

DETERMINING THE STRESSES ACTING ON MEDIUM VOLTAGE CAPACITOR BATTERIES

Zhivko Iliev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: jivko.iliev@mgu.bg

ABSTRACT. The article analyses the operational failures of medium voltage capacitor banks. The electrodynamic forces during a short circuit in the batteries are theoretically determined, based on experimental studies of transient processes during their switching. The tensile, bending, and torsional forces arising during the installation of the capacitor banks are theoretically determined.

Key words: capacitor batteries, stresses in threaded joints.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА УСИЛИЯТА, ДЕЙСТВАЩИ ВЪРХУ КОНДЕНЗАТОРНИ БАТЕРИИ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Живко Илиев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В статията е направен анализ на експлоатационните повреди на кондензаторни батерии за средно напрежение. Теоретично са определени електродинамичните сили при късо съединение в батериите, на базата на извършени експериментални изследвания на преходните процеси при комутирането им. Теоретично са определени възникващите усилия на опън, огъване и усукване при монтажа на кондензаторните батерии.

Ключови думи: кондензаторни батерии, напрежения в резбови съединения.

Въведение

Рудодобивните комплекси се характеризират с рязко променлив активен товар и ниска стойност на естествения фактор на мощността, което налага компенсирането му с кондензаторни батерии. До 2004 г. в ЦРП 110/6kV на голям открит рудник, съществуващата уредба е включвала две секции с мощност 750 kVA_r и 1650 kVA_r. С цел по-гъвкаво управление на компенсиращата мощност през 2004 г. кондензаторната уредба е разделена на три секции с мощности 450 kVA_r, 750 kVA_r и 1200 kVA_r. Първоначално комутирането на кондензаторните секции се е осъществявало с елегазови контактори “Rollarc-400D” в комбинация с токоограничаващи предпазители “Fusarc CF”. В последствие първичната комутация е подменена с вакуумни прекъсвачи.

Кондензаторните батерии са тип CUEFS-6,3/50, производство на ZEZ SILKO, Чехия. През 2025г. са доставени същите по тип и производител батерии за подмяна на дефектирали. След монтажа им при някои от новите батерии е забелязано счупване на тоководещите им шпилки (фиг. 1).



Фиг. 1. Тоководеща шпилка на кондензаторна батерия

Възможно е скъсването да се е случило по време на затягането. Hong et al. (2020) изследват поведението на резбови съединения и установяват, че след затягането, ако върху болта се приложи повтарящо се натоварване, връзката се разхлабва. Това обяснява факта, че по-късно е забелязано скъсване на шпилката.

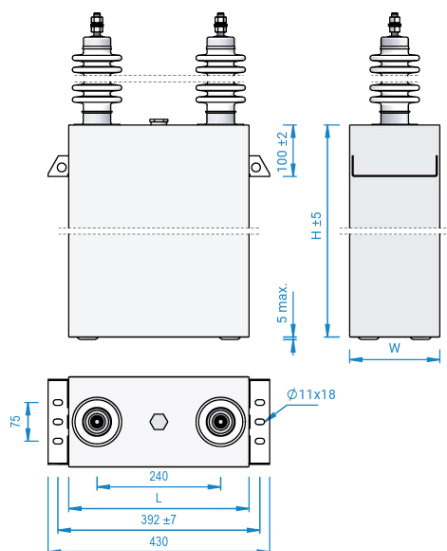
След подмяната им и включване към уредбата на средно напрежение на подстанцията, възниква късо съединение и разгаряне на дъгов пробив в един или повече кондензаторни елемента, което засяга и останалите елементи (фиг. 2).



Фиг. 2. Кондензаторен елемент след късо съединение в съседен елемент

Изпълнение на кондензаторната уредба

Кондензаторната уредба е обособена в три секции, изпълнени с кондензаторни елементи по 50kVA_r, свързани в триъгълник. За батерия 1200 kVA_r елементите са 24 бр., за 750 kVA_r – 15 бр. и за 450 – 9 бр. Габаритните и присъединителни им размери са дадени на фиг. 3. За 50kVA_r LxWxH (mm) са 350x145x180 mm.

