

Є.І. БАЙДА, М.Г. ПАНТЕЛЯТ, А.О. КУЗЬМІН

## РОЗРАХУНКИ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИНХРОНІЗУЮЧОМУ ВАЛУ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА СЕРЕДНІХ НАПРУГ В ПРОЦЕСІ ВМИКАННЯ

Важливим напрямком теоретичних досліджень сучасних електричних апаратів, вимикачів та контакторів середніх напруг, є дослідження механічних процесів, які виникають в процесі їх роботи. В першу чергу це пов'язано з достатньо великими зусиллями та прискореннями, що діють на елементи конструкції та синхронізуючий вал таких апаратів в процесі вмикання. У статті на підставі розроблених математичних моделей виконано розрахунки механічних процесів у синхронізуючому валу вакуумного вимикача в статичному та динамічному режимі для абсолютно жорсткого та реального валу та проведено їхній порівняльний аналіз. Результати комп'ютерного моделювання отримані у табличній та графічній формах в яких наведені дані о статичних та динамічних деформаціях валу, а також механічних зусиллях в його опорах. Показано, що механічна деформація валу викликає зменшення провалу контактів і сил контактного натискання, але при правильно обраному поперечному перетину синхронізуючого валу ці значення незначним чином впливають на роботу самого вимикача (зменшення складає близько 20% і 7% відповідно). Також показано, що в результаті вигину валу в опорах з'являються додаткові осеві зусилля у порівнянні зі спрощеним розрахунком, які істотно впливають на вибір підшипників по еквівалентному статичному навантаженню. Розраховані динамічні зусилля з урахуванням мас контактів та контактних тяг перевищують аналогічні статичні зусилля в 1,3 рази, що також потрібно враховувати при виборі підшипників в яких утримується синхронізуючий вал.

**Ключові слова:** вакуумні вимикачі, механічні напруги, деформація вала.

Y. BAJDA, M. PANTELJAT, A. KUZMIN

## CALCULATIONS OF STATIC AND DYNAMIC PROCESSES IN THE SYNCHRONIZING SHAFT OF A MEDIUM-VOLTAGE VACUUM SWITCH DURING THE TURN-ON PROCESS

An important direction of theoretical research of modern electrical devices, medium voltage switches and contactors is the study of mechanical processes that occur during their operation. First of all, this is due to sufficiently large forces and accelerations acting on the structural elements and the synchronizing shaft of such devices in the process of switching on. In the article, on the basis of developed mathematical models, calculations of mechanical processes in the synchronizing shaft of a vacuum switch in static and dynamic mode for an absolutely rigid and real shaft are performed and their comparative analysis is carried out. The results of computer modeling are obtained in tabular and graphical forms, which include data on static and dynamic deformations of the shaft, as well as mechanical forces in its supports. It is shown that the mechanical deformation of the shaft causes a decrease in contact drop and contact pressure forces, but with a correctly selected cross-section of the synchronizing shaft, these values slightly affect the operation of the switch itself (the decrease is about 20% and 7%, respectively). It is also shown that as a result of the bending of the shaft, additional axial forces appear in the supports compared to the simplified calculation, which significantly affect the choice of bearings according to the equivalent static load. The calculated dynamic forces, taking into account the masses of contacts and contact rods, exceed similar static forces by 1.3 times, which must also be taken into account when choosing bearings in which the synchronizing shaft is held.

**Keywords:** vacuum switches, mechanical stresses, shaft deformation.

**Вступ.** Одним із елементів конструкції вакуумних вимикачів середніх напруг є приводний, або як його ще називають, синхронізуючий вал. Завданням валу є передача руху та зусиль від актуатора контактам вимикача. Лідером у виробництві вимикачів з електромагнітними бістабільними актуаторами є концерн АВВ, який першим представив такий вимикач (VM1) у 1990 р. [1]. В Україні вакуумні вимикачі середніх напруг виготовляють компанії ЗАТ "Високовольтний союз" та "АВМ АМПЕР" [2]. Вимикачі з електромагнітними актуаторами прості за конструкцією, надійні та не вимагають профілактичного обслуговування протягом багатьох років.

На кафедрі електричних апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» протягом тривалого часу проводяться роботи, пов'язані з дослідженнями, удосконаленням та розробкою нових елементів конструкції вимикачів та контакторів середніх напруг [3–6]. Одним із напрямків зазначених робіт є дослідження механічних процесів які відбуваються у вакуумних вимикачах.

