

IV-KONEIDEN SAMANAIKAISTEN SULATUSJAKSOJEN LASKENTA BINOMIJAKAUMALLA

Tiivistelmä

Ilmanvaihtokoneiden sulatusjaksojen aikana käytetty lämmitysteho on tyypillisesti moninkertainen koneen normaalikäytön tehoon verrattuna, minkä vuoksi rakennuksen sähköliittymän mitoitus perustuu helposti oletukseen, että kaikki koneet sulattavat samanaikaisesti. Tämä ohje kuvaa tilastollisen menetelmän — binomijakauman — jolla lasketaan, kuinka monta konetta on valitulla varmuustasolla korkeintaan samanaikaisesti huipputeholla, ja miten tästä johdetaan sähköliittymän todellista käyttöä vastaava mitoitus-teho. Menetelmä soveltuu yleisesti useiden samanlaisten, jaksottaisesti toimivien sähkökuormien — esimerkiksi ilmanvaihtokoneiden sulatusten tai lämpöpumppujen kompressorijaksojen — samanaikaisuuden arviointiin. Ohje on tarkoitettu sähkö- ja LVI-suunnittelijoille, jotka mitoittavat rakennuksen sähköliittymää tai pääsulakkeita ryhmälle samanlaisia, jaksottaisesti toimivia kuormia.

1. Ongelman kehystys

Ilmanvaihtokoneiden sähkösuunnittelussa tulee usein vastaan kysymys: kuinka paljon koneiden lämmitysvastukset todella kuormittavat rakennuksen sähköjärjestelmää? Osa markkinoilla olevista ilmanvaihtokoneista käyttää pienempää lämmitysvastusta kuin toiset, jolloin laitteen ilmoitettu maksimiteho näyttää pieneltä. Tämä voi vaikuttaa houkuttelevalta myös sähkösuunnittelun näkökulmasta, koska pienempi maksimiteho näyttää johtavan pienempään sähköliittymään ja pienempiin sulakkeisiin.

Laitteen maksimiteho ei kuitenkaan kerro koko totuutta: yksittäisen koneen maksimiteho ja rakennuksen todellinen, samanaikainen sähkökuorma eivät välttämättä ole sama asia.

Miksi ilmanvaihtokoneessa tarvitaan lämmitystehoa

Lämmitysvastuksen tehtävänä on nostaa ilman lämpötilaa. Kyseessä on puhdas fyysikaalinen ilmiö, eikä sitä voida muuttaa ohjelmistolla tai ohjauslogiikalla. Ilman lämpötilan muutos (ΔT) voidaan laskea kaavalla:

$$\Delta T = P / (q \times \rho \times c_p)$$

missä:

- P = lämmitysteho (kW)
- q = ilmavirta (m³/s)
- ρ = ilman tiheys (1,2 kg/m³)
- c_p = ilman ominaislämpökapasiteetti (1,01 kJ/kgK)

Jos esimerkiksi ilmavirta on 50 l/s ja lämmitysvastuksen teho 900 W, saadaan ilman lämpötilan nousuksi noin 15 °C. Jos ulkoilman lämpötila on -20 °C ja lämmöntalteenotto-kenno on sulatuksen aikana ohitettuna, tuloilman lämpötila on noin -20 °C + 15 °C = -5 °C.

Useimmissa tilanteissa näin kylmää ilmaa ei voida johtaa asuntoon. Käytännössä vaihtoehdot ovat lämmitystehon lisääminen, ilmavirran pienentäminen, tai näiden yhdistelmä. Tästä syystä osa valmistajista käyttää suurempaa lämmitystehoa kuin toiset.

Sulakemitoituksen paradoksi

Suurempi lämmitysteho herättää kuitenkin uuden kysymyksen. Jos kerrostalossa on esimerkiksi 58 asuntoa ja jokaisen ilmanvaihdon maksimiteho sulatuksessa on 2,0 kW, voidaan helposti tehdä seuraava laskelma:

$$58 \times 2,0 \text{ kW} = 116,0 \text{ kW}$$

Tämän perusteella voisi näyttää siltä, että rakennuksen sähköjärjestelmä täytyy mitoittaa yli sadan kilowatin kuormalle IV-koneiden osalta. Mutta tapahtuuko tällainen tilanne koskaan käytännössä? Teoriassa kyllä. Käytännössä se on erittäin epätodennäköinen — ja tämä ohje osoittaa, kuinka epätodennäköinen ja millä perusteella.

