



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 80683

(13) U

(51) МПК

G01M 15/05 (2006.01)

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2012 13940**

(22) Дата подання заявки: **07.12.2012**

(24) Дата, з якої є чинними  
права на корисну  
модель: **10.06.2013**

(46) Публікація відомостей  
про видачу патенту: **10.06.2013, Бюл.№ 11**

(72) Винахідник(и):

**Гаврилець Галина Олегівна (UA),  
Перекрест Андрій Леонідович (UA),  
Родькін Дмитро Йосипович (UA)**

(73) Власник(и):

**КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ МИХАЙЛА  
ОСТРОГРАДСЬКОГО,  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук,  
Полтавська обл., 39600 (UA)**

## (54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ КРІПЛЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДО ФУНДАМЕНТНОЇ ПЛИТИ

(57) Реферат:

Спосіб визначення стану кріплення асинхронного двигуна до фундаментної плити полягає в підключенні двигуна до мережі, вимірюванні вібрацій двигуна в двох площинах, обробці параметрів вібрацій. Додатково визначають параметри впливу на механічну систему (момент двигуна при пуску), визначають положення в просторі та здійснюють координатні перетворення сили, що породжує вібрацію і визначають її проекції на горизонтальну і вертикальну площини. Визначають гармонійні складові моменту двигуна на інтервалі збільшення його до максимуму при пуску, визначають складові вібропараметрів у вертикальній і горизонтальній площинах. Формують систему рівнянь енергетичного балансу для гармонік потужності вібраційного фону двигуна і механічної частини системи, визначають параметри кріплення двигуна шляхом розв'язку системи ідентифікаційних рівнянь енергетичного балансу.

UA 80683 U



Корисна модель належить до галузі вібродіагностики, зокрема до методів визначення дефектів асинхронних двигунів. Корисна модель може бути використана для задач визначення параметрів кріплення асинхронного двигуна до фундаментної плити, а також для задач визначення параметрів коливальних механічних систем.

Відомий спосіб вібродіагностики електричних машин [Спосіб вібродіагностики технічного стану машини: А.С. № 21154 А: G01M 7/00 / В.М. Нагорний; 2002010490; опубліковано 15.11.2002, бюл. № 11/2002], за яким періодично, неодноразово вимірюється амплітуда коливань корпусу машини, потім усереднюється і апроксимується функцією, яка відображує фізику процесу зношування машини, визначається ресурс вузлів і вказується фізична природа їх дефектів.

До недоліку зазначеного способу можна віднести неможливість визначення дефектів кріплень електричних машин до фундаментної основи, таких як ослаблення різьбових з'єднань, збільшення зазорів, просідання і тріщини фундаменту.

Суттєві ознаки, що збігаються зі способом, що заявляється:

- двигун підключають до джерела;
- вимірюють вібрацію на корпусі;
- обробляють результати вимірювань.

Найбільш близьким технічним рішенням до корисної моделі, що заявляється, є спосіб вібраційної діагностики технічного стану електричних машин [Спосіб вібраційної діагностики технічного стану роторних машин: А.С. № 5886 А: G01M 7/00, F01C 1/00 / О.Є. Божко; В.І. Бєлих; О.Ф. Поліщук; 4229335/SU; опубліковано 29.12.1994, бюл. № 8/94], по якому виміряні у відомому проміжку часу значення вібропараметрів додають, виділяють постійну і змінну складові, виділяють максимальне значення постійної складової, за яким оцінюють величину коливань на частоті першої гармоніки обертання ротора, а за параметрами змінної складової судять про види та величини дефектів.

До недоліків наведеного способу, оснований на спектральному аналізі вібрації можна віднести:

- відсутність нормативної бази і загальноприйнятих рекомендацій щодо процесу аналізу даних і постановки діагнозу;
- високу ймовірність неправильної постановки діагнозу, оскільки для різних дефектів спектральний аналіз може давати однакові результати.

