



MIS VA ALYUMINIYNING ELEKTROTEXNIKADAGI QIYOSIY TAHLILI

Qodirova Nigora Amanovna

Farg'ona ICHSHUI maxsus texnikum

Maxsus fan o'qituvchisi

Annotatsiya. Ushbu maqolada elektrotexnika sohasida keng qo'llaniladigan ikki asosiy o'tkazgich material - mis va alyuminiy - ning qiyosiy tahlili amalga oshirilgan. Maqolada ushbu metallarning fizikaviy, kimyoviy va elektr xususiyatlari, mexanik mustahkamligi, korroziyaga chidamliligi, issiqlik o'tkazuvchanligi, texnologik qayta ishlanishi va iqtisodiy ko'rsatkichlari keng yoritilgan. O'tkazuvchanlik, solishtirma elektr qarshiligi, zichlik, erish harorati kabi muhim texnik parametrlar jadval ko'rinishida taqqoslab berilgan. Shuningdek, mis va alyuminiyning kabel ishlab chiqarish, transformator o'ramlari, elektr tizimlar va zamonaviy energetika qurilmalarida qo'llanilish sohalari tahlil qilingan. O'zbekiston sanoatidagi amaliy tajriba va xalqaro standartlarga asoslanib, har bir materialning afzalliklari va cheklovlari aniq faktlar asosida ko'rsatilgan. Maqola natijalaridan texnikum va oliy o'quv yurtlari talabalari, muhandislar va loyihachi-mutaxassislar foydalanishi mumkin.

Kalit so'zlar: mis, alyuminiy, elektr o'tkazuvchanlik, solishtirma qarshilik, kabel, transformator, elektrotexnika, o'tkazgich materiallar, korroziya, mexanik mustahkamlik, energiya tejash, qiyosiy tahlil.

Аннотация. В данной статье представлен сравнительный анализ двух основных проводящих материалов, широко используемых в электротехнике, - меди и алюминия. В статье подробно рассмотрены физические, химические и электрические свойства, механическая прочность, коррозионная стойкость, теплопроводность, технологические процессы обработки и экономические



показатели этих металлов. В таблице сравниваются важные технические параметры, такие как проводимость, удельное электрическое сопротивление, плотность, температура плавления. Также проанализированы области применения меди и алюминия в производстве кабелей, обмоток трансформаторов, электрических систем и современных силовых приборов. На основе практического опыта узбекской промышленности и международных стандартов показаны преимущества и ограничения каждого материала на основе конкретных фактов. Результаты статьи могут быть полезны студентам технических училищ и вузов, инженерам и специалистам-конструкторам.

Ключевые слова: медь, алюминий, электропроводность, удельное сопротивление, кабель, трансформатор, электротехника, проводящие материалы, коррозия, механическая прочность, энергосбережение, сравнительный анализ

Abstract. This article presents a comparative analysis of two main conductive materials widely used in electrical engineering - copper and aluminum. The article extensively covers the physical, chemical and electrical properties, mechanical strength, corrosion resistance, thermal conductivity, technological processing and economic indicators of these metals. Important technical parameters such as conductivity, specific electrical resistance, density, melting point are compared in a table. The areas of application of copper and aluminum in cable production, transformer windings, electrical systems and modern power devices are also analyzed. Based on practical experience in the Uzbek industry and international standards, the advantages and limitations of each material are shown on the basis of concrete facts. The results of the article can be used by students of technical schools and universities, engineers and design specialists.



Keywords: copper, aluminum, electrical conductivity, resistivity, cable, transformer, electrical engineering, conductive materials, corrosion, mechanical strength, energy saving, comparative analysis.

Kirish

Zamonaviy elektrotexnika va energetika sohasida o'tkazgich materiallarni to'g'ri tanlash muhandislik amaliyotining eng muhim masalalaridan birini tashkil etadi. Elektr energiyasini uzatish va taqsimlash tizimlari, kabel tarmoqlari, transformatorlar, elektr mashinalari va ko'plab boshqa qurilmalar ishini samarali ta'minlash ko'p jihatdan ishlatiladigan o'tkazgich materialning xususiyatlariga bevosita bog'liq. Bugungi kunda mis va alyuminiy ushbu sohadagi ikki yetakchi material sifatida tan olingan bo'lib, ularning har biri o'ziga xos texnik va iqtisodiy afzalliklariga ega.