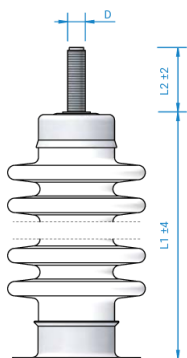


Фиг. 3. Габаритни и присъединителни размери на кондензаторен елемент

Свързването им в паралел се осъществява по два начина: чрез проводник АС-50, с кабелни обувки или с единични алуминиеви шини 40/4mm (фиг. 4). И в двата случая дължината на отделните връзки е около 35 cm, осигурявайки свобода при линейните разширения на металите. Монтажът на елементите е върху монтажна стойка чрез закрепващи болтове. Разстоянието между осите на елементите е 24 cm.



Фиг. 4. Монтаж на кондензаторните батерии

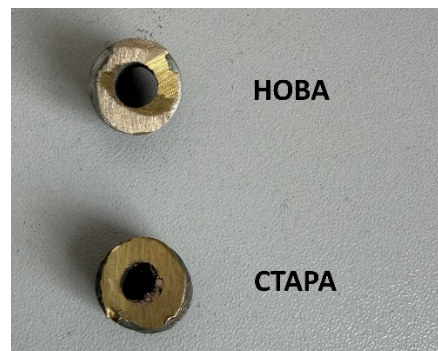


Фиг. 5. Габаритни размери на изолятора

На фиг. 5 е даден изоляторът на кондензатора с размери $L1=151\text{mm}$ $L2=45\text{mm}$ $D=M12$. Пътят на пропълзяване на разряд по изолятора, състоящ се от 4 пръстена, е 190 mm.

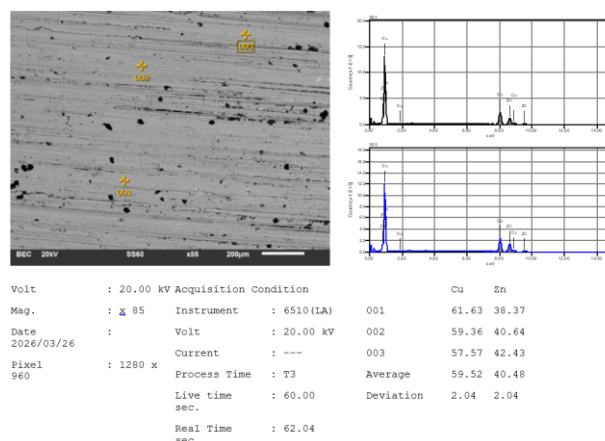
Анализ на възможни причини за дефектиране на съоръженията

Взети са проби на токоведещите шпилки от старите и новите батерии. Ясно се вижда разлика в цвета на двата материала (фиг. 6). И двете шпилки са направени от месинг M12, като вътрешният отвор на старата шпилка е 5,0 mm, а на новата е 5,5 mm.



Фиг. 6. Напречен разрез на токоведещите шпилки

Направен е рентгенографски анализ за съдържанието на използваната сплав. На фиг.7 е показан резултатът от анализа на шпилките от старите батерии.

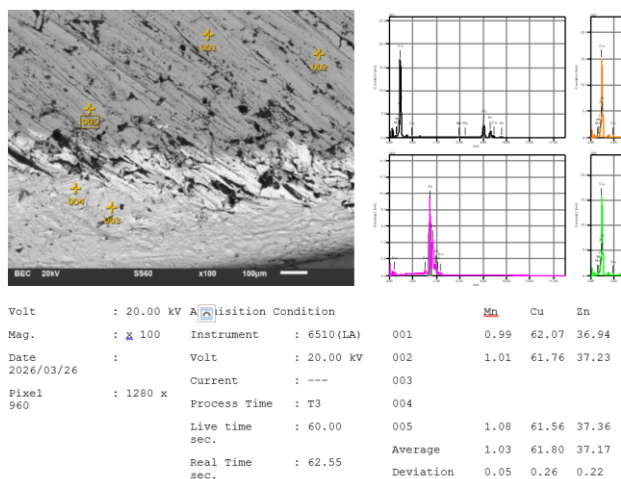


Фиг. 7. Рентгенографски анализ на химическия състав на шпилките на „старите“ батерии.