На рис. 1 показана конструкція приводного валу вимикача з вертикальним розташуванням вакуумних камер.

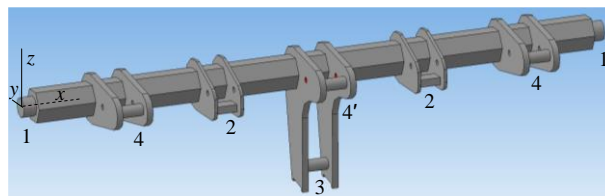


Рис. 1. Привідний вал вимикача: 1 – вісі кріплення валу в підшипниках; 2 – площини докладання сил пружин, що відключають вимикач; 3 – вісь кріплення тяги електромагнітного актуатора; 4, 4' – вісі кріплення тяг рухомих контактів у крайніх та середньому полюсах;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – вісі системи координат

Актуатор через вісь 3 приводить у обертання вал, вісі 4 якого пов'язані з рухомими контактами вакуумних камер через тягові ізолятори з пружинами контактного натискання.

З рис. 1 можна помітити, що конструкція валу досить складна, а в результаті дії значних зусиль вал буде схильний до складної деформації. При цьому провал контактів, кінцеві контактні натискання і реакції в опорах валу (реакції в підшипниках) будуть дещо іншими, ніж у випадку спрощеного розрахунку для абсолютно жорсткого валу, а також залежатимуть від динамічних характеристик вимикача. Отже, головне питання полягає у кількісній оцінці зазначених

© Є.І. Байда, М.Г. Пантелят, А.О. Кузьмін, 2023

відмінностей.

**Завдання та мета дослідження** – дослідження механічних зусиль та деформацій абсолютно жорсткого та реального приводного валу вакуумного вимикача середньої напруги в статичному та динамічному режимах роботи з метою порівняння отриманих чисельних результатів та кількісного аналізу отриманих даних.

**Статичний розрахунок валу вимикача для прийнятої моделі.** У літературі розрахунок валів представлений досить широко (в [7–10] наведені найбільш фундаментальні дослідження), але проблема полягає в тому, що розрахунки валу зазначеної конструкції за відповідних умов кріплення (рис. 1) відсутні. Як показано в [11], розрахунки складних реальних конструкцій можуть бути проведені тільки чисельними методами, тому всі уточнюючі розрахунки в даній роботі проводилися методом скінчених елементів з використанням програмного продукту COMSOL Multiphysics.

*Спрощений розрахунок абсолютно жорсткого валу.* На рис. 2 показана модель абсолютно жорсткого валу та сили, що діють на нього.

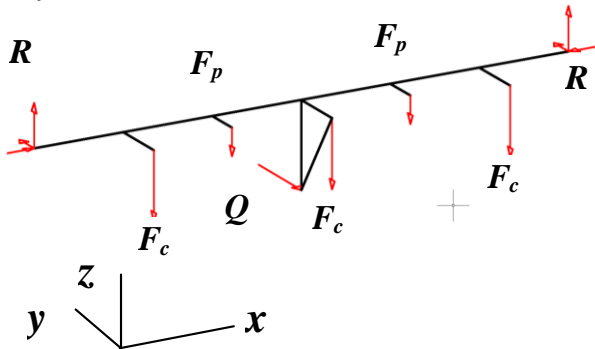


Рис. 2. Розрахункова модель абсолютно жорсткого валу:  $R$  – реакції в опорах;  $Q$  – тягове зусилля;  $F_c$  – сили контактного натискання;  $F_p$  – сили пружин, що відключають

Система (рис. 2) статично визначена. Для визначення невідомих сил необхідно записати умову рівноваги валу через проекції сил на осі координат і рівняння крутного моменту відносно вісі  $x$ .

Вихідні дані: довжина сталевго валу – 574 мм; форма перерізу – шестигранна з діаметром вписаного кола 32 мм; співвідношення ходу вісі актуатора 3 та осей тягових ізоляторів 4 – 1,5; сумарна сила пружин, що відключають (діють на поверхні 2, див. рис. 1), – 1000 Н; сумарна сила початкового підтискання контактних пружин (прикладена до осей 4, див. рис. 1) – 6600 Н (по 2200 Н на полюс); хід вісі 3 (рис. 1) актуатора після торкання контактів – 4 мм; теоретичний хід осей тягових ізоляторів після торкання контактів (провал контактів при абсолютно жорсткому валу, вісі 4 на рис 1) – 2,61 мм, жорсткість контактної пружини – 280 кН/м.