Mis (Cu) elektrotexnikada qo'llaniladigan eng qadimgi va eng ishonchli metallardan biri hisoblanadi. Uning yuqori elektr o'tkazuvchanligi, mexanik mustahkamligi va texnologik qayta ishlanuvchanligi tufayli mis asrlar davomida elektrotexnikaning asosiy o'tkazgich materiali bo'lib kelgan. XX asrning o'rtalaridan boshlab esa alyuminiy (Al) misning muqobil raqibi sifatida keng tarqala boshladi. Xususan, havoli elektr uzatish liniyalari, kabellar va ba'zi transformator o'ramlarida alyuminiy muvaffaqiyatli qo'llanilmoqda. Buning asosiy sabablari - alyuminiyning arzon narxi, past zichligi (ya'ni engilligi) va O'zbekiston kabi mamlakatlar uchun nisbatan qulay ta'minot imkoniyatlaridir.

Biroq ikkala materialning ham o'ziga xos kamchiliklari mavjud. Mis qimmat va og'ir bo'lsa, alyuminiy mexanik jihatdan nisbatan mo'rt, oksidlanishga moyil va mis bilan kontaktda galvanik korroziyaga duchor bo'ladi. Shu bois muhandislar har bir loyihada qaysi materialdan foydalanish maqsadga muvofiq ekanligini aniq texnik-iqtisodiy tahlil asosida hal etishi zarur.



Ushbu maqolaning maqsadi mis va alyuminiyning elektrotexnikadagi asosiy xususiyatlarini qiyosiy jihatdan tahlil qilish, ularning afzalliklari va kamchiliklarini aniq faktlar asosida ko'rsatish hamda turli qo'llanish sohalaridagi afzalliklarni belgilashdan iborat. Maqola O'zbekistondagi texnikum va oliy o'quv yurtlari talabalari, muhandislari va loyihachi-mutaxassislari uchun amaliy qo'llanma sifatida xizmat qilishi ko'zda tutilgan.

MIS VA ALYUMINIYNING ASOSIY FIZIK-KIMYOVIY XUSUSIYATLARI

Elektr o'tkazuvchanligi va solishtirma qarshilik

Elektrotexnikada material tanlashdagi eng muhim mezon - uning elektr o'tkazuvchanligi (σ) va solishtirma elektr qarshiligi (ρ) ko'rsatkichlaridir. Mis o'tkazuvchanligi bo'yicha kumushdan keyingi o'rinda turadi va uning solishtirma elektr qarshiligi 20 °C haroratda 0,0172 Ohm·mm²/m ni tashkil etadi. Alyuminiy esa mis bilan solishtirganda qarshiligi taxminan 1,64 marta yuqori bo'lib, uning solishtirma qarshiligi 0,0283 Ohm·mm²/m ga teng.

Bu farq amaliyotda shunday namoyon bo'ladi: bir xil elektr o'tkazuvchanlikni ta'minlash uchun alyuminiy o'tkazgichning kesimi mis o'tkazgichnikidan taxminan 1,6–1,7 marta katta bo'lishi kerak. Masalan, 10 mm² kesimli mis kabelga teng o'tkazuvchanlikni ta'minlash uchun 16 mm² kesimli alyuminiy kabel ishlatiladi. Shunga qaramasdan, alyuminiyning past zichligi tufayli alyuminiy o'tkazgich mis o'tkazgichdan ikki barobarga yengil bo'lib qoladi.

Harorat koeffitsienti jihatidan ham ikkala metal orasida farq mavjud: misda bu ko'rsatkich 0,00393 °C⁻¹, alyuminiyda esa 0,00403 °C⁻¹ ni tashkil etadi. Amaliy jihatdan bu shuni anglatadiki, harorat ko'tarilgan sari ikkala materialda ham qarshilik ortadi, lekin bu o'zgarish deyarli bir xil darajada kechadi.