2. Menetelmä / periaate

Tarkoitus ja soveltamisala

Tämä ohje kuvaa tilastollisen menetelmän, jolla arvioidaan usean itsenäisen, jaksottaisesti toimivan sähkökuorman samanaikaista huipputehoa. Menetelmä soveltuu tilanteisiin, joissa kuormia on useita (n kappaletta) ja ne ovat teknisesti samanlaisia, kukin kuorma toimii huipputeholla vain ajoittain tunnetun kestoisina jaksoina, ja jaksojen ajoitukset määräytyvät kuormakohtaisista, toisistaan riippumattomista tekijöistä. Tyypillisiä sovelluskohteita ovat ilmanvaihdon sulatukset, lämmitysvastukset ja muut syklisesti toimivat laitteet asuintoimistoissa käytössä.

Menetelmän tulos on mitoitussarvo k: kuinka monta kuormaa on valitulla varmuustasolla korkeintaan samanaikaisesti huipputeholla. Tästä johdetaan samanaikaisuuskerroin k/n ja ryhmän mitoitusteho.

Peruskäsitteet

Käyttöaste p on todennäköisyys sille, että satunnaisella tarkasteluhetkellä yksittäinen kuorma on huipputehoajaksossa. Kun jakson kesto on t ja jaksojen väli (jakson alusta seuraavan alkuun) on T, käyttöaste on $p = t / T$. Esimerkiksi 20 minuutin sulatus kolmen tunnin välein antaa $p = 20/180 \approx 11,1 \%$.

Samanaikaisuuskerroin (tasoituskerroin, risteilykerroin) on mitoituksessa käytettävä suhdeluku, joka kertoo kuinka suuri osa kuormien yhteenlasketusta maksimitehosta voi toteutua samanaikaisesti. Sähkösuunnittelussa vastaava käsite on vakiintunut huipputehon laskentaan (esim. ST-kortiston tasoituskerroinmenettely); tämän ohjeen menetelmä tuottaa kertoimen johdetusti laitteen toimintaparametreista sen sijaan, että se valittaisiin taulukosta tai kokemukseräisesti.

Varmuustaso on todennäköisyys, jolla samanaikaisten kuormien määrä jää mitoitussarvon k alle tai siihen. Esimerkiksi 99,9 %:n varmuustaso tarkoittaa, että satunnaisella tarkasteluhetkellä ylityksen todennäköisyys on 0,1 %.

Binomijakauma

Kun n kuormaa toimii toisistaan riippumatta ja kukin on tarkasteluhetkellä huipputeholla todennäköisyydellä p , samanaikaisesti huipputeholla olevien kuormien lukumäärä X noudattaa binomijakaumaa: $X \sim \text{Bin}(n, p)$.

Jakauman tunnusluvut ovat:

- Odotusarvo: $E(X) = n \cdot p$
- Varianssi: $\text{Var}(X) = n \cdot p \cdot (1 - p)$
- Keskihajonta: $\sigma = \sqrt{n \cdot p \cdot (1 - p)}$

Yksittäisen arvon todennäköisyys on $P(X = x) = C(n, x) \cdot p^x \cdot (1 - p)^{n-x}$, missä $C(n, x)$ on binomikerroin. Mitoituksessa kiinnostava suure on kertymä $P(X \leq k)$, eli todennäköisyys sille, että samanaikaisia kuormia on korkeintaan k .

Mitoitusarvon laskenta normaaliapproksimaatiolla

Kun n on kohtalaisen suuri, binomijakaumaa voidaan approksimoida normaalijakaumalla. Mitoitusarvo halutulla varmuustasolla saadaan kaavalla:

$$k = \lceil E(X) + z \cdot \sigma \rceil$$

missä z on normaalijakauman yksisuuntainen kvantiilikerroin ja $\lceil \cdot \rceil$ tarkoittaa pyöristystä ylöspäin. Yleisimmät kertoimet:

Varmuustaso	z
95 %	1,645
99 %	2,326
99,9 %	3,090
99,99 %	3,719

Normaaliapproksimaatio on riittävän tarkka, kun $n \cdot p \cdot (1 - p)$ on vähintään luokkaa 5–10. Tämän alle jäävissä tapauksissa (pieni n tai hyvin pieni p) mitoitusarvo kannattaa laskea suoraan binomijakauman kertymäfunktioista tai Poisson-approksimaatiolla. Approksimaation tarkkuutta parantaa jatkuvuuskorjaus: ylitystodennäköisyyttä $P(X \geq k + 1)$ arvioitaessa normaalijakauman argumenttina käytetään arvoa $k + 0,5$.