У цьому випадку результат розрахунку зусиль буде наступний:

$$\begin{aligned} R_y &= \frac{1}{2} \cdot \frac{3 \cdot F_c \cdot L_c + 2 \cdot F_p \cdot L_p}{L_q}; \\ R_z &= \frac{3}{2} \cdot F_c + F_p; \\ R_x &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $R$  – реакції опор по відповідних осях;  $L_c, L_p, L_q$  – довжини плечей від вісі валу до точок прикладання сил контактного натискання, пружин, що відключають, і приводної вісі 3 (рис. 1).

Причому

$$F_c = F_0 + C_c \cdot w, \quad (2)$$

де  $F_0$  – початкова сила контактного натискання;  $C_c$  – жорсткість контактної пружини;  $w$  – хід контактів.

Тоді, розрахункові формули для визначення реакцій в опорах валу набудуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned} R_y &= \frac{1}{2} \cdot \frac{3 \cdot (F_0 + C_c \cdot w) \cdot L_c + 2 \cdot F_p \cdot L_p}{L_q}; \\ R_z &= \frac{3}{2} \cdot (F_0 + C_c \cdot w) + F_p; \\ R_x &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

*Розрахунок валу з використанням COMSOL Multiphysics.* Розрахункова модель валу, імпортована у програмний продукт COMSOL Multiphysics з графічного редактора, збігається з рис. 1. Граничні умови: до відповідних поверхонь валу прикладені сили контактного натискання і пружин, що відключають (поверхні 2, 4, див. рис. 1); на осях 1 та торцях валу задані умови ковзання; на вісі 3 задано переміщення.

*Результати статичного розрахунку.* Розрахунок проводився в припущенні про відсутність деформації корпусу, в якому закріплені опори валу. На рис. 3 наведено результати розрахунку для абсолютно жорсткого та реального валу. Як випливає з рис 3, отримані значення відрізняються. Відмінності в ході тяги контактів для абсолютно жорсткого та реального валу наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Відмінності у значенні прогину валу

Модель валу	Початковий хід, мм	Кінцевий хід, мм
Абсолютно жорсткий вал	0	2,61
Реальний вал	-0,56	2,05

З табл. 1 випливає, що існує прогин валу, який визначається прикладеним до нього навантаженням. Такий прогин зменшує значення ходу контактів порівняно з абсолютно жорстким валом на 0,56 мм, що призводить до деякого зменшення сили кінцевого контактного натискання.

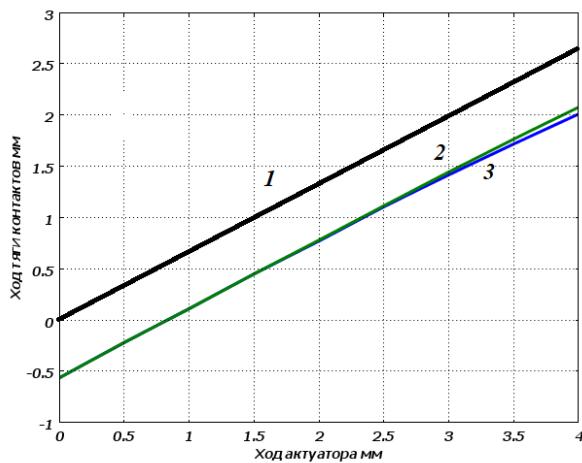


Рис. 3. Залежність ходу тяги контактів від ходу актуатора: 1 – для абсолютно жорсткого валу; 2, 3 – для реального валу (центральна та бічна тяги)

На рис 4 показана форма прогину валу при максимальному ході актуатора в масштабі 20:1.

