

УДК 537.8:621.3.04:621.316

ВПЛИВ УРАХУВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ПРИВОДНОГО ВАЛУ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА

Є. І. Байда, д-р техн. наукbaida.kpi@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0297-328X

М. Г. Пантелят, канд. фіз.-мат. наукm150462@yahoo.com

ORCID: 0000-0002-1357-2134

А. О. Кузьмінartyokuzmi@gmail.comНаціональний технічний
університет «Харківський
політехнічний інститут»

61002, Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Одним з важливих напрямків теоретичних, розрахункових та експериментальних досліджень стосовно удосконалення й розробки нових елементів конструкції сучасних електричних апаратів, у першу чергу вимикачів і контакторів середніх напруг, є вивчення не лише електромагнітних, а й механічних процесів у зазначених електричних апаратах. Стаття присвячена створенню й використанню обчислювальних моделей для розрахунку механічних зусиль і деформацій абсолютно жорсткого й реального приводного валу вакуумного вимикача середньої напруги у статичному режимі з метою кількісного порівняння отриманих чисельних результатів. Розрахункові дослідження виконуються за допомогою методу скінчених елементів. У статті на підставі розроблених моделей проведено порівняльний аналіз розрахунку механічних напружень у приводному валу вакуумного вимикача у статичному режимі для абсолютно жорсткого й реального валу. Отримані результати комп'ютерного моделювання детально наведені у табличній та графічній формах, у тому числі представлено форму прогину вала вакуумного вимикача середньої напруги при максимальному ході актуатора електричного апарата, що досліджується. Продемонстровано, що механічна деформація валу викликає зменшення провалу контактів і сил контактного натискання, але при правильному обранню поперечною перетину ці значення не є критичними і мало впливають на роботу вимикача (близько 20% і 7% відповідно). Показано, що в результаті вигину валу в опорах з'являються додаткові осеві зусилля, які істотно впливають на вибір підшипників за еквівалентним статичним навантаженням.

Ключові слова: вакуумні вимикачі, напруження, деформація вала, чисельний аналіз, метод скінчених елементів.

Вступ

Одним із елементів конструкції вакуумних вимикачів середніх напруг з електромагнітними актуаторами є приводний, або як його ще називають, синхронізуючий, вал. Завдання валу – передача руху й зусиль від актуатора контактам вимикача. Лідером у виробництві таких вимикачів вважається концерн АВВ, який першим представив такий вимикач (VM1) у 1990 р. [1]. В Україні подібні вимикачі виготовляють компанії ЗАТ «Високовольтний союз» і «АВМ АМПЕР» [2]. Вимикачі з електромагнітними актуаторами прості за конструкцією, надійні й 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 і розробкою нових елементів конструкції вимикачів і контакторів середніх напруг [3–6]. Одним із напрямків зазначених робіт є дослідження механічних процесів у вакуумних вимикачах.

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

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

На рис. 1 можна помітити, що конструкція валу досить складна, а в результаті прикладання 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. Отже, головне питання полягає у кількісній оцінці зазначених відмінностей.

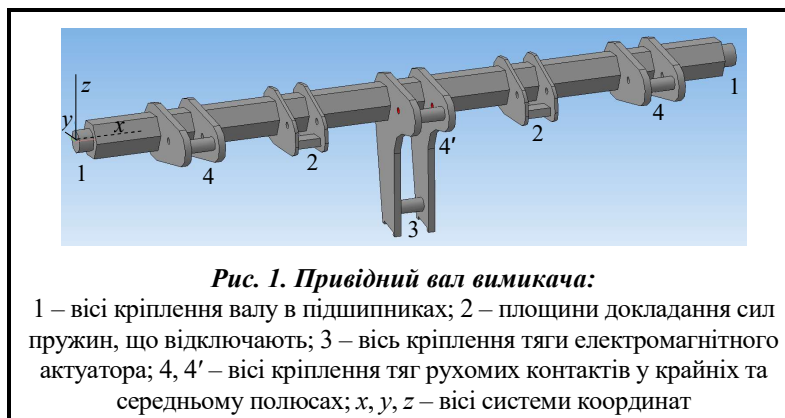


Рис. 1. Привідний вал вимикача:

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

Завдання і мета дослідження – створення й використання математичної та розрахункової моделей для чисельного дослідження механічних зусиль і деформацій абсолютно жорсткого й реального приводного валу вакуумного вимикача середньої напруги у статичному режимі задля кількісного порівняння отриманих чисельних результатів.