Pätevyysalueen rajoilla approksimaatio tyypillisesti aliarvioi jakauman oikeaa häntää hieman, jolloin mitoitusarvo voi jäädä yhden yksikön liian pieneksi. Periaate on tärkeä: normaaliapproksimaatio on aina ensiarvio, joka tarkistetaan tarkalla binomilaskennalla, ja raportoitava varmuustaso otetaan tarkasta laskennasta — ei approksimaatiosta.

Varmuustason valinta — hetkittäinen vs. jaksollinen ylitysriski

Varmuustaso koskee yksittäistä satunnaista tarkasteluhetkeä. Pitkä kuormitusjakso sisältää kuitenkin monta tarkasteluhetkeä, joten ylityksen todennäköisyys jonkin jakson aikana on suurempi kuin yksittäisen hetken ylitystodennäköisyys. Karkea arvio: jos jakso sisältää M toisistaan likimain riippumatonta aikaikkunaa (ikkunan pituus $\approx$ huipputehojakson kesto t) ja hetkittäinen ylitystodennäköisyys on α , ylitys tapahtuu jakson aikana ainakin kerran todennäköisyydellä:

$P(\text{ylitys jakson aikana}) \approx 1 - (1 - \alpha)^M \approx M \cdot \alpha$, kun $M \cdot \alpha$ on pieni.

Esimerkki: kolmen vuorokauden yhtäjaksoinen pakkasjakso sisältää noin 200 kappaletta 20 minuutin ikkunoita. Jos hetkittäinen varmuustaso on 95 % ($\alpha = 5\%$), ylitys jakson aikana on käytännössä varma ($1 - 0,95^{200} \approx 100\%$). Jos taso on 99,9 % ($\alpha = 0,1\%$), ylitystodennäköisyys jakson aikana on noin $200 \times 0,001 \approx 18\%$ — ja ylitys tarkoittaa tyypillisesti vain yhtä kuormaa yli mitoitusarvon, ei jakauman romahtamista.

Käytännön nyrkkisääntö: valitse hetkittäinen varmuustaso niin, että $\alpha \approx$ (hyväksyttävä jaksollinen ylitysriski) / M . Sulakemitoituksessa 99,9 %:n taso on yleensä perusteltu, koska ylityksen suuruus on pieni (yksi kuorma), sulakkeiden aika-virtakäyrät sietävät lyhytaikaisia pieniä ylityksiä, ja laskennan lähtöoletukset (kaikki kuormat suurimmalla tiheydellä yhtäjaksoisesti) ovat itsessään konservatiivisia, mikä tuo lisämarginaalia.

Riippumattomuusoletus — menetelmän kivijalka

Binomimalli edellyttää, että kuormien huipputehojaksot käynnistyvät toisistaan riippumatta. Tämä on menetelmän tärkein ja herkin oletus, ja se on arvioitava jokaisessa sovelluskohteessa erikseen.

Yhteinen ympäristö ei riko riippumattomuutta. Usein kaikki kuormat altistuvat samalle ulkoiselle tekijälle (esim. ulkolämpötila). Tämä ei kuitenkaan synkronoi jaksoja, kunhan laskenta tehdään ehdollisena pahimmalle ympäristötilalle: yhteinen tekijä määrää jaksojen keskimääräisen tiheyden (p :n arvon, joka asetetaan pahimman tilanteen mukaiseksi), mutta yksittäisen jakson ajoituksen määräävät kuormakohtaiset tekijät. Ilmanvaihtokoneiden tapauksessa ajoituksen määrää kennoon kertyvän huurteen määrä, joka riippuu asunnon kosteuskuormasta — asukasmäärästä, peseytymisestä, ruoanlaitosta ja niiden ajankohdista. Sama periaate on puhelin- ja sähköverkkojen klassisen huipputehomitoituksen (Erlang-liikenneteoria) taustalla: yhteinen ympäristö määrää kuormituksen tason, yksittäisten tapahtumien ajoitukset jakautuvat satunnaisesti.

Riippumattomuus rikkoutuu, jos laukaisumekanismi on yhteinen. Tyypillisiä riskitilanteita:

- **Kynnysarvolaukaisu:** jos jakso käynnistyy suoraan yhteisen suureen kynnysarvosta (esim. ”sulatus alkaa, kun ulkolämpötila alittaa -10 °C ”), kaikki kuormat käynnistyvät lähes samalla hetkellä kynnynksen ylittyessä. Kuormakohtaisesti eripituiset jaksovälit hajauttavat vaiheet muutamassa syklistä, mutta ensimmäinen yhteiskäynnistys voi silti muodostaa mitoittavan piikin.
- **Aikaohjaus:** kellonaikaan sidotut jaksot (esim. ”sulatus joka tasatunti”) synkronoituvat täydellisesti eivätkä hajaudu koskaan.
- **Sähkökatkon jälkeinen palautuminen:** katkon jälkeen kaikki laitteet käynnistyvät samanaikaisesti. Jos laite siirtyy käynnistyessään suoraan huipputehotilaan, hetkellinen samanaikaisuus voi olla 100 %.
- **Keskitetty ohjaus:** kiinteistöautomaation tai pilvipalvelun samanaikaisesti kaikille laitteille lähettämät komennot.