Съдържанието на този месинг е: мед (Cu) – 59,52% и цинк (Zn) – 40,48%. Това отговаря на сплав Л60, имаща твърдост по Бринел 155 - 165 МПа.

На фиг. 8 е даден резултатът от анализа на материала на шпилката от новите батерии. Сплавта е с повишено съдържание на мед (61,8%), по-ниско съдържание на цинк (37,17%) и е добавен манган (1,03%). Добавянето на легиращи елементи (Mn, Fe, Si) усъвършенстват зърнестата структура, което води до по-равномерна и механично устойчива микроструктура, значително повишаваща якостта на опън и твърдостта. От друга страна цинкът в месинга основно повишава здравината,

издръжливостта и пластичността на материала. При новия материал той е в по-малко количество, което обезсмисля добавянето на манган.

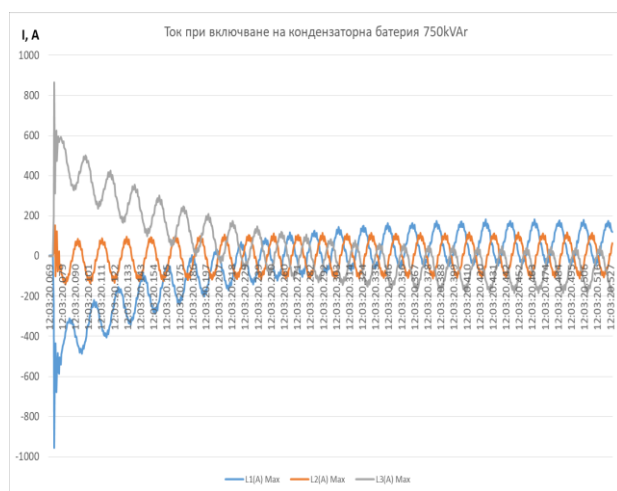


Фиг. 8. Рентгенографски анализ на химическия състав на шпилките на „старите“ батерии.

Причините за дефектиране на батериите могат да бъдат разгледани в два аспекта:

- динамични механични натоварвания вследствие ударния ток при включване на батериите или при възникване на късо съединение;
- механични натоварвания при монтажа.

Динамични механични натоварвания. Известни са проблемите с ударния ток при включване на кондензаторни батерии и те са предмет на множество изследвания. Големите стойности на ударния ток в съчетание с повисоката му честота (300÷1000Hz) водят до възникване на динамични натоварвания, насочени перпендикулярно на протичащия ток. На фиг. 9 е показан преходния процес при включване на кондензаторна батерия с мощност 750 kVAr. От гледна точка на динамичните натоварвания на тоководещите шини, интерес представлява ударния ток.



Фиг. 9. Преходен процес при включване на кондензаторна батерия с мощност 750 kVAr.

По време на аperiодичната, съставна опората на шпилката ще бъде натоварена с огъващи и усукващи трептения с честотата на захранващото напрежение. Tonkova & Pulev, (2021) са получили аналитични

зависимости за периодично променящите се еластични усукващи моменти, като са изследвани възможностите за намаляване на тяхната стойност чрез подходящ избор на параметрите на системата. Ударният ток при включване на батериите не превишава 1 kA и е многократно по-малък от свръхпреходния ток на късо съединение на сборната шина на кондензаторните батерии (12,087kA), получен от Стоилов и Джустров (2009). Това кореспондира и с подобни експериментални изследвания на Стоилов и др. (2006). Явно електродинамичните сили при късо съединение ще бъдат определящи при механичното напрежение в преходните електрически режими.

Максималната сила, действаща на огъване при късо съединение ще бъде:

$$F_{oe} = 1,76 \frac{i_y^2 l}{a} \cdot 10^{-7} = \quad (1)$$

$$= 1,76 \frac{12,087^2 \cdot 10^6 \cdot 0,24}{0,24} \cdot 10^{-7} = 25,7 N$$

Съпротивителният момент на шината в мястото на закрепване към шпилката на кондензаторния елемент ще бъде

$$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} = \frac{\pi(1,2^4 - 0,55^4)}{32 \cdot 1,2} = 0,354 cm^3 \quad (2)$$

Тогава напрежението върху шпилката ще бъде

$$\sigma_{oe} = 1,76 \frac{i_y^2 l^2}{aW} \cdot 10^{-8} = \quad (3)$$

$$= 1,76 \frac{12,087^2 \cdot 10^6 \cdot 0,24^2}{0,24 \cdot 0,354} \cdot 10^{-8} = 0,9 MPa < \sigma_{don}$$

Допустимото напрежение на срязване за месинг зависи от конкретната сплав и нейното състояние (накален, студено обработен), като е в порядъка на 40 - 100 MPa.