Суттєві ознаки, що збігаються із способом, що заявляється:

- вимірюють вібрацію на корпусі
- розкладають вібросигнал в ряд Фур'є
- визначають величину зміни жорсткості у конструкції.

Наведений спосіб приймається за прототип.

В основу корисної моделі поставлено задачу визначення параметрів кріплення асинхронного двигуна до фундаментної плити, таких як жорсткість і демпфування.

Поставлена задача вирішується тим, що асинхронний двигун підключають до мережі, вимірюють його вібрації в двох площинах, визначають момент двигуна при пуску, визначають положення в просторі сили, що обурює, що діє на двигун, здійснюють координатні перетворення сили, що обурює і визначають її проекції на горизонтальну і вертикальну площині, визначають гармонійні складові моменту двигуна на інтервалі збільшення його до максимуму при пуску, формують систему рівнянь енергетичного балансу для гармонік потужності вібраційного фону двигуна і механічної частини системи, визначають параметри кріплення двигуна шляхом вирішення системи ідентифікаційних рівнянь енергетичного балансу.

Реалізація запропонованого способу ілюструється фіг. 1, в якій прийняті позначення: 1 - асинхронний двигун, жорстко закріплений на фундаменті анкерними болтами; 2 - блок датчиків напруги і струму; 3 - керований комутатор силового ланцюга; 4 - блок датчиків вібрації; 5 - блок визначення моменту; 6 - блок аналізу вібропараметрів; 7 - блок аналізу електромагнітного моменту; 8 - блок визначення фази включення двигуна; 9 - блок координатних перетворень; 10 - блок визначення параметрів кріплення асинхронного двигуна; 11 - блок керування.

Для випробовуваного двигуна реалізуються такі режими роботи: прямий пуск, робота на холостому ході, самогальмування. Датчики напруги та струму типові, трансформаторні,

розраховані на напругу  $U_{\max} = 1,2U_n$  та струм  $I_{\max} = 1,6I_n$ , де  $U_n$ ,  $I_n$  - номінальні напруга і струм двигуна. Як датчики вібрації використовуються акселерометри з робочою частотою до 4800 Гц. Сигнал електромагнітного моменту розраховується на підставі паспортних даних двигуна або визначається шляхом моделювання. Блок аналізу вібропараметрів являє собою математичний апарат, який реалізує функції інтегрування віброприскорення, фільтрації і спектрального аналізу. Блок аналізу електромагнітного моменту являє собою математичний апарат

розкладання в ряд Фур'є неперіодичного сигналу і виділення необхідної кількості гармонік для аналізу. Блок визначення фази включення двигуна дозволяє ідентифікувати первинний напрям вібраційної сили в момент пуску. Блок координатних перетворень призначений для визначення радіальних і осевої складових вібраційної сили, що необхідно для ідентифікації параметрів кріплення в трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Блок визначення параметрів кріплення асинхронного двигуна - це математичний апарат, який виконує наступні функції: розрахунок параметрів імітаційної моделі вузла кріплення, складання і розв'язок системи ідентифікаційних рівнянь, прийняття рішення про наявність або відсутність дефекту кріплення. Блок керування реалізує функції програми управління верхнього рівня.

Електромагнітний момент, який за своєю природою є моментом сил, що породжують вібрацію, розраховується на основі паспортних даних двигуна:

$$M = \frac{M_i}{\cos \varphi_k} \left( \cos(\omega t - \varphi_k) e^{\alpha_1 t} + \cos(\omega t + \varphi_k) e^{\alpha_2 t} \right),$$

де  $M_i$  - пусковий момент двигуна, що обчислюється за формулою Клоса;

$$\alpha_1 = \frac{R_1 R_2}{L_m (R_1 + R_2)};$$

$$\alpha_2 = \frac{R_1 R_2}{L_1 + L_2};$$

$R_1, R_2$  - активні опори статора і ротора;

$L_1, L_2, L_m$  - індуктивності двигуна;

$\varphi_k$  - кут між напругою і струмом у режимі короткого замикання.