Ennen menetelmän soveltamista on varmistettava laitteen ohjauslogiikasta, että laukaisu on tarvepohjainen (kuormakohtaiseen mittaukseen perustuva). Jos laukaisumekanismia ei tunneta, riippumattomuutta ei voi olettaa.

Erisuuruiset käyttöasteet

Todellisuudessa kuormien käyttöasteet vaihtelevat (yksiön kosteuskuorma $\neq$ viisihenkisen perheen). Tarkasti ottaen samanaikaisten kuormien määrä noudattaa tällöin Poisson-binomijakaumaa, jossa kullakin kuormalla on oma p_i : odotusarvo on $\sum p_i$ ja varianssi $\sum p_i(1 - p_i)$. Kun laskennassa käytetään kaikille kuormille yhteistä pahimman tapauksen p :tä ($p \geq$ kaikki p_i), sekä odotusarvo että varianssi ovat todellista suurempia

— tulos on siis aito yläraja, ei keskimääräinen arvio. Tämä yksinkertaistus on sekä laskennallisesti helpompi että mitoituksellisesti turvallinen.

Laskentaresepti

- 1. Määritä jakson parametrit: huipputehojakson kesto t ja jaksoväli T pahimmassa realistisessa käyttötilanteessa. Dokumentoi, mihin arvot perustuvat (ohjauslogiikka, kenttäkokemus, mittaukset).
- 2. Laske käyttöaste: $p = t / T$.
- 3. Varmista riippumattomuus: tarkista laukaisumekanismit. Jos riippumattomuus ei täyty, menetelmää ei voi käyttää sellaisenaan.
- 4. Laske tunnusluvut: $E(X) = n \cdot p$ ja $\sigma = \sqrt{n \cdot p \cdot (1 - p)}$.
- 5. Valitse varmuustaso altistusajan perusteella; sulakemitoituksessa tyypillisesti 99,9 %.
- 6. Laske mitoitusarvo: $k = \lceil E(X) + z \cdot \sigma \rceil$. Jos $n \cdot p \cdot (1 - p) < 5-10$, laske k tarkasti binomijakauman kertymäfunktioista.
- 7. Laske mitoitus-teho: $P_{\text{mit}} = k \times P_{\text{huippu}} + (n - k) \times P_{\text{norm}}$, missä P_{huippu} on kuorman teho huipputehojaksossa ja P_{norm} sen teho muulloin. Samanaikaisuuskerroin huipputeholle on k/n .
- 8. Dokumentoi reunaehdot: riippumattomuuden perusteet, poikkeuskäyttäytyminen (esim. sähkökatko), lähtöarvojen asema (taattu raja vs. kokemusperäinen arvio).

Käytännön laskentatyökalut

Excel / LibreOffice:

- Mitoitusarvo suoraan: `=BINOMI.JAKAUMA.KÄÄNT(n; p; varmuustaso)` (engl. `BINOM.INV`). Esimerkki: `=BINOMI.JAKAUMA.KÄÄNT(58; 0,1111; 0,999)` → 15.
- Kattavuuden tarkistus valitulle k :lle: `=BINOMI.JAKAUMA(k; n; p; TOSI)` (engl. `BINOM.DIST`) antaa $P(X \leq k)$. Esimerkki: `=BINOMI.JAKAUMA(14; 58; 0,1111; TOSI)` → 99,87 %.

Tarkka käsinlaskenta rekursiokaavalla. Binomijakauman voi laskea tarkasti peruslaskimella ilman binomikertoimia, koska peräkkäiset todennäköisyydet saadaan toisistaan yksinkertaisella kertolaskulla:

- Aloitusarvo: $P(X = 0) = (1 - p)^n$
- Rekursio: $P(X = x + 1) = P(X = x) \times [(n - x) / (x + 1)] \times [p / (1 - p)]$

Lasketaan arvot järjestyksessä $P(0)$, $P(1)$, $P(2)$, ... ja summataan kertymää, kunnes summa ylittää halutun varmuustason — viimeisin x on mitoitusarvo k . Työmäärä on tyypillisesti muutama minuutti (15–20 kertolaskua). Aloitusarvon $(1 - p)^n$ saa laskimen potenssinäppäimellä tai logaritmin kautta, esim. $(8/9)^{58} = e^{(58 \times \ln(8/9))} = e^{(-6,831)} \approx 0,00108$.

