору R_{M1j} і R_{M2j} , де $j = 1 \dots j$ (j – номер блоку в каскадному ТН, а перший індекс відповідає номеру стрижня: 1 – верхній, 2 – нижній) виникають магнітні потоки Φ_{1j} і Φ_{2j} , які підсумовуються в магнітопроводі j -го блоку ТН. Під дією магнітного потоку і у відповідності з кількістю витків у вторинних обмотках ТН створюється електрорушійна сила. Вирівнювальні обмотки верхнього w_{B1j} і нижнього w_{B2j} стрижнів мають однакову кількість витків, однакові внутрішні опори Z_{B1j} та Z_{B2j} і з'єднані зустрічно, тому струм в них за однакової напруги на первинних обмотках $w_{\Pi 1j}$ і $w_{\Pi 2j}$, які теж мають однакову кількість витків і однаковий внутрішній опір $Z_{\Pi 1j} = Z_{\Pi 2j}$, відсутній. Зі збільшенням напруги, наприклад, на первинній обмотці $w_{\Pi 1j}$ верхнього стрижня, у вирівнювальних обмотках виникає різниця напруг ΔU_B , під дією якої у цих обмотках протікає струм, направлений так, що намагнічуюча сила у верхньому стрижні зменшується, а у нижньому збільшується, і таким чином напруги на вирівнювальних обмотках, а отже і на первинних, встановлюються рівними. Зі збільшенням напруги на первинній обмотці нижнього стрижня процеси проходять аналогічно, також приводячи до вирівнювання напруги на первинних обмотках.

Вирівнювання напруги між первинними обмотками блоків каскадного ТН відбувається за допомогою сполучних обмоток w_{C1j} і w_{C2j} аналогічно до вирівнювання напруги між обмотками верхнього і нижнього стрижнів одного блоку. Наприклад, зі зниженням напруги на обмо-

тках другого блоку каскадного ТН, до якого відносяться ланки з останнім індексом «2», в сполучних обмотках w_{C21} верхнього блоку і w_{C12} нижнього блоку протікає струм такої величини і напрямку, щоб збільшити магнітний потік в першому стрижні другого блоку, а отже, і напругу на первинних обмотках $w_{П12}$ і $w_{П22}$ другого блоку каскадного ТН. І навпаки, при збільшенні напруги на первинних обмотках другого блоку, струм в сполучних обмотках має такий напрямок, щоб зменшити магнітний потік в магнітопроводі і напругу на обмотках. Таким чином, в процесі роботи каскадного ТН автоматично, з високою точністю, підтримується рівність напруг як між первинними обмотками одного блоку, за допомогою вирівнювальних обмоток, так і рівність напруг між первинними обмотками різних блоків, що забезпечує стабільність заданого коефіцієнта трансформації каскадного ТН.

Математична модель каскадного ТН у вигляді структурної схеми слідкувальної системи (рис. 3б), на відміну від електричної схеми заміщення [5], враховує магнітний зв'язок між обмотками, розташованими на різних стрижнях одного блоку каскаду (коефіцієнти k_{1J} та k_{2J}) і, таким чином забезпечує більшу точність у розрахунку похибок ТН і дослідженні електромагнітних процесів в його елементах.

Висновки

Запропоновані математичні моделі каскадних ТС у вигляді структурних схем слідкувальних систем враховують паразитні параметри вторинних обмоток і втрати в осердях трансформатора. Отримані передавальні функції враховують вплив навантаження нижнього ступеня ТС на роботу верхнього ступеня. Характеристики намагнічування осердь ТС в загальному випадку є нелінійними, тому коефіцієнти передавальних функцій, які містять в своєму складі абсолютну магнітну проникність μ , також нелінійні і мають визначатись для кожного конкретного значення первинного струму і навантаження.

Передавальна функція для вторинної (вихідної) напруги каскадного ТН визначається для кожного конкретного типу ТН, в залежності від кількості елементів в каскаді, за допомогою правила Мейсона. Через велику кількість прямих шляхів і замкнених контурів у структурній схемі ТН, передавальна функція каскадного багатоеlementного ТН має складний аналітичний вираз. Запропоновані структурні схеми дозволяють проводити розрахунки за допомогою математичних пакетів MathCad, MatLab (Control System Toolbox), систем схемотехнічного моделювання OrCAD, системи Design Center (PSpice) та інші без явної побудови передавальної функції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стогний Б. С. Теория высоковольтных измерительных преобразователей переменного тока и напряжения / Б. С. Стогний. — К. : Наук. думка, 1984. — 272 с.
2. Варський Г. М. Вимірвальні перетворювачі струму з електронною компенсацією похибки для електроенергетики та електротехнологічних установок: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук, 05.14.02 / Г. М. Варський. — Київ : Інститут електродинаміки НАН України, 2007. — 189 с.
3. Передавальна функція трансформатора струму з урахуванням опору втрат у магнітному осерді // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах»: Матер. II-ї міжнар. наук.-техн. конф. / Танкевич Є. М., Варський Г. М., Яковлева І. В. — Луцьк : ЛНТУ, 2008. — С. 161—165.
4. Бачурин Н. И. Трансформаторы тока / Н. И. Бачурин. — Л. : Энергия, 1974. — 376 с.
5. Зихерман М. Х. Схема замещения каскадного электромагнитного трансформатора напряжения / М. Х. Зихерман // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы : информ. науч.-техн. сб. — М. : Информэлектро. — 1975. — Вып. 1 (45). — С. 6—8.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 14.10.11
Рекомендована до друку 28.02.12

Варський Григорій Мстиславович — старший науковий співробітник.

Відділ автоматизації електричних систем, Інститут електродинаміки НАН України, Київ