Mexanik xususiyatlar

Mis mexanik mustahkamligi bo'yicha alyuminiydan sezilarli darajada ustun turadi. Misning tortishga chidamlilik chegarasi (σ_{chek}) 200–250 MPa, qattiqligi



esa Brinell shkalasi bo'yicha 35–45 HB ni tashkil etadi. Yumshoq (tavlantirilgan) mis uchun cho'zilish ko'rsatkichi 40–50% ga yetadi, bu esa uning yuqori plastikligini ko'rsatadi. Shu sabab mis nozik simlar va murakkab shakllarni egish, o'rama va payvandlash ishlarida alohida qulay hisoblanadi.

Alyuminiyning tortishga chidamlilik chegarasi 60–90 MPa (toza holda) bo'lib, bu misnikidan ancha past. Biroq maxsus qotishmalar (masalan, Al–Mg–Si seriyasi - 6xxx turkumi) ishlatilganda bu ko'rsatkich 200–320 MPa gacha ko'tariladi. Alyuminiy sof holda ancha yumshoq va mo'rt bo'lganligidan, havoli uzatish liniyalarida qo'llaniladigan alyuminiy simlari odatda po'lat yadro bilan mustahkamlanadi (ACSR - Aluminium Conductor Steel Reinforced texnologiyasi).

Zichlik va og'irlik

Alyuminiyning eng muhim ustunliklaridan biri uning past zichligi - atigi 2,7 g/sm³ - hisoblanadi. Mis zichligi esa 8,9 g/sm³ ni tashkil etadi, ya'ni mis alyuminiydan 3,3 marta og'irroqdir. Bu xususiyat ayniqsa havoli uzatish liniyalari va uzoq masofali kabellar uchun katta ahamiyatga ega: yengil alyuminiy o'tkazgichlar simyog'och va ustunlarga kamroq yuklama beradi, bu esa qurilish xarajatlarini sezilarli kamaytiradi. Shuningdek, havion va avtomobil sanoatida kabel tizimlarining og'irligini kamaytirish uchun alyuminiy tobora ko'proq qo'llanilmoqda.

Issiqlik o'tkazuvchanligi va erish harorati

Mis issiqlik o'tkazuvchanligi ($\lambda = 401 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) bo'yicha ham ustunlik qiladi. Alyuminiyning issiqlik o'tkazuvchanligi esa 237 W/(m·K) ni tashkil etadi. Bu xususiyat ayniqsa intensiv issiqliq ajraladigan elektr qurilmalarida - elektr motorlar, generatorlar va quvvat transformatorlarida - muhim ahamiyat kasb etadi. Yaxshiroq issiqlik o'tkazuvchanligi misning haddan tashqari qizishdan saqlashga yordam beradi.



Erish harorati jihatidan mis (1083°C) alyuminiydan (660°C) ancha yuqoriroqda eriydi. Bu xususiyat yuqori harorat sharoitlarida ishlaydigan qurilmalar va payvandlash texnologiyalari nuqtai nazaridan muhimdir. Alyuminiyning past erish harorati uni quyish va ekstruziya orqali qayta ishlashni osonlashtiradi, lekin favqulodda sharoitlarda (masalan, qisqa tutashuv yoki yong'in) xavfni oshiradi.

ASOSIY TEXNIK KO'RSATKICHLAR QIYOSIY JADVALI

Jadval 1. Mis va alyuminiyning elektrotexnikadagi asosiy xususiyatlari

Ko'rsatkich	Mis (Cu)	Alyuminiy (Al)
Solishtirma qarshilik (20°C), $\text{Ohm}\cdot\text{mm}^2/\text{m}$	0,0172	0,0283
Elektr o'tkazuvchanlik, MS/m	58,0	35,4
Zichlik, g/sm^3	8,9	2,7
Tortishga chidamlilik, MPa	200–250	60–90 (toza)
Erish harorati, $^{\circ}\text{C}$	1083	660
Issiqlik o'tkazuvchanligi, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	401	237
Issiqlik kengayish koeff., $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	17,0	23,8



Harorat koeff. (qarshilik), $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,00393	0,00403
Nisbiy narx (taxminiy)	Yuqori	Past (2–3 marta arzon)
Korroziyaga chidamlilik	Yuqori	O‘rtacha (oksid qatlami)

Jadvaldan ko‘rinib turibdiki, mis deyarli barcha texnik ko‘rsatkichlar bo‘yicha ustunlik qiladi. Biroq alyuminiyning iqtisodiy afzalligi va past zichligi muayyan qo‘llanish sohalarida uning mis ustidan g‘alaba qozonishiga imkon beradi.