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 вказаної конструкції за відповідних умов кріплення (рис. 1) відсутні. Як показано в [11], розрахунки складних реальних конструкцій можуть бути проведені тільки числовими методами, тому всі уточнюючі розрахунки в даній роботі проводилися методом скінчених елементів із використанням програмного продукту COMSOL Multiphysics.

Спрощений розрахунок абсолютно жорсткого валу

На рис. 2 показана модель абсолютно жорсткого валу й сили, що діють на нього.

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

Вихідні дані: довжина сталевого валу – 574 мм; форма перерізу – шестигранна з діаметром вписаного кола 32 мм; співвідношення ходу вісі актуатора та осей тягових ізоляторів – 1,5; сумарна сила пружин, що відключають (діють на поверхні 2, рис. 1), – 1000 Н; сумарна сила початкового підтискання контактних пружин (прикладена до осей 4, 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 валі, вісі 4 на рис. 1) – 2,61 мм, жорсткість контактної пружини – 280 кН/м.

У цьому випадку результат буде наступний:

$$R_y = \frac{1}{2} \cdot \frac{3 \cdot F_c \cdot L_c + 2 \cdot F_p \cdot L_p}{L_q}; \quad R_z = \frac{3}{2} \cdot F_c + F_p; \quad R_x = 0;$$

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

$$F_c = F_0 + C_c \cdot w,$$

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 наступного вигляду:

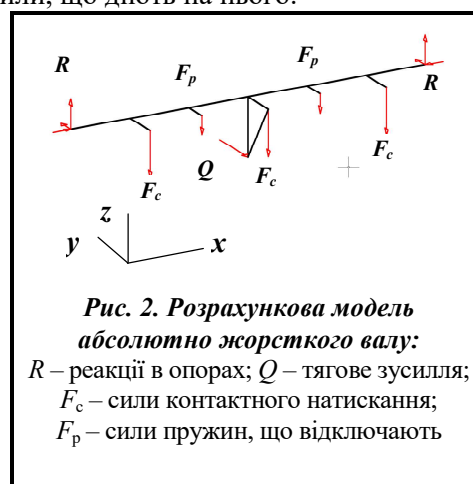


Рис. 2. Розрахункова модель абсолютно жорсткого валу:

R – реакції в опорах; Q – тягове зусилля; F_c – сили контактного натискання; F_p – сили пружин, що відключають

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

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, рис. 1); на осі 1 і торцях валу задані умови ковзання; на осі 3 – 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 й реального валів. Як випливає з рис. 3, отримані значення відрізняються. Відмінності в ході тяги контактів для абсолютно жорсткого й реального валу наведені у табл. 1.

Із табл. 1 випливає, що наявний прогин валу, який визначається прикладенням до нього навантаженням. Такий прогин зменшує значення прогину контактів порівняно з абсолютно жорстким валом на 0,56 мм, що приводить до деякого зменшення сили кінцевого контактного натискання.

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

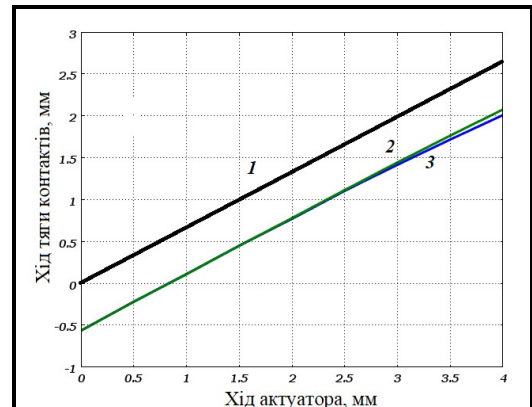


Рис. 3. Залежність ходу тяги контактів від ходу актуатора:

- 1 – для абсолютно жорсткого валу;
- 2, 3 – для реального валу (центральної та бічної тяги)

На рис. 4 показана 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 й реального валів.