У трифазному асинхронному двигуні напрямок вектора моменту електромагнітних сил визначається сумарним електромагнітним полем, створюваним струмами, що протікають в обмотках. Як відомо, фазові обмотки статора зміщені відносно одна одної на 120 електричних градусів (фіг. 2, а, б). Відповідно і струми, що протікають в обмотках А, В, С, зсунуті на 1/3 періоду. Сумарне електромагнітне поле дорівнює сумі полів, створюваних струмами в кожній з фаз, а його напрямок визначається сумою векторів цих полів. У кожен момент часу електромагнітний момент створюється силою  $F$  - вектором, прикладеним до ротора двигуна перпендикулярно до осі обертання в точці, де електромагнітне поле максимальне. Разом з електромагнітним полем вектор моменту обертається, переходячи з однієї фази в іншу (фіг. 2, в). Таким чином, для двигуна з двома парами полюсів можна визначити 6 положень вектора електромагнітного моменту, що відповідають максимальним і мінімальним значенням поля в кожній фазовій обмотці (фіг. 2, г).

Фіг. 3 ілюструє розклад миттєвого вектора вібросили  $F_\Sigma$  на радіальну у вертикальній площині  $F_a$  і радіальну в горизонтальній площині  $F_b$  складові:

$$F_a = F_\Sigma \cos(\varphi),$$

$$F_b = F_\Sigma \cos(90 - \varphi).$$

Ударний вплив електромагнітного моменту на конструкцію відбувається при пуску, коли його величина зростає від нуля до  $M_{\max}$  за час  $t_e$  (фіг. 4 а). Для розкладу в ряд Фур'є цієї ділянки сигнал подається періодичною функцією (фіг. 4 б), а розкладення проводиться на половині

періоду  $\frac{T_x}{2}$ :

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nx),$$

$$b_n = \frac{4}{T_x} \int_0^{\frac{T_x}{2}} f(x) \sin(nx) dx.$$

За цей же проміжок часу  $t_e$  реєструється сигнал віброприскорення, інтегрується і аналогічним чином розкладається у ряд Фур'є на заданому напівперіоді. Отримані дані передаються у блок визначення параметрів кріплення асинхронного двигуна.

На основі прикладної теорії коливань і електромеханічних аналогій пропонується розглядати механічну коливальну систему, що складається із маси, закріпленої на жорсткій поверхні в одній точці з жорсткістю  $c$ . Властивості матеріалу кріплення поглинати коливання характеризуються коефіцієнтом  $b$  (фіг. 5, а). Така система може бути описана диференціальним рівнянням 2-го порядку:

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + b \frac{dy(t)}{dt} + cy(t) = F(t)$$

де  $m$  - маса механізму;

$c$  - сумарна жорсткість віброізоляторів;

$b$  - механічний опір, що визначає активні втрати коливальної енергії;

$y(t)$  - зміщення інерційного елемента від положення рівноваги;

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad \text{- інерційні сили;}$$

$$b \frac{dy(t)}{dt} \quad \text{- сили тертя;}$$

$cy(t)$  - сили пружності;

$F(t) = F_0 \cos(\omega t)$  - сила, що породжує коливання.

Даний процес, що відбувається у механічній системі, може бути описаний диференціальним рівнянням електромагнітних коливань у RLC-колі (фіг. 5, б):

$$L \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = u(t)$$

де  $L \frac{d^2 i(t)}{dt^2}$  - падіння напруги на клемі котушки індуктивності;

$R \frac{di(t)}{dt}$  - падіння напруги на активному опорі;

$\frac{1}{C} i(t)$  - падіння напруги на конденсаторі.

Таким чином, електричне коло є схемою заміщення механічної системи кріплення АД до фундаменту (фіг. 5, б). Згідно з теорією електромеханічних аналогій, інерційність механічної коливальної системи відповідає індуктивності кола; жорсткість віброізоляторів обернено пропорційна ємності кола; механічний опір відповідає активному опорі кола; сила, що породжує коливання - е.р.с. ланцюга, зміщення інерційного елемента від положення рівноваги відповідає кількості електрики, а віброшвидкості - електричний струм. Таким чином, задача визначення параметрів кріплення зводиться до визначення параметрів електричного кола, в якому джерелом е.р.с. є електромагнітний момент двигуна, а контурним струмом - сигнал віброшвидкості.