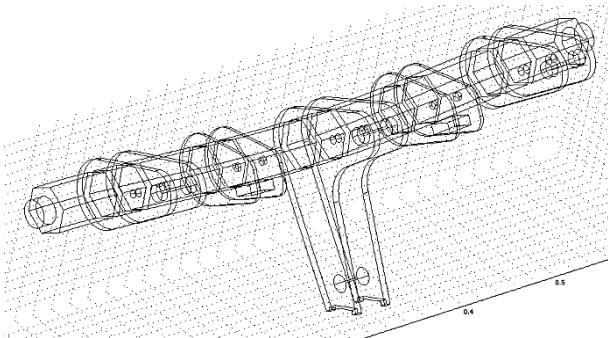


Рис. 4. Форма прогину валу при максимальному ході актуатора в масштабі 20:1

Наявність прогину валу призводить до зміни реакцій в опорах. На рис. 5, 6 наведено значення реакцій в опорах для абсолютно жорсткого і реального валу.

У табл. 2 показані значення реакції для абсолютно жорсткого і реального валу в початковій і кінцевій точках ходу актуатора.

Таблиця 2 – Відмінності у значенні реакції в опорах валу

Реакція, Н	Абсолютно жорсткий вал	Реальний вал
$R_{y \min}$	2343	2190
$R_{y \max}$	3058	3358
$R_{z \min}$	3800	3582
$R_{z \max}$	4896	4574

З табл. 2 бачимо, що відмінність у реакціях складає приблизно 10% (для більш тонких валів ця відмінність буде більше). Але головна відмінність у результатах розрахунків полягає в тому, що при розрахунку реального валу за рахунок його прогину з'являється додаткова осьова сила  $R_x$ , якої не могло бути при розрахунку жорсткого валу і яка повинна бути врахована при виборі підшипників.

Значення осьової сили змінюється в діапазоні від  $R_{x \min} = -335$  Н до  $R_{x \max} = -1050$  Н. На рис. 7 показано зміну значення осьової сили в залежності від ходу

актуатора для абсолютно жорсткого та реального валу.

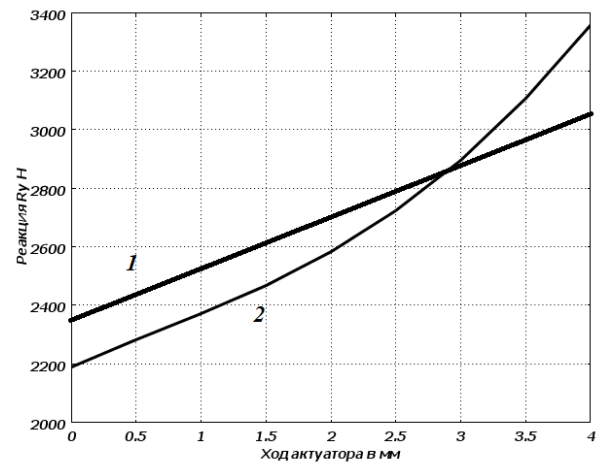


Рис. 5. Реакція  $R_y$  для жорсткого (1) та реального (2) валу

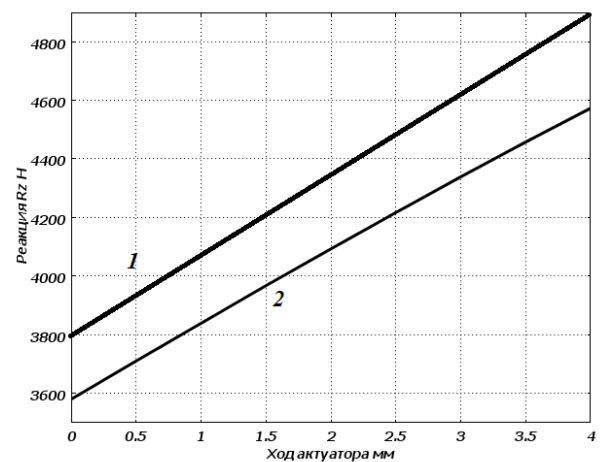


Рис. 6. Реакція  $R_z$  для жорсткого (1) та реального (2) валу

Урахування осьової сили важливе при виборі підшипника. Так, якщо вибір радіальних підшипників проводиться за еквівалентним статичним навантаженням, то це значення обчислюється за формулою [12]:

$$P_o = F_r \cdot X_o + F_a \cdot Y_o, \quad (4)$$

де  $P_o$  – еквівалентне статичне навантаження;  $F_r$  – радіальне навантаження;  $X_o$  – коефіцієнт радіального навантаження, що дорівнює 0,6;  $F_a$  – осьове навантаження;  $Y_o$  – коефіцієнт осьового навантаження, що дорівнює 0,5.