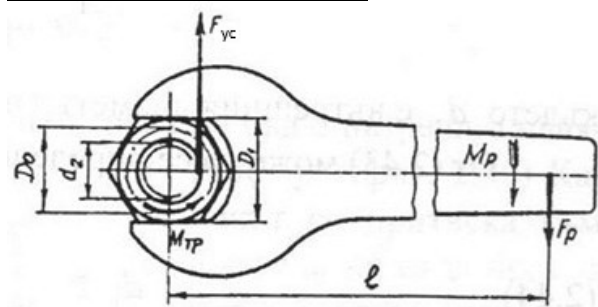
Механично натоварване при монтажа. Механичните натоварвания на присъединителните тоководещи шпилки ще бъдат едновременно от огъване и усукване. Методика за изчисляване на натоварването на гредата е дадена от Tonkova (2025).



Фиг. 10. Табела на кондензаторните елементи

Производителят на кондензаторните елементи е лимитирал момента на затягане на резбовите съединения. За тоководещите елементи с М12, максималният момент е 25 Nm, както за новите елементи, така и за старите (фиг. 10).

Момент на завиване на гайката



Фиг. 11. Момент за завиване на гайката

Необходимият момент за прилагане върху гайката за завиването ѝ и преодоляване на осовата сила F в резбата е:

$$M_{\text{завъртане}} = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\psi + \rho) \quad (4)$$

ψ, ρ – ъгъла на подъем на резбата и ъгъла на триене $\approx 10^\circ$

Моментът от силите на триене:

$$M_{\text{тр}} = \mu \cdot F \cdot \frac{D_0}{2} \quad (5)$$

- $\mu = 0,15$ – коефициент на триене

Момент на силата на работника

$$M_p = F_p \cdot l = F \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\psi + \rho) + \mu \cdot F \cdot \frac{D_0}{2} \quad (6)$$

където:

F_p – сила на работника;

l – рамо на ключа;

$D_0 = 1,2d = 1,2 \cdot 12 = 14,4 \text{ mm}$;

$d_2 = 0,9d = 10,8 \text{ mm}$

$d = 12 \text{ mm}$ – диаметър на резбата;

d_2 – среден диаметър на резбата;

След преобразувания на (6) и замествайки $M_p = 25 \text{ Nm}$, се получава силата на усукване $F_{\text{ус}}$

$$F_{\text{ус}} = \frac{M_p}{\frac{d_2}{2} \cdot \tan(\psi + \rho) + \mu \cdot \frac{D_0}{2}} = \frac{25}{\frac{10,8}{2} \cdot \tan(10^\circ) + 0,15 \cdot \frac{14,4}{2}} = 12313 \text{ N} \quad (7)$$

Напрежението на усукване $\tau_{\text{ус}}$ ще бъде:

$$\tau_{\text{ус}} = \frac{F \cdot d_2 \cdot \tan(\psi + \rho)}{2 \cdot \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{16 \cdot D}} = \frac{8 \cdot D \cdot F \cdot d_2 \cdot \tan(\psi + \rho)}{\pi \cdot (D^4 - d^4)} = \frac{8,012 \cdot 12313 \cdot 0,0055 \cdot \tan(10^\circ)}{\pi \cdot (0,012^4 - 0,0055^4)} = 31,1 \text{ MPa} \approx \tau_{\text{дон}} \quad (8)$$

където $\tau_{\text{дон}} = 30 \div 60 \text{ MPa}$ е допустимо напрежение на усукване за месинг.

От фиг. 11 и изчисленото напрежение на усукване $\tau_{\text{ус}}$ се вижда, че при въртящ момент $M_p \geq 25 \text{ Nm}$, има вероятност за скъсване на шпилката.