Запропонований спосіб визначення параметрів кріплення реалізується шляхом використання рівнянь енергетичного балансу складових миттєвої потужності для елементів RLC-кола. Рівняння енергетичного балансу складаються за схемою заміщення механічної системи з використанням кінцевого числа гармонік. При використанні  $N$  гармонік струму і напруги можуть бути отримані  $2N+1$  ідентифікаційних рівнянь. Для задачі визначення трьох невідомих параметрів достатнім є використання двох гармонік сигналів напруги та струму:

$$u(t) = U_1 \cos(\Omega_1 t) + U_2 \cos(\Omega_2 t)$$

$$i(t) = I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi_1) + I_2 \cos(\omega_2 t - \varphi_2) = \\ = I_{a1} \cos(\omega_1 t) + I_{b1} \sin(\omega_1 t) + I_{a2} \cos(\omega_2 t) + I_{b2} \sin(\omega_2 t)$$

Частоти гармонік напруги  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  та струму  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  пов'язані між собою коефіцієнтами кратності так, що  $\Omega_2 = k_1 \Omega_1$ ,  $\omega_2 = k_2 \omega_1$ ,  $\omega_1 = k_3 \Omega_1$ .

Для складання системи ідентифікаційних рівнянь визначається миттєва потужність джерела напруги і миттєва потужність на кожному із елементів кола.

Миттєва потужність джерела напруги визначається наступним чином:

$$P_u(t) = U(t)I(t) = (U_1 \cos(\Omega_1 t) + U_2 \cos(\Omega_2 t)) \times$$

$$\times (I_{a1} \cos(\omega_1 t) + I_{b1} \sin(\omega_1 t) + I_{a2} \cos(\omega_2 t) + I_{b2} \sin(\omega_2 t))$$

З урахуванням тригонометричних перетворень маємо наступний вираз:

$$P_u(t) = \frac{1}{2} [U_1 I_{a1} (\cos(\Omega_1 - \omega_1)t + \cos(\Omega_1 + \omega_1)t) +$$

$$+ U_1 I_{b1} (\sin(\Omega_1 + \omega_1)t - \sin(\Omega_1 - \omega_1)t) +$$

$$+ U_1 I_{a2} (\cos(\Omega_1 - \omega_2)t + \cos(\Omega_1 + \omega_2)t) +$$

$$+ U_1 I_{b2} (\sin(\Omega_1 + \omega_2)t - \sin(\Omega_1 - \omega_2)t) +$$

$$+ U_2 I_{a1} (\cos(\Omega_2 - \omega_1)t + \cos(\Omega_2 + \omega_1)t) +$$

$$+ U_2 I_{b1} (\sin(\Omega_2 + \omega_1)t - \sin(\Omega_2 - \omega_1)t) +$$

$$+ U_2 I_{a2} (\cos(\Omega_2 - \omega_2)t + \cos(\Omega_2 + \omega_2)t) +$$

$$+ U_2 I_{b2} (\sin(\Omega_2 + \omega_2)t - \sin(\Omega_2 - \omega_2)t)]$$

Миттєва потужність на активному опорі:

$$P_R(t) = I^2(t)R = R(I_{a1} \cos(\omega_1 t) + I_{b1} \sin(\omega_1 t) + I_{a2} \cos(\omega_2 t) + I_{b2} \sin(\omega_2 t)) \times$$

$$\times (I_{a1} \cos(\omega_1 t) + I_{b1} \sin(\omega_1 t) + I_{a2} \cos(\omega_2 t) + I_{b2} \sin(\omega_2 t))$$