Порівняльні дані розрахунків наведені у табл. 3. З табл. 3 бачимо, що для шестигранного валу з діаметром вписаного кола 32 мм еквівалентне статичне навантаження на підшипник буде на 13,5% більше, ніж для абсолютно жорсткого валу.

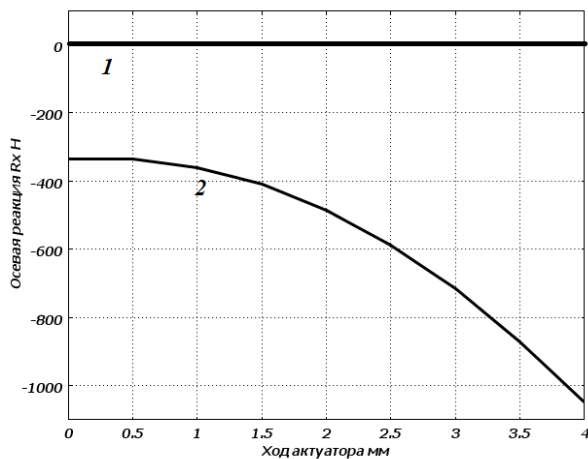


Рис. 7. Осьова реакція  $R_x$  у функції ходу актуатора: 1 – жорсткий вал; 2 – реальний вал

Таблиця 3 – Значення еквівалентної статичної сили

Модель валу	$P_0$ , Н
Абсолютно жорсткий вал	3463,5
Реальний вал	3929,6

Як було зазначено вище, прогин зменшує значення провалу контактів і сили контактного натискання в порівнянні з абсолютно жорстким валом. На рис. 8 наведено зміну сили контактного натискання у функції ходу актуатора.

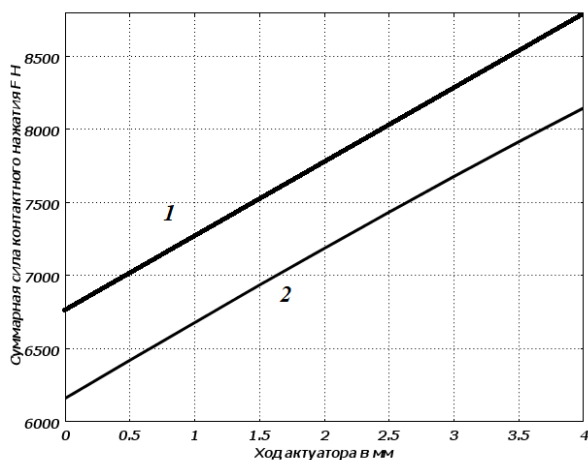


Рис. 8. Сумарна сила контактного натискання: 1 – жорсткий вал; 2 – реальний вал

Порівняльні дані результатів розрахунків стосовно зміни сил контактного натискання наведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Сумарне значення сил контактного натискання

Модель валу	$F$ , Н
Абсолютно жорсткий вал	8792
Реальний вал	8147

Для реального валу сумарне контактне натискання становить величину  $\sim 93\%$  від ідеального контактного натискання і істотно не впливає на роботу контактів вимикача.

**Результати розрахунку валу в динамічному режимі.** При вмиканні вакуумного вимикача на синхронізуючий вал та його опори діють великі динамічні навантаження які обумовлені: значною швидкістю руху контактів в момент їх замиканні ( $\approx 1,5$  м/с); значними механічними навантаженнями ( $\approx 8000$  Н); та значними рухомими масами (три тягових ізолятора та контакти сумарною масою  $\approx 3,2$  кг). Тому динамічний розрахунок є важливим при проектуванні та дослідженні вакуумних вимикачів.

Для коректного розрахунку динамічних характеристик необхідно врахувати додаткові рухомі маси тягових ізоляторів, контактів та врахувати коефіцієнти демпфування, які суттєво впливають на динаміку валу. Перший фактор враховувався збільшенням щільності осей тягових ізоляторів 4 (рис. 1) до величини  $3 \cdot 10^5$  кг/м<sup>3</sup> з урахування приєднаної маси та об'єму кожної вісі. Для урахування другого фактору (демпфування по Релею [13]) необхідно розрахувати власні частоти коливань валу та розрахувати матрицю жорсткості з урахуванням фактору втрат. У результаті проведених розрахунків були отримані наступні дані: власні частоти коливань (перша та друга моди) –  $f_1 = 242,8$  Гц,  $f_2 = 338,0$  Гц; коефіцієнти згасання при цьому –  $\alpha = 177,6$  с<sup>-1</sup>,  $\beta = 5,5 \cdot 10^{-5}$  с.