Normaaliapproksimaatio kynä-ja-paperi-ensiarviona antaa nopean tuloksen ilman taulukkolaskentaa, mutta lopullinen mitoitusarvo ja raportoitava varmuustaso otetaan aina tarkasta laskennasta (Excel tai rekursio).

3. Sovellusesimerkki

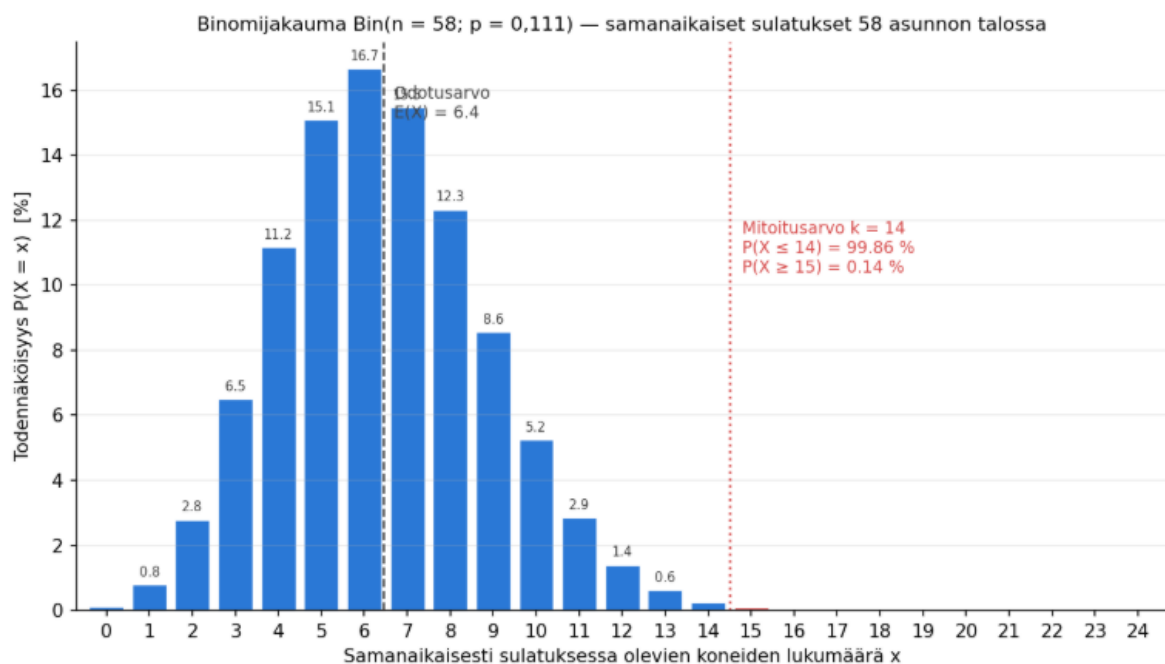
Lähtötiedot: 58 asunnon kerrostalo.

- $n = 58$ ilmanvaihtokonetta.
- Sulatusjakson kesto $t = 20$ min.
- Sulatusväli pahimmassa tunnetussa käyttötilanteessa $T = 180$ min.
- Koneen maksimiteho sulatuksessa $P_{\text{huippu}} = 2,0$ kW.
- Koneen teho normaalikäytössä (puhaltimet) $P_{\text{norm}} \approx 0,08$ kW.

Vaiheittainen laskenta:

- 1. $p = 20 / 180 \approx 0,111$ (11,1 %).
- 2. $E(X) = 58 \times 0,111 = 6,4$ konetta.
- 3. $\sigma = \sqrt{(58 \times 0,111 \times 0,889)} = \sqrt{5,73} \approx 2,4$ konetta.
- 4. Tarkistus: $n \cdot p \cdot (1-p) = 5,7 \rightarrow$ normaaliapproksimaatio on käyttökelpoinen ensiarvioon, mutta pätevyysalueen rajoilla, joten tulos tarkistetaan tarkalla laskennalla.
- 5. Varmuustaso 99,9 %, normaaliapproksimaatio: $k = [6,4 + 3,09 \times 2,4] = [13,8] = 14$ konetta.
- 6. Tarkka binomilaskenta: $P(X \leq 14) = 99,87$ % ja $P(X \geq 15) = 0,13$ %. Mitoitusarvo $k = 14$ kattaa siis 99,87 % hetkistä; tiukka 99,9 %:n mitoitusarvo olisi 15 konetta. Kohteessa käytettiin arvoa $k = 14$, jonka jäljelle jättämän marginaalin (0,03 prosenttiyksikköä) kattaa moninkertaisesti se, että laskennan lähtöoletus — jokainen asunto sulattaa suurimmalla tunnetulla tiheydellä yhtäjaksoisesti — on itsessään selvästi todellista käyttöä ankarampi.
- 7. Samanaikaisuuskerroin: $14/58 \approx 0,24$.
- 8. Mittakaavavertailut tarkasta jakaumasta: $P(X \geq 20) \approx 2 \times 10^{-6}$ (noin kaksi miljoonasta tarkasteluhetkestä); $P(X = 58) \approx 10^{-55}$.

Binomijakauma esimerkkitapauksessa on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Binomijakauma $\text{Bin}(n = 58, p = 0,111)$: samanaikaisesti sulatuksessa olevien IV-koneiden lukumäärä ja sen todennäköisyysjakauma. Jakauma keskittyy odotusarvon (6,4 konetta) ympärille — todennäköisin yksittäinen arvo on 6–7 konetta. Oikea häntä ohenee nopeasti: mitoitusarvo $k = 14$ kattaa 99,86–99,87 % hetkistä, ja kaikkien 58 koneen samanaikainen sulatus on käytännössä mahdoton tilanne.

Mitoitusteho:

Jos rakennuksen sähköjärjestelmä mitoitettaisiin olettaen, että kaikki koneet sulattavat samanaikaisesti, mitoituskuormaksi saataisiin $58 \times 2,0 \text{ kW} = 116,0 \text{ kW}$.

Todellisuudessa kuorma muodostuu kahdesta osasta: $k = 14$ konetta sulatuksessa maksimiteholla ja loput 44 konetta normaalikäytön teholla. Normaalitilanteessa lämmöntalteenotto kattaa tuloilman lämmityksen lähes kokonaan myös kovalla pakkasella, jolloin jälkilämmitysvastus ei juuri käy, ja koneen sähkönkulutus muodostuu käytännössä puhaltimista (tyypillisesti noin 80 W). Rakennuksen IV-koneiden todelliseksi huippukuormaksi saadaan:

$$14 \times 2,0 \text{ kW} + 44 \times 0,08 \text{ kW} \approx 31,5 \text{ kW}$$

Todellinen huippukuorma on siis hieman yli neljänneksen (noin 27 %) mitoitusoletuksesta, vaikka laskennassa ovat mukana kaikki rakennuksen koneet ja erittäin korkea varmuustaso.

Johtopäätös ei ole herkkä normaalitilan tehon oletukselle: vaikka osa normaalitilassa käyvistä koneista käyttäisi ajoittain jälkilämmitystä ja niiden keskiteho olisi 80 W:n sijaan esimerkiksi 300 W, rakennuksen huippukuorma nousisi vain noin 41 kW:iin ($14 \times 2,0 \text{ kW} + 44 \times 0,3 \text{ kW} \approx 41,2 \text{ kW}$) — yhä selvästi alle 40 % teoreettisesta 116 kW:n maksimista.

Tämä ei tarkoita, että fysiikka muuttuisi tai että lämmitystehoa tarvittaisiin vähemmän. Se tarkoittaa, että mitoituksessa voidaan ottaa huomioon laitteiden todellinen käyttöprofiili — samaan tapaan kuin sähkösuunnittelussa jo nyt sovelletaan tasauskertoimia esimerkiksi kiukaiden ja liesien kuormiin. Binomijakauma tarjoaa tälle tasoitukselle läpinäkyvän, matemaattisesti johdetun perusteen pelkän kokemuseräisen kertoimen sijaan.