З урахуванням тригонометричних перетворень маємо наступний вираз:

$$P_R(t) = \frac{R}{2} [I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{a2}^2 + I_{b2}^2 + 2(I_{a1}I_{a2} + I_{b1}I_{b2})\cos(\omega_1 - \omega_2)t +$$

$$2(I_{a1}I_{a2} - I_{b1}I_{b2})\cos(\omega_1 + \omega_2)t + 2(I_{a1}I_{b2} + I_{b1}I_{a2})\sin(\omega_1 + \omega_2)t +$$

$$+ 2(-I_{a1}I_{b2} + I_{b1}I_{a2})\sin(\omega_1 - \omega_2)t + 2I_{a1}I_{b1}\sin(2\omega_1 t) +$$

$$+ 2I_{a2}I_{b2}\sin(2\omega_2 t) + (I_{a1}^2 - I_{b1}^2)\cos(2\omega_1 t) + (I_{a2}^2 - I_{b2}^2)\cos(2\omega_2 t)]$$

Миттєва потужність на індуктивності кола:

$$P_L(t) = LI(t)\frac{dI(t)}{dt} = L(I_{a1} \cos(\omega_1 t) + I_{b1} \sin(\omega_1 t) + I_{a2} \cos(\omega_2 t) + I_{b2} \sin(\omega_2 t)) \times$$

$$\times (-\omega_1 I_{a1} \sin(\omega_1 t) + \omega_1 I_{b1} \cos(\omega_1 t) - \omega_2 I_{a2} \sin(\omega_2 t) + \omega_2 I_{b2} \cos(\omega_2 t))$$

З урахуванням тригонометричних перетворень маємо наступний вираз:

$$P_L(t) = \frac{L}{2} [\omega_1 (I_{a1}^2 - I_{b1}^2) \sin(2\omega_1 t) + 2\omega_1 I_{a1}I_{b1} \cos(2\omega_1 t) +$$

$$+ \omega_2 (-I_{a2}^2 + I_{b2}^2) \sin(2\omega_2 t) + 2\omega_2 I_{a2}I_{b2} \cos(2\omega_2 t) +$$

$$+ (-\omega_2 I_{a1}I_{a2} - \omega_1 I_{a1}I_{a2} + \omega_1 I_{b1}I_{b2} + \omega_2 I_{b1}I_{b2}) \sin(\omega_1 + \omega_2)t +$$

$$+ (-\omega_2 I_{a1}I_{b2} + \omega_2 I_{a2}I_{b1} + \omega_1 I_{a2}I_{b1} + \omega_1 I_{a1}I_{b2}) \cos(\omega_1 + \omega_2)t +$$

$$+ (\omega_2 I_{a1}I_{a2} + \omega_2 I_{b1}I_{b2} - \omega_1 I_{a1}I_{a2} - \omega_1 I_{b1}I_{b2}) \sin(\omega_1 - \omega_2)t +$$

$$+ (\omega_2 I_{a1}I_{b2} - \omega_2 I_{a2}I_{b1} + \omega_1 I_{a2}I_{b1} - \omega_1 I_{a1}I_{b2}) \cos(\omega_1 - \omega_2)t]$$

Миттєва потужність на ємності кола:

$$P_C(t) = \frac{1}{C} I(t) \int I(t) dt =$$

$$= \frac{1}{C} (I_{a1} \cos(\omega_1 t) + I_{b1} \sin(\omega_1 t) + I_{a2} \cos(\omega_2 t) + I_{b2} \sin(\omega_2 t)) \times$$

$$\times \left( \frac{1}{\omega_1} I_{a1} \sin(\omega_1 t) - \frac{1}{\omega_1} I_{b1} \cos(\omega_1 t) + \frac{1}{\omega_2} I_{a2} \sin(\omega_2 t) - \frac{1}{\omega_2} I_{b2} \cos(\omega_2 t) \right)$$