KORROZIYAGA CHIDAMLILIK VA OKSIDLANISH XUSUSIYATLARI

Korroziya muammosi mis va alyuminiy o‘tkazgichlarning uzoq muddatli ishonchliligini ta‘minlashda hal qiluvchi omil hisoblanadi. Mis nisbatan inert metall bo‘lib, oddiy sharoitlarda oksidlanishga kamroq moyil. Uning sirtida hosil bo‘ladigan mis oksidi (CuO va Cu_2O) qatlami nazariy jihatdan passivirovka vazifasini o‘taydi, biroq bu qatlam issiqlik o‘tkazuvchanligini va kontakt sifatini yomonlashtiradi. Ayniqsa namli va kimyoviy agressiv muhitlarda mis yuzasi yashil patina (asosan misning karbonat tuzlari) hosil qiladi.

Alyuminiy havo bilan tezda reaksiyaga kirishib, yuzasida ingichka amorf alyuminiy oksidi (Al_2O_3) qatlami hosil qiladi. Bu qatlam qalinligi atigi 4–10 nanometr bo‘lishiga qaramay, metalning keyingi oksidlanishini samarali to‘xtatadi. Shu boisdan alyuminiy nam, sovuq va o‘ta issiq muhitlarda mis bilan deyarli bir xil darajada uzoq ishlashi mumkin. Biroq oksid qatlami elektr o‘tkazuvchanlikni keskin kamaytiradi: ulanish joylarida oksid qatlami mavjud bo‘lsa, kontakt qarshiligi keskin oshadi va lokal qizish yuzaga keladi. Shuning uchun alyuminiy



o'tkazgichlarni mis bilan ulashda maxsus (bimetallik) terminallar, pastasimon oksidga qarshi himoyalash vositalari yoki qalay bilan qoplash usullari qo'llaniladi.

Galvanik juft muammosi ham alohida e'tiborga loyiq. Mis va alyuminiy to'g'ridan-to'g'ri elektr kontaktiga keltirilganda, namlik ishtirokida galvanik element hosil bo'ladi va anod bo'lgan alyuminiy jadal eriy boshlaydi. Bu holat amaliyotda jiddiy avariyalarga olib kelgan. B.Qodirov ta'kidlashicha, O'zbekistonning ko'plab eski turar-joy binolarida mis va alyuminiy simlari to'g'ridan-to'g'ri ulanib qolgan bo'lib, bu xavfli kontakt hosil qilgan va elektr tizimlarini ta'mirlashda alohida muammo bo'lib qolmoqda. [A1;38 b]

ELEKTROTEXNIKADAGI QO'LLANISH SOHALARI

Kabel va sim ishlab chiqarish

Kabel sanoatida mis va alyuminiy bir-birini to'ldiruvchi rollarni o'ynaydi. Binolar ichidagi elektr tarmoqlari, kompyuter tizimlarini ulash kabellari, avtomobil elektr sxemalari va nozik elektronika mahsulotlarida mis ustuvorlik qiladi. Bu sohalarda misning yuqori o'tkazuvchanligi, mexanik mustahkamligi va nisbatan kichik o'lchamlarda ishlash imkoni hal qiluvchi ahamiyatga ega.

Havoli uzatish liniyalari (110 kV va undan yuqori kuchlanishli) uchun esa alyuminiy kabellar qo'llaniladi. Dunyodagi umumiy havoli uzatish liniyalarining 90% dan ortig'i alyuminiy o'tkazgichlardan iborat. O'zbekiston energetika tizimida ham, xususan, O'zbekenergo va mintaqaviy elektr tarmoqlarida ACSR tipidagi alyuminiy-po'lat o'tkazgichlar keng qo'llaniladi. [A2;12 b] Yer osti va suv osti kabellari uchun esa odatda mis afzal ko'riladi, chunki bu sharoitlarda o'lcham va og'irlik cheklovi kam bo'lib, ishonchlilik birinchi o'ringa chiqadi.