Tarkka binomilaskenta rekursiolla (otos)

Esimerkkitapauksessa ($n = 58, p = 1/9$, jolloin $p/(1-p) = 1/8 = 0,125$) rekursiolaskenta etenee seuraavasti:

x	Kerroin $(n-x)/(x+1) \times 0,125$	$P(X = x)$	Kertymä $P(X \leq x)$
0	—	$(8/9)^{58} = 0,0011$	0,11 %
1	$58/1 \times 0,125 = 7,250$	0,0078	0,89 %
2	$57/2 \times 0,125 = 3,563$	0,0279	3,68 %
3	$56/3 \times 0,125 = 2,333$	0,0651	10,19 %
...	...	...	...
13	$46/13 \times 0,125 = 0,442$	0,0062	99,62 %
14	$45/14 \times 0,125 = 0,402$	0,0025	99,87 %
15	$44/15 \times 0,125 = 0,367$	0,0009	99,96 %

4. Suunnittelusuositus

- **Johda samanaikaisuuskerroin, älä valitse sitä.** ”Käyttöaste + sopivalta tuntuva marginaali” - tyyppinen kerroin kaatuu ensimmäiseen ”mihin tämä perustuu” -kysymykseen. Binomijakauma tuottaa saman rakenteen (odotusarvo + marginaali), mutta marginaalin suuruus seuraa valitusta varmuustasosta läpinäkyvästi.
- **Varmista riippumattomuusoletus ennen laskentaa.** Tarkista laitteen ohjauslogiikasta, että laukaisu on tarvepohjainen. Jos jaksot käynnistyvät yhteisestä kynnyksarvosta, aikaohjauksesta, sähkökatkon palautumisesta tai keskitetystä ohjauksesta, menetelmää ei voi soveltaa sellaisenaan.
- **Valitse varmuustaso altistusajan perusteella.** 95 %:n hetkittäinen varmuustaso kuulostaa korkealta, mutta ylittyy pitkän kuormitusjakson aikana käytännössä varmasti. Sulakemitoituksen kaltaisiin tarkoituksiin hetkittäisen tason on oltava vähintään 99,9 %.
- **Käytä normaaliapproksimaatiota vain ensiarviona.** Lopullinen mitoitusarvo ja raportoitava varmuustaso otetaan aina tarkasta binomilaskennasta, koska approksimaatio voi pätevyysalueensa rajoilla antaa yhden yksikön liian pienen arvon.
- **Esitä lähtöarvot oikeassa asemassaan.** Jos jaksoväli on laitteen ohjauslogiikan pakottama, siitä voi sanoa ”kone ei voi toimia tätä tiheämmin”. Jos se on kenttäkokemukseen perustuva nyrkkisääntö, oikea muotoilu on ”kenttäkokemuksen perusteella tyypillisesti enintään” — muuten dokumenttiin syntyy tekninen takuu, jota ei voida lunastaa.
- **Määrittele koko kuorma loppuun asti.** Mitoitusarvo k kertoo vain huipputehokuormien määrän; ilmoita lisäksi, millä teholla loput $n - k$ kuormaa lasketaan. Tämän auki jättäminen tuottaa vain jatkokysymyksen.

Sudenkuopat:

- 15–20 minuutin kuormitusjaksot ovat sulakkeen kannalta käytännössä jatkuvaa kuormaa, joten niitä ei voi ohittaa ”hetkellisenä piikkinä”. Menetelmän arvo on siinä, että se pienentää samanaikaiseksi laskettavaa kuormien määrää — ei siinä, että kuorman kesto vähättelisi sen merkitystä.
- Riippumattomuus on väite, joka on perusteltava — menetelmän matematiikka on triviaalia, mutta sen sovellettavuus ratkeaa laukaisumekanismien ymmärtämisellä.
- Jos jokin lähtötieto puuttuu tai on ristiriitainen, se on selvítettävä ennen laskentaa — arvoa ei pidä olettaa itse.

Liite: esimerkkikehote tekoälyavusteiseen laskentaan

Laskennan voi teettää myös tekoälyavustajalla (Claude, Copilot tms.). Alla oleva kehote sisältää menetelmän kuvauksen niin täsmällisesti, että avustaja tuottaa tämän ohjeen mukaisen laskennan ja tulostulokset. Täydennä hakasulkeissa olevat lähtötiedot ja liitä kehote sellaisenaan keskusteluun.

Kaksi käyttöhuomiota: kielimallit tekevät ajoittain aritmeettisia virheitä, minkä vuoksi kehote pakottaa avustajan näyttämään välitulokset – tarkista vähintään mitoitusarvo k Excelillä ennen tuloksen käyttöä mitoituksessa. Kehote pakottaa myös tarkan binomilaskennan pelkän normaaliapproksimaation sijaan, koska approksimaatio voi pätevyysalueensa rajoilla antaa yhden yksikön liian pienen mitoitusarvon.

Toimi tilastollisen mitoituslaskennan asiantuntijana. Laske jaksottaisten sähkökuormien samanaikaisuus binomijakaumalla alla olevien lähtötietojen ja menetelmäkuvauksen mukaisesti. Noudata menetelmää täsmälleen.