З урахуванням тригонометричних перетворень маємо наступний вираз:

$$P_C(t) = \frac{1}{2C} \left[ \frac{1}{\omega_1} (I_{a1}^2 - I_{b1}^2) \sin(2\omega_1 t) + \frac{1}{\omega_2} (I_{a2}^2 - I_{b2}^2) \sin(2\omega_2 t) - \right.$$

$$- \frac{2}{\omega_1} I_{a1}I_{b1} \cos(2\omega_1 t) - \frac{2}{\omega_2} I_{a2}I_{b2} \cos(2\omega_2 t) +$$

$$+ I_{a1}I_{a2} \left( \frac{1}{\omega_2} - \frac{1}{\omega_1} \right) \sin(\omega_2 - \omega_1)t + I_{b1}I_{b2} \left( \frac{1}{\omega_2} - \frac{1}{\omega_1} \right) \sin(\omega_2 - \omega_1)t -$$

$$-I_{a1}I_{b2}\left(\frac{1}{\omega_2} + \frac{1}{\omega_1}\right)\cos(\omega_2 + \omega_1)t - I_{b1}I_{a2}\left(\frac{1}{\omega_2} + \frac{1}{\omega_1}\right)\cos(\omega_2 + \omega_1)t + \\ + I_{a1}I_{b2}\left(\frac{1}{\omega_1} - \frac{1}{\omega_2}\right)\cos(\omega_2 - \omega_1)t - I_{b1}I_{a2}\left(\frac{1}{\omega_1} - \frac{1}{\omega_2}\right)\cos(\omega_2 - \omega_1)t \Big]$$

Оскільки кратність частот гармонік напруги та струму відома, після спрощення виразів для миттєвої потужності на елементах кола та джерелі напруги записується рівняння балансу миттєвої потужності:

$$\begin{cases} P_{0u} = P_{0R}; \\ P_{kan} = P_{kaR} + P_{kaL} + P_{kaC}; \\ P_{kbn} = P_{kbR} + P_{kbL} + P_{kbC}. \end{cases}$$

Розв'язком даної системи рівнянь будуть невідомі параметри електричного кола - опір, індуктивність та ємність. Виконавши зворотне електромеханічне перетворення, отримуємо шукані параметри механічної коливальної системи - її масу, жорсткість кріплення та коефіцієнт демпфування вібрації.

### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

1. Спосіб визначення стану кріплення асинхронного двигуна до фундаментної плити, що полягає в підключенні двигуна до мережі, вимірюванні вібрацій двигуна в двох площинах, обробці параметрів вібрацій, який **відрізняється** тим, що додатково визначають параметри впливу на механічну систему (момент двигуна при пуску), визначають положення в просторі та здійснюють координатні перетворення сили, що породжує вібрацію і визначають її проекції на горизонтальну і вертикальну площини, визначають гармонійні складові моменту двигуна на інтервалі збільшення його до максимуму при пуску, визначають складові вібропараметрів у вертикальній і горизонтальній площинах, формують систему рівнянь енергетичного балансу для гармонік потужності вібраційного фону двигуна і механічної частини системи, визначають параметри кріплення двигуна шляхом розв'язку системи ідентифікаційних рівнянь енергетичного балансу.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що використовують пристрій, що забезпечено датчиком струму, момент двигуна визначають шляхом розрахунку миттєвої потужності на клемі двигуна з урахуванням миттєвої потужності на активному опорі статора та індуктивному опорі розсіювання.

3. Спосіб за п. 2, який **відрізняється** тим, що додатково складають схему ідентифікаційних рівнянь асинхронного двигуна, шляхом її рішення визначають параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, залежність моменту двигуна від часу визначають розрахунковим шляхом з використанням отриманих параметрів.