**Початкові умови динамічного розрахунку.** В якості початкових умов руху синхронізуючого валу на шляху вибору провалу контактів було задано часову залежність  $S(t)$  – шлях тяги електромагнітного актуатора (вісь 3) вздовж осі  $y$ , (див. рис.1), який розраховувався, або отримано с осцилограмами.

Початкові швидкості точок валу розраховувались по співвідношенню

$$\vec{v}_{0i} = \vec{\omega} \times \vec{r}_i \quad (5)$$

де  $\vec{v}_{0i}$  – початкові швидкості точок валу;  $\vec{\omega}$  – кутова швидкість вздовж осі  $x$  (рис. 1) і яка дорівнює  $\vec{e}_x \cdot \frac{S'(0)}{l}$ , ( $l$  – відстань від центру вісі 3 до вісі  $x$  (рис. 1);  $\vec{r}_i$  – відстань меж точками, що належать валу та вісью  $x$  (рис. 1).

**Результати розрахунку.** На рис. 9 показано хід вісі центральної та бокової контактних тяг.

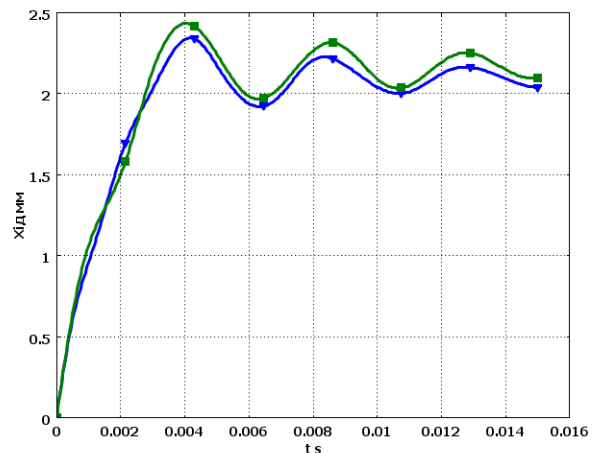


Рис. 9. Хід контактних тяг, де  $\Delta$  – центральна тяга;  $\square$  – бокова тяга



З рис. 9 випливає: деформація валу має коливальний характер; реальний хід контактних тяг менше теоретичного; контактне натискання також змінюється з часом.

Мінімальне контактне натискання (рис. 10) буде в середньому полюсі.

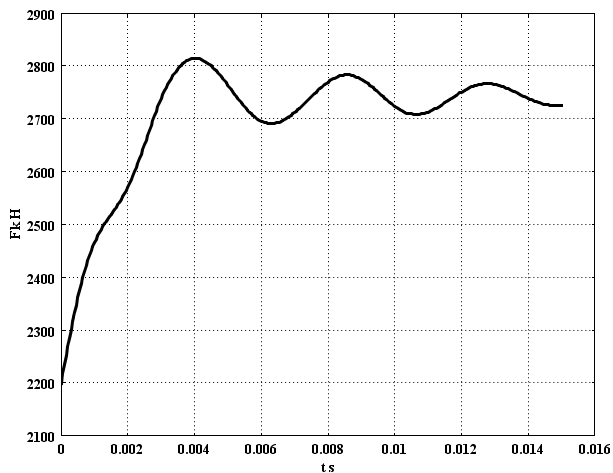


Рис. 10. Сила контактної натискання в середньому полюсі

Найбільший інтерес являють сили, що діють на опори вала та підшипник (рис.11).

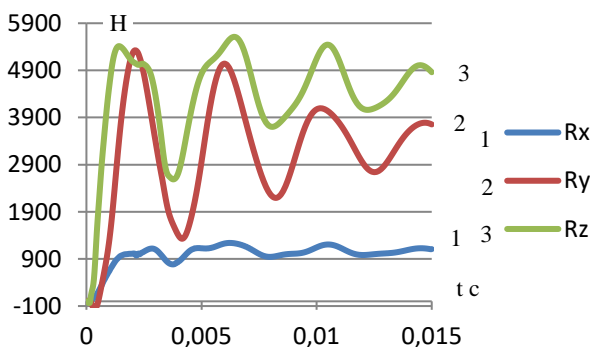


Рис. 11. Сили, що діють на опори вала

З рис. 11 випливає, що динамічні сили перевищують аналогічні статичні, що слід враховувати при виборі підшипників. На рис.12 показана радіальна сила, що діє на підшипник в динамічному режимі.