Transformatorlar va elektr mashinalari

Quvvat transformatorlarining o'ramlari tarixan mis simdan tayyorlangan. Misning yuqori o'tkazuvchanligi tufayli bir xil quvvatli transformator mis o'ram ishlatganda alyuminiy o'ramga nisbatan ancha ixcham bo'ladi. Biroq so'nggi o'n



yilliklarda iqtisodiy omillar va alyuminiy o‘ramli transformatorlar texnologiyasining rivojlanishi natijasida alyuminiy o‘ramlari ham keng qo‘llanila boshladi.

Sh.Nazarov ta'kidlashicha, bugungi kunda O‘zbekistondagi past kuchlanishli (6–10/0,4 kV) tarmoq transformatorlarining katta qismi alyuminiy o‘ramlarga ega. Bunday transformatorlar dastlabki narxi jihatidan arzonroq, lekin ular biroz katta gabaritga ega va texnik xizmat ko‘rsatishda, ayniqsa o‘ram buzilganda, almashtirish murakkabroq. Yuqori kuchlanishli katta quvvatli transformatorlar (110 kV va undan yuqori) esa hali ham asosan mis o‘ramlarda ishlab chiqariladi. [A3;44 b]

Elektr motorlari va generatorlar

Elektr motorlari va generatorlarning stator va rotor o‘ramlari uchun mis asosiy material hisoblanadi. Yuqori quvvatli va yuqori samaradorlikli motorlarda misning ustunligi alohida yaqqol ko‘rinadi: bir xil o‘lchamdagi mis o‘ramli motor alyuminiy o‘ramliga nisbatan yuqoriroq samaradorlikka ega, chunki mis o‘tkazgichlarda kamroq issiqlik yo‘qotiladi. So‘nggi yillarda esa quyma alyuminiy rotor (die-cast aluminium rotor) texnologiyasi ham keng tarqalgan bo‘lib, bu texnologiya arzonroq ishlab chiqarishni ta'minlaydi.

J.Ismoilov Farg‘ona vodiysi sanoat korxonalarida ishlatiladigan elektr motorlar bo‘yicha o‘tkazgan tadqiqotlari shuni ko‘rsatdiki, alyuminiy quyma rotorli motorlar umumiy istismoirdagi motorlar parkining 60% dan ortig‘ini tashkil etadi va ularning o‘rtacha samaradorligi mis o‘ramlilarga nisbatan 1,5–2% pastroq, ammo ta'mirlash xarajatlari ham sezilarli darajada kamroq. [A4;67 b]

IQTISODIY TAHLIL VA MATERIAL TANLASH MEZONLARI

Mis va alyuminiy o‘rtasidagi eng keskin farqlardan biri ularning narxidir. Xalqaro bozorlarda misning narxi alyuminiynikidan o‘rtacha 3–4 marta yuqori turadi. 2023–2024 yil ma'lumotlariga ko‘ra, London metal birjasida misning narxi taxminan 8000–9000 AQSh dollari/tonna, alyuminiyniki esa 2200–2500 AQSh



dollari/tonna atrofida bo'lgan (London Metal Exchange, 2024). Bu narx farqi yirik infratuzilma loyihalari uchun katta iqtisodiy ahamiyatga ega.

Kuchlanish uzatish liniyalarida mis o'rniga alyuminiy ishlatish bo'yicha texnik-iqtisodiy tahlil shuni ko'rsatadiki, alyuminiy simning kesimini 1,6 marta oshirish zarur bo'lsa-da, umumiy xarajat baribir misga nisbatan 40–55% ga past bo'ladi. Shu boisdan energetika tarmoqlarida alyuminiy ustunlik qiladi. Biroq binolar ichki elektr montaji, kompakt qurilmalar va yuqori ishonchlik talab qiladigan sohalarda uchun mis afzalroq bo'ladi, chunki bu sohalarda hajm va og'irlik tejalgan puldan muhimroq bo'ladi.

A.Yusupov o'z tadqiqotida O'zbekistondagi qurilish loyihalarini tahlil qilib, mis o'rniga alyuminiy kabellar ishlatish orqali yirik turar-joy majmualarini elektr ta'minoti tizimida 30–45% mablag' tejash mumkinligini ko'rsatgan. Biroq u bir vaqtning o'zida alyuminiy kabellarning montaj ishlarida qo'shimcha choralar (oksidga qarshi pasta, maxsus klemma terminallar, sertifikatlashtirish) talab qilishini ham ta'kidlagan. [A5;102 b]

Xullas, material tanlashda quyidagi mezonlar birgalikda baholanishi lozim: loyihaaning quvvati va kuchlanishi, atrof-muhit sharoiti, montaj va texnik xizmat xarajatlari, o'tkazgichning rejalashtirilgan ishlash muddati hamda mavjud normativ hujjatlar talablari.