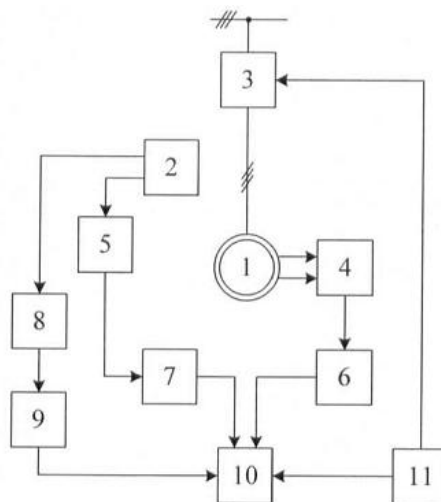
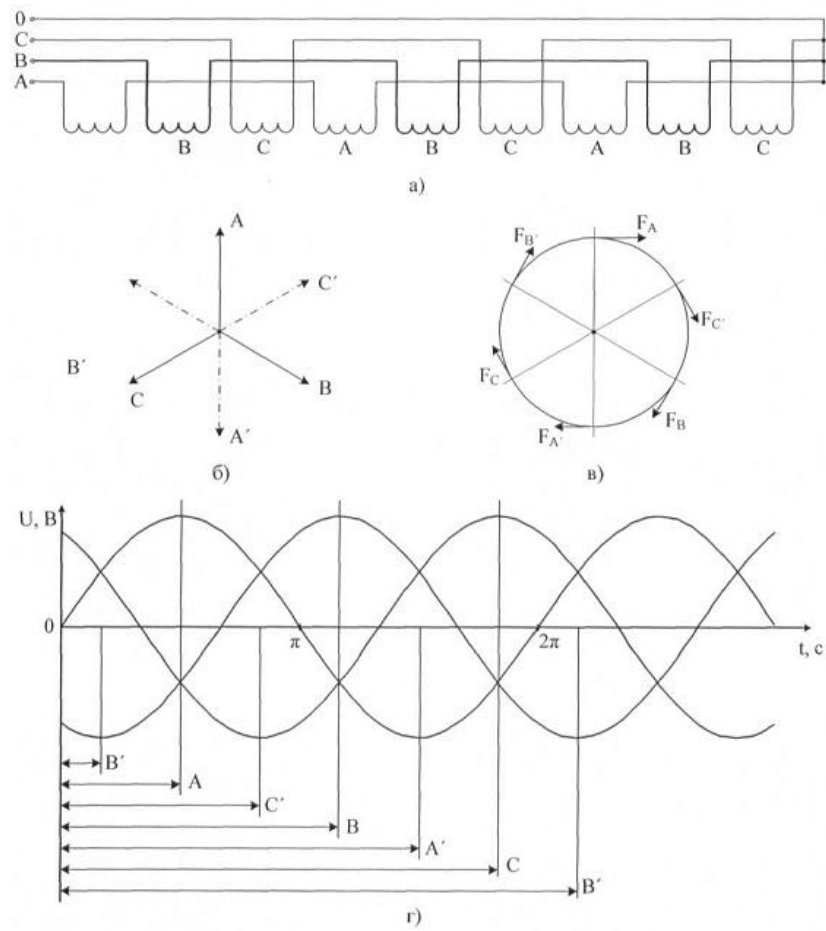
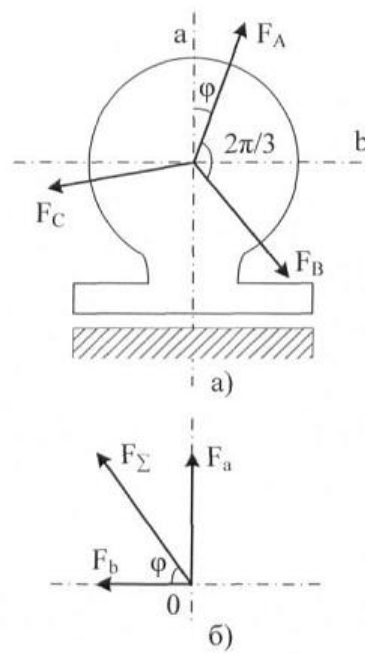