У табл. 2 надані значення реакції для абсолютно жорсткого і реального валів у 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

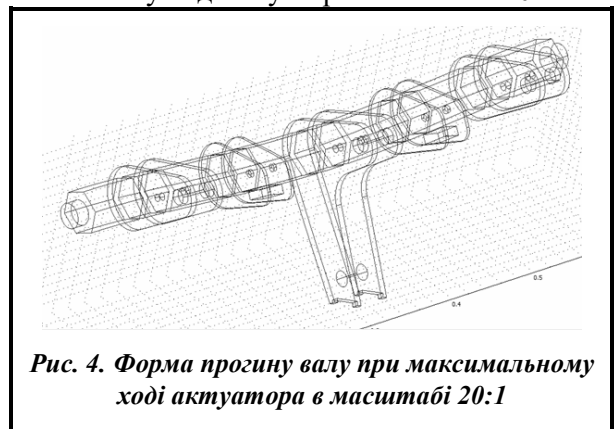


Рис. 4. Форма прогину валу при максимальному ході актуатора в масштабі 20:1

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

На рис. 7 показано зміну значення осьової сили залежно від ходу актуатора для абсолютно жорсткого й реального валу.

Значення осьової сили змінюється в діапазоні від $R_{x \min} = -335$ Н до $R_{x \max} = -1050$ Н.

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

$$P_o = F_r \cdot X_o + F_a \cdot Y_o,$$

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.

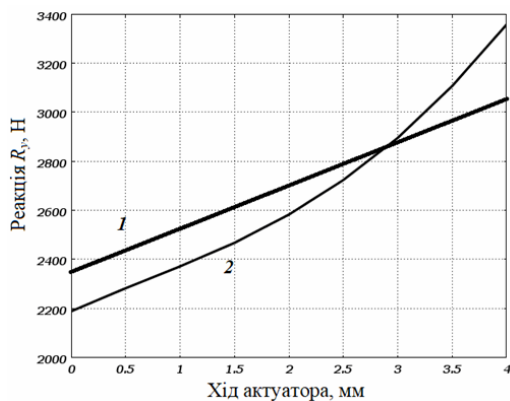


Рис. 5. Реакція R_y для валів:
1 – жорсткого; 2 – реального

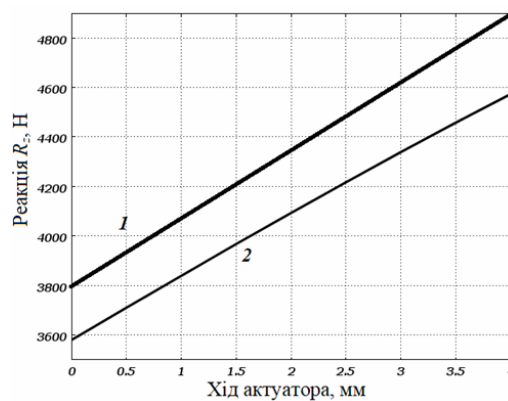


Рис. 6. Реакція R_z для валів:
1 – жорсткого; 2 – реального

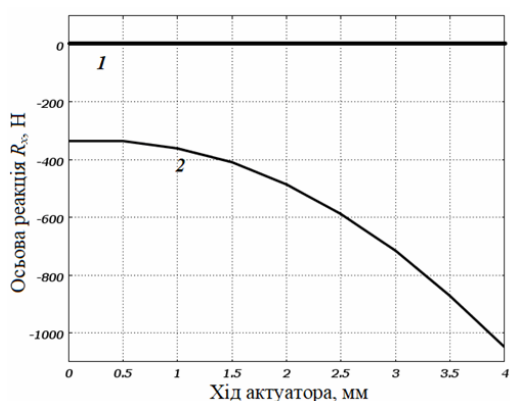


Рис. 7. Осьова реакція R_x у функції ходу актуатора:
1 – жорсткий вал; 2 – реальний вал