При $l = 0,2 \text{ m}$, което е типичната дължина на рамото на гаечен ключ, за силата на работника се получава:

$$F_p = \frac{M_p}{l} = \frac{25}{0,2} = 125 \text{ N} \approx 12,8 \text{ kg}$$

Такава сила лесно би могла да се получи с обикновен ключ и по-силен работник. Разпределение на натоварването между навивките на винта и гайката е неравномерно и тази неравномерност се дължи на грешката в стъпката на резбата на гайката и винта и на разнопосочната деформация на двата елемента – винтовото стебло е натоварено на опън, а тялото на гайката на натиск.

Persson et al. (2021) проучват динамиката на скоростта на затягане при използване на въртящ момент като метод за контрол. Според тези изследвания силата на затягане, получена в съединението, се променя при затягане с висока скорост или когато скоростта варира значително по време на затягане.

Nassar S. A., X. Yang (2007) дават връзката между въртящия момент и напреженията, различните компоненти на въртящия момент и стойностите на въртящия момент при скъсване в приложенията на резбови крепежни елементи. Взети са предвид триизмерните аспекти на ъглите на водещата спирала и профила на резбата, както и кинетичните и статичните коефициенти на триене.

Първата навивка (най-близката до опората) поема 32-33% от общия товар според Курушин и др. (2011; Николов и др., 2013), а пета и следващи навивки – по-малко от 10%. Следователно целият товар се поема само от първите 4-5 навивки, което е твърде неблагоприятно при пулсиращи натоварвания. Възможно е при завиването на гайката да се достигне до границата на провлачване на материала и при последващо температурно изменение да се получи скъсване на материала, без външна намеса.

Литература

- Курушин, М., Курушин, А., Барманов, И. (2011). Распределение усилий по виткам коэффициенты внешней переменной нагрузки в резьбовых соединениях в условиях вибрации изделий, Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, №3(27).
- Николов, Н., Цонев, В., Стойчев, Г., Лазов, Л., Василев, В. и Тодорова, Г. (2013), Съпротивление на материалите – ръководство за лабораторни упражнения. София,

- България: Авангард прима, 2013, ТУ–София, ISBN 978-619-160-181-3, гл. 1, раздел 1, стр. 1–32.
- Стоилов, Ив., Ташева, Д., Джустров, К. (2006). Изследване на преходните процеси при комутиране на кондензаторни батерии. Год. на МГУ „Св. Иван Рилски“, т. 49, св III, 149-153.
- Стоилов, Ив., Джустров, К. (2009). Оптимални настройки на релейните защиты в подстанциите на рудник „Елаците“. Proceedings of X Jubilee National Conference with International Participation of the Open and Underwater Mining of Minerals 07÷11 June, Varna.
- Hong H., Lee, H., Jeong, N., Baek, K., Suh, M. (2020). A study on an equivalent model of the threaded fasteners in complex structures through tightening and loosening analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34, 1195–1205.
- Nassar, S. A., Yang, X. (2007). Novel formulation of the tightening and breakaway torque components in threaded fasteners, *Journal of Pressure Vessel Technology* 129 (4), 147–160.
- Persson, E., Kumar, M., Friberg, C. & Dressler (2021). Clamp Force Accuracy in Threaded Fastener Joints Using Different Torque Control Tightening Strategies, *SAE Technical Paper*, <https://doi.org/10.4271/2021-01-5073>
- Tonkova, G. (2025). Experimental Determination of the Principal Stresses at a Point of a Beam Loaded Simultaneously in Bending and Torsion. XXVI International Conference “Engineering and Natural Sciences”, Proceedings of the Technical university of Sofia, ISSN: 2738-8549 (online), ISSN: 2738-8530 (print), Volume 76, Issue 1, Sozopol, DOI: 10.47978/TUS.2025.76.01.033
- Tonkova G., Pulev, S. (2021), Reducing the Elastic Torsional Moment of a Vibrating Shaft. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”*, ISSN: 2738-8808 (print), ISSN: 2738-8816 (online), Volume 64, Sofia, 165-167 p.