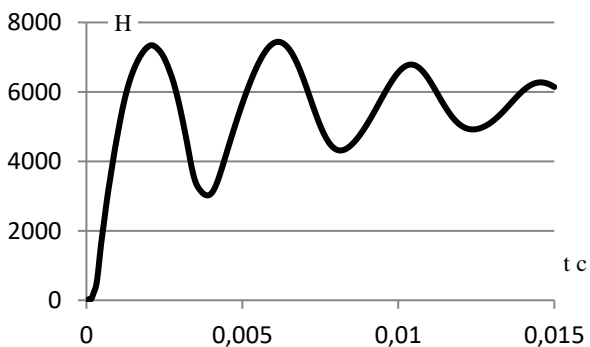


Рис. 12. Радіальна динамічна сила, що діє на підшипник

Тобто, сумарна динамічна радіальна сила в 1,3 рази більше статичної.

На рис.13 показана механічна напруга в валу по Мізесу, яка досягає максимальних значень  $2,28 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>.

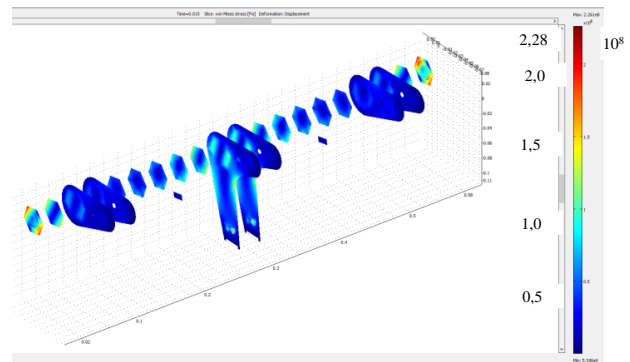


Рис.13. Розподіл механічних напруг по перерізу вала

**Висновки.** 1. Розроблено математичну модель розрахунку деформації вала вакуумного вимикача в статичному та динамічному режимах. 2. Проведено порівняльний розрахунок абсолютно жорсткого та реального вала. Показано, що за рахунок складної деформації провал контактів, кінцеві контактні натискання та реакції в опорах відрізняються від «ідеальних». 3. Основною відмінністю в розрахунках є поява в опорах осевої складової сили, яка істотно впливає на вибір підшипників за умовою еквівалентного статичного навантаження. 4. Перетин вала обрано таким, що розраховані деформації не суттєво впливають на силу кінцевого контактної натискання і, отже, на роботу вимикача. 5. Значні швидкості та механічні зусилля обумовлюють коливальний характер руху вала та тягових ізоляторів. 6. Радіальна динамічна реакція в опорі вала значно (в 1,3 рази) перевищує аналогічну статичну силу, що потрібно враховувати при виборі підшипників. 7. Розрахунки в програмному продукті COMSOL Multiphysics проводилися виходячи з припущення, що корпус вимикача у якому кріпляться опори вала такий, що не деформується. В іншому випадку провал контактів і контактне натискання будуть менше, ніж отримані в даному розрахунку, що і потребує подальшого дослідження.

#### Список літератури

1. <http://www05.abb.com/> Вакуумный выключатель VM1 с электромагнитным приводом.
2. [http://www.nbu.gov.ua/old\\_jrn/Natural/eic/2011\\_3/22.pdf](http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/Natural/eic/2011_3/22.pdf) / Модернізований вакуумний выключатель с электромагнитным актуатором.
3. Клименко Б.В. Электромагнитные приводы вакуумных выключателей средних напряжений / Б.В. Клименко, В.М. Бугайчук, А.М. Гречко. Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. – № 42. – С. 73 – 80.
4. Клименко Б.В. Опытный образец двухпозиционного электромагнитного привода вакуумного выключателя среднего напряжения / Клименко Б.В., Гречко А.М., Бугайчук В.М. Електротехніка і електромеханіка – 2005. – №2. – С. 23 – 28.
5. Клименко Б.В. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения/ Клименко Б.В., Гречко А.М., Бугайчук В.М., Вырвец С.В. Електротехніка і електромеханіка – 2006. – №4. – С. 22 – 26.
6. Клименко Б.В. Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего

- напряжения/ Клименко Б.В., Гречко А.М., Ерес'ко А.В. Електротехніка і електромеханіка – 2007. – №6. – С. 40 – 43.
7. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин /И.А. Биргер М.: Машиностроение, 1993. – 639с.
  8. Маслов Г.С. Расчеты колебаний валов: справочник / Г.С. Маслов – М.: Машиностроение, 1980. – 151с.
  9. Расчеты на прочность в машиностроении / Под ред. С.Д. Пономарёва – М.: Машгиз, 1959. Т. 3. – 1118с.
  10. Серенсен С.В. Валы и оси. Конструирование и расчет / М.Б. Громан, В.П. Кобаев, Р.М. Шнейдерович – М.: Машиностроение, 1970. – 320 с.
  11. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич М.:1. Мир, 1975. – 541 с.
  12. <https://studfile.net/preview/2114396/page:5/>
  13. Available at: [http://help.solidworks.com/2013/russian/solidworks/cworks/c\\_rayleigh\\_damping.htm](http://help.solidworks.com/2013/russian/solidworks/cworks/c_rayleigh_damping.htm) Spravka po SolidWorks (accessed 05 November 2016)

#### References (transliterated)

1. Available at: <http://www05.abb.com/> Vacuum Circuit Breaker VMI with electromagnetic actuator (accessed 03 October 2016).
2. [http://www.nbu.gov.ua/old\\_jrn/Natural/eie/2011\\_3/22.pdf/](http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/Natural/eie/2011_3/22.pdf/) Modernized vacuum pole breaker with magnetic actuator (accessed 09 November 2016).
3. B.V. Klimenko, V.M. Bugaichuk, A.M. Grechko. Electromagnetic actuators vacuum circuit breakers medium voltage - *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2004, no. 42, pp. 73 – 80. (Rus).
4. Klymenko B.V., Grechko A.M., Bugaichuk V.M. The prototype of a two-position electromagnetic actuator vacuum circuit breaker MV – *Electrical engineering & electromechanics*, 2005, no. 2, pp. 23 – 28. (Rus).
5. Klymenko B.V., Grechko A.M., Bugaichuk V.M., Vyrovets S.V. High-speed solenoid actuator with the displacement of the magnetic field to the medium voltage vacuum circuit breaker - *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no. 4, pp. 22 – 26. (Rus).
6. Klymenko B.V., Grechko A.M., Eres'ko A.V. The electromagnetic actuator with magnetic latch for a two-stage vacuum circuit breaker MV – *Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.6, pp. 40 – 43. (Rus).
7. Birger I.A. Raschet na prochnost' detalei mashin [Calculation of the strength of machine parts]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1993. – 639 p.
8. Maslov G.S. Raschety kolebanii valov: spravochnik [Calculations shaft vibrations: A Handbook] Moscow. Mashinostroenie Publ., 1980. – 151p. (Rus).
9. Raschety na prochnost' v mashinostroenii [Calculations of strength in mechanical engineering], Ed. S.D. Ponomarev. Moscow, Mashgiz Publ, 1959, V. 3. – 1118 p. (Rus).
10. Groman M.B., Kogaev V.P., Shneiderovich R.M. Valy i osi. Konstruirovaniye i raschet [Shafts and axis. Design and calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1970. – 320 p. (Rus).
11. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [The finite element method in the art] Moscow. Mir Publ, 1975. – 541 p. (Rus).
12. <https://studfile.net/preview/2114396/page:5/>
13. Available at: [http://help.solidworks.com/2013/russian/solidworks/cworks/c\\_rayleigh\\_damping.htm](http://help.solidworks.com/2013/russian/solidworks/cworks/c_rayleigh_damping.htm) Spravka po SolidWorks (accessed 05 November 2016)

Надійшла (received) 20.02.2023

#### Відомості про авторів / About the authors

**Байда Євген Іванович (Bajda Yevgen Ivanovych)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0297-328X>; e-mail: yevhen.baida@khpri.edu.ua.

**Пантелія Михайло Гаррійович (Panteliat Mykhailo Garrijovich)** – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1357-2134>; e-mail: m150462@yahoo.com.

**Кузьмін Артем Олексійович (Kuzmin Artem Oleksijovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: artyokuzmi@gmail.com.