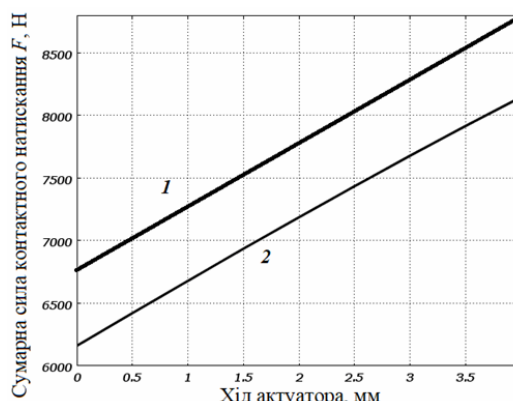


Рис. 8. Сумарна сила контактеного натискання:
1 – жорсткий вал; 2 – реальний вал

Порівняльні дані розрахунків наведені у табл. 3, з якої видно, 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.

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

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

Для реального валу сумарне контактне натискання становить величину ~93% від ідеального контактеного натискання й істотно не впливає на роботу контактів вимикача.

Таблиця 3. Значення еквівалентної статичної сили

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

Таблиця 4. Сумарне значення сил контактеного натискання

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

Висновки

1. Розроблено математичну модель розрахунку прогинів валу вакуумного вимикача.
2. Проведено порівняльний розрахунок абсолютно жорсткого й реального валів. Показано, що за рахунок складної деформації провал контактів, кінцеві контактні натискання й реакції в опорах відрізняються від «ідеальних».
3. Основною відмінністю в розрахунках є поява в опорах осьової складової сили, яка істотно впливає на вибір підшипників за умовою еквівалентного статичного навантаження.
4. Перетин валу обрано таким, що розраховані деформації не суттєво впливають на силу кінцевого контактного натискання і, отже, на роботу вимикача.
5. Розрахунки в програмному продукті COMSOL Multiphysics проводилися виходячи з припущення про корпус вимикача, що не деформується, у якому кріпляться опори валу. В іншому випадку провал контактів і контактне натискання будуть меншими за отримані в даному розрахунку.

Література

1. VM1. Medium voltage vacuum circuit breakers with magnetic drive 12...24 kV – 630...4000 A – 16...50 kA: Distribution solutions. ABB: official site. 2018. [https://library.e.abb.com/public/bf168419d98544ac873fcb9077e4f387/Cat_VM1\(EN\)M_1VCP000157.pdf](https://library.e.abb.com/public/bf168419d98544ac873fcb9077e4f387/Cat_VM1(EN)M_1VCP000157.pdf).
2. Високоякісне електрообладнання. АВМ АМПЕР: офіційний сайт. 2023. <https://abm-amper.com/>.
3. Клименко Б. В., Бугайчук В. М., Гречко А. М. Электромагнитные приводы вакуумных выключателей средних напряжений. *Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика.* 2004. № 42. С. 73–80.
4. Клименко Б. В., Гречко А. М., Бугайчук В. М. Опытный образец двухпозиционного электромагнитного привода вакуумного выключателя среднего напряжения. *Электротехника и электромеханика.* 2005. № 2. С. 23–28.
5. Клименко Б. В., Гречко А. М., Бугайчук В. М., Выровец С. В. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения. *Электротехника и электромеханика.* 2006. № 4. С. 22–26.
6. Клименко Б. В., Гречко А. М., Ересько А. В. Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения. *Электротехника и электромеханика.* 2007. № 6. С. 40–43.
7. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 639 с.
8. Маслов Г. С. Расчеты колебаний валов: справочник. М.: Машиностроение, 1980. 151 с.
9. Расчеты на прочность в машиностроении: в 3-х т. / Под ред. С. Д. Пономарёва. Т. 3: Инерционные нагрузки. Колебания и ударные нагрузки. Выносливость. Устойчивость. М.: Машгиз, 1959. 1118 с.
10. Серенсен С. В., Громан М. Б., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Валы и оси. Конструирование и расчет. М.: Машиностроение, 1970. 320 с.
11. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
12. Практический расчет (подбор) подшипников качения: лекции по предмету «Детали машин и основы конструирования». Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С. П. Королёва. 2015. <https://studfile.net/preview/2114396/page/5/>.

Надійшла до редакції 01.08.2023