Fig. 1

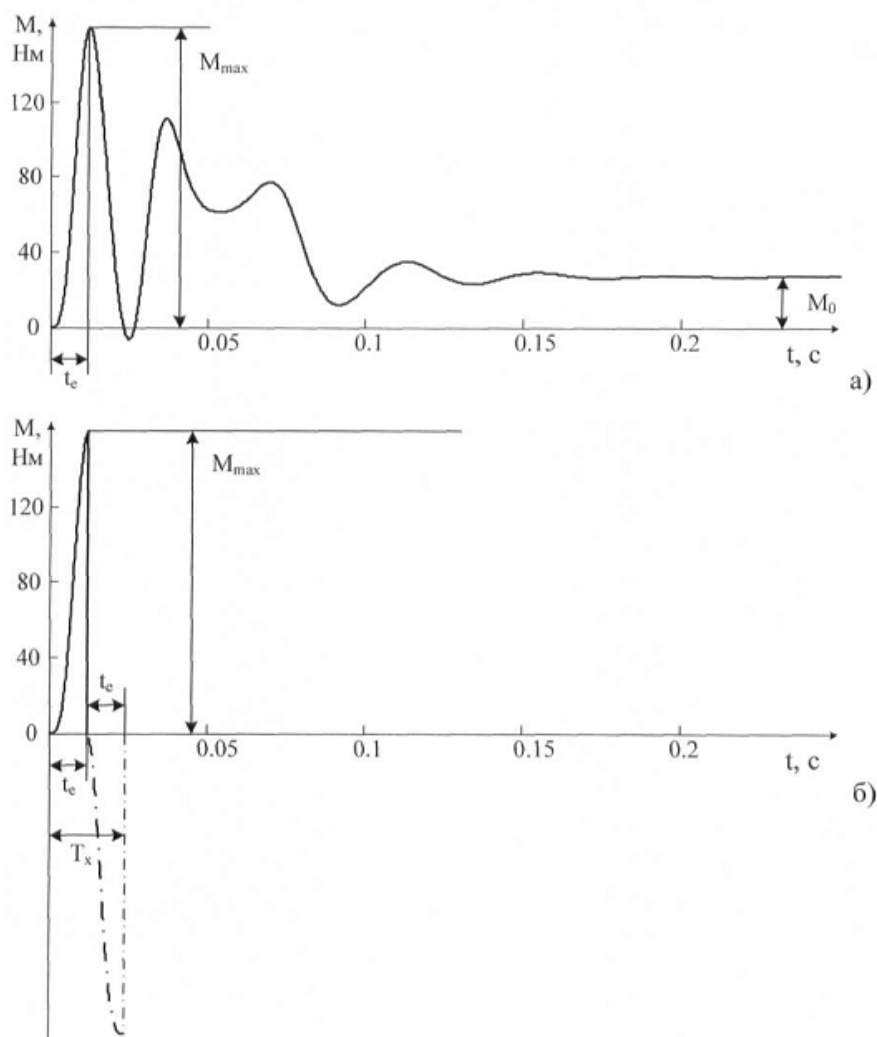


Фиг. 2

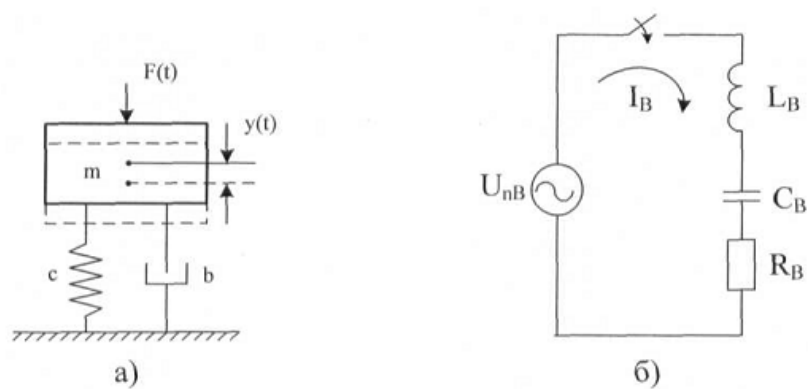


Фиг. 3





Фиг. 4



Фиг. 5