LÄHTÖTIEDOT

- Kuormien lukumäärä: n = [LUKUMÄÄRÄ, esim. 58]
- Kuorman kuvaus: [esim. ilmanvaihtokoneen LTO-kennon sulatusjakso]
- Huipputehojakson kesto: t = [esim. 20 min]
- Jaksojen väli pahimmassa tilanteessa: T = [esim. 180 min]
- Kuorman teho huipputehojaksossa: P_{huippu} = [esim. 2,0 kW]
- Kuorman teho muulloin: P_{norm} = [arvo, tai "ei käytetä laskennassa"]
- Haluttu hetkittäinen varmuustaso: [oletus 99,9 %]
- Jakson laukaisumekanismi: [kuvaa lyhyesti, esim. "sulatus käynnistyy kennon huurtumisen perusteella asuntokohtaisesti"]

MENETELMÄ - noudata näitä vaiheita järjestyksessä ja näytä kaikki välitulokset:

1. Arvioi riippumattomuusoletus: käynnistyvätkö jaksot kuormakohtaisen tarpeen perusteella toisistaan riippumatta? Jos laukaisumekanismi on yhteinen (aikaohjaus, yhteisen suureen kynnysarvo, keskitetty ohjaus), ilmoita että binomimallia ei voi soveltaa sellaisenaan, ja pysähdy. Huomaa: yhteinen ympäristötekijä (esim. ulkolämpötila) ei riko riippumattomuutta, kun laskenta tehdään ehdollisena pahimmalle ympäristötilalle - se määrää jaksojen tiheyden, ei ajoitusta.
2. Laske käyttöaste $p = t / T$.
3. Laske odotusarvo $E(X) = n \cdot p$ ja keskihajonta $\sigma = \sqrt{n \cdot p \cdot (1-p)}$.
4. Laske normaaliapproksimaatiolla ensiarvio $k_{\text{approx}} = [E(X) + z \cdot \sigma]$, missä z on varmuustason yksisuuntainen kvantiili (99,9 % $\rightarrow z = 3,09$). Ilmoita myös $n \cdot p \cdot (1-p)$ ja arvioi approksimaation pätevyys (raja 5-10).
5. Laske TARKKA binomijakauma rekursiolla: $P(X=0) = (1-p)^n$ ja $P(X=x+1) = P(X=x) \cdot (n-x)/(x+1) \cdot p/(1-p)$. Kumuloi kertymää $P(X \leq x)$ ja esitä taulukko arvoista x , $P(X=x)$ ja $P(X \leq x)$ vähintään välillä $x = 0 \dots k+2$. Määritä

- mitoitusarvo k = pienin x , jolla kertymä ylittää varmuustason. Ilmoita valitun k :n tarkka kattavuus $P(X \leq k)$ ja ylitystodennäköisyys $P(X \geq k+1)$.
6. Laske samanaikaisuuskerroin $c = k/n$ ja huipputehokuorma $k \times P_{\text{huippu}}$. Jos P_{norm} on annettu, laske myös mitoitusteho $P_{\text{mit}} = k \times P_{\text{huippu}} + (n-k) \times P_{\text{norm}}$.
7. 7. Laske jaksollinen ylitysriski: jos kuormitusjakso sisältää M kappaletta jakson t mittaisia aikaikkunoita, ylitysriski jakson aikana on $\approx 1 - (1 - \alpha)^M$, missä $\alpha = 1 - P(X \leq k)$. Käytä esimerkkinä kolmen vuorokauden yhtäjaksoista kuormitusjaksoa.
8. Kirjoita yhteenveto, jossa on: mitoitusarvo k , sen tarkka kattavuus, samanaikaisuuskerroin, tehotulokset sekä laskennan reunaehdot (riippumattomuuden perusteet, jaksovälin peruste sanamuodossa joka vastaa sen asemaa - "laite ei voi" vain jos raja on ohjauslogiikan pakottama, muuten "kokemuksen perusteella tyypillisesti").

TÄRKEÄÄ

- Älä koskaan valitse samanaikaisuuskerrointa harkinnanvaraisesti tai "sopivallamarginaalilla" - kerroin johdetaan aina jakaumasta.
- Raportoitava varmuustaso otetaan tarkasta laskennasta, ei approksimaatiosta.
- Jos jokin lähtötieto puuttuu tai on ristiriitainen, kysy sitä ennen laskentaa - älä oleta arvoa itse.
- Näytä laskutoimitukset niin, että lukija voi tarkistaa ne Excelillä (BINOMI.JAKAUMA.KÄÄNT ja BINOMI.JAKAUMA).