XULOSA

Ushbu maqolada mis va alyuminiyning elektrotexnikadagi qiyosiy tahlili amalga oshirildi. Tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, mis elektr o'tkazuvchanligi, mexanik mustahkamligi, issiqlik o'tkazuvchanligi va korroziyaga chidamliligi bo'yicha aniq ustunliklarni namoyon etadi. Biroq alyuminiy o'zining past narxi, engilligi va O'zbekistonda nisbiy mavjudligi tufayli elektroenergetika infratuzilmasida keng qo'llanilmoqda.



Amaliy xulosalar quyidagicha: birinchidan, binolar ichki elektr montaji, kompakt qurilmalar va yuqori ishonchlilik talab qiladigan sohalarda misdan foydalanish maqsadga muvofiq; ikkinchidan, havoli uzatish liniyalari, o'rta va past kuchlanishli taqsimlash tarmoqlari hamda katta gabaritli transformatorlarda iqtisodiy va texnik nuqtai nazardan alyuminiy afzalroq; uchinchidan, mis va alyuminiy bir-biri bilan bevosita ulamaslik, maxsus bimetallik ulagichlar va himoya vositalaridan foydalanish zarur.

O'zbekiston elektrotexnika sanoatining rivojlanishi va energiya tejash dasturlari nuqtai nazaridan ikkala materialning texnik imkoniyatlarini to'liq o'rganish va amalda samarali qo'llash muhim strategik ahamiyat kasb etadi. Kelajakda yangi qotishma materiallar, nanostrukturaviy o'tkazgichlar va kompozit materiallar sohasida olib borilayotgan tadqiqotlar ushbu sohani yanada rivojlantirishga xizmat qilishi kutilmoqda.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Qodirov, B. (2020). O'zbekiston turar-joy binolaridagi elektr tarmoqlarini modernizatsiya qilish muammolari: Mis va alyuminiy simlari muammosi. *Energetika va texnologiya*, 4(2), 38–51.
2. Hasanov, M. (2021). O'zbekistonda havoli elektr uzatish liniyalarida alyuminiy o'tkazgichlardan foydalanish samaradorligi. *O'zbekiston energetikasi jurnali*, 6(3), 12–27.
3. Nazarov, Sh. (2022). O'zbekistonda alyuminiy o'ramlari bilan past kuchlanishli transformatorlardan foydalanish tajribasi. *Elektrotexnika va avtomatika*, 5(1), 44–58.
4. Ismoilov, J. (2019). Farg'ona vodiysi sanoat korxonalaridagi elektr motorlarning texnik tahlili: O'ram materiallari va samaradorlik munosabati. *Farg'ona politexnika instituti ilmiy axborotnomasi*, 3(4), 67–80.



5. Yusupov, A. (2023). Qurilish loyihalarida kabel tizimlarini tanlashda texnik-iqtisodiy tahlil: Mis va alyuminiy kabellari qiyosi. Qurilish va arxitektura, 8(2), 102–115.
6. Toshmatov, R. (2021). Elektrotexnika materiallarshunosligining asoslari. Toshkent: O‘zbekiston davlat texnika universiteti nashriyoti.
7. Mirzayev, K. va Saidov, I. (2020). O‘tkazgich va izolyator materiallar: Nazariya va amaliyot. Toshkent: Fan nashriyoti.
8. Rahimov, O. (2018). Zamonaviy kabel sanoatida material tanlash mezonlari. O‘zbekiston sanoati, 2(1), 29–42.
9. Chapman, S. J. (2011). Electric Machinery Fundamentals (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
10. Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2017). Power Systems Analysis and Design (6th ed.). Stamford, CT: Cengage Learning.
11. London Metal Exchange. (2024). LME Copper and Aluminium Price Data 2023–2024. London: LME Group. <https://www.lme.com>
12. Pansini, A. J. (2012). Electrical Distribution Engineering (3rd ed.). Lilburn, GA: The Fairmont Press.