

NYOMTATOTT ÁRAMKÖRI KÁRTYÁK HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁSÁNAK MODELLEZÉSE

Móré Árpád Gábor 

PhD-hallgató, Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet
H-3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: autmorpi@uni-miskolc.hu

Trohák Attila 

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet
H-3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: attila.trohak@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Jelen cikk a folyamatautomatizálási információs rendszereket elemezi a döntésekhez felhasznált adatok, információk előállítása és felhasználása szempontjából. Megvizsgálja, hogy a döntésekhez szükséges adatokat a méréseken kívül hogyan tudjuk kiegészíteni modellezések segítségével. A cikk részletesen foglalkozik az adatok modellalkotással történő előállításával. A mért fizikai adatok közül a hőmérséklet mérési adatait felhasználva mutatja be a hőmérsékleteloszlás modellezésének előnyeit a PCB (Printed Circuit Board) gyártását illetően. A hőmérséklet, mint az egyik legjelentősebb folyamatparaméter eloszlásának modellezését taglalja, megvizsgálva többek között a fizikai és elektrotechnikai modellezését és rámutat a matematikai modellezés lehetőségeire. Bemutatja a modellezéssel előállított újabb információk előnyeit a megfelelő döntések meghozatalánál. A matematikai modellek osztályozása után egy konkrét példán keresztül bemutatja az inverz távolsággal súlyozott modellezési eljárást. A cikk kiemeli a modellezett értékek ellenőrzésének fontosságát, módszereit figyelembe véve és felhasználva mérésekkel kapott értékeket.

Kulcsszavak: információs rendszer, hőmérsékleteloszlás, modellezés

Abstract

This article analyzes process automation information systems in terms of the production and use of data and information for decision making. It examines how the data needed for decisions can be supplemented in addition to measurements using modeling. The article deals in detail with the production of data by modeling. From the measured physical data, it presents the advantages of temperature distribution modeling for the production of PCB (Printed Circuit Board) using temperature measurement data. It discusses the modeling of the distribution of temperature as one of the most important process parameters, examining, among other things, its physical and electrical engineering modeling and points out the possibilities of mathematical modeling. Demonstrates the benefits of newer information generated by modeling in making the right decisions. After classifying the mathematical models, it presents the inverse distance-weighted modeling procedure through a concrete example. The article emphasizes the importance of verifying the modeled values, taking into account the methods and using the values obtained by measurements.

Keywords: information system, temperature distribution, modeling

1. BEVEZETÉS

A cikk az első fejezetben az alapfogalmak összefoglalása után elemzi az információs rendszerek felépítését, az információ megszerzésétől, annak feldolgozásán át a döntéshozásig, majd az ezt eredményező beavatkozásig. Egy konkrét gyártási folyamatot elemezve, az elektronikai termékek gyártása során fontos lépést, azaz a panelek forrasztásánál a reflow kemence megfelelő hőprofiljának beállítását vizsgálja. Léteznek módszerek, amelyek segítségével a hőprofil meghatározható, de a gyakorlatban főleg tapasztalati mérésekkel végzik a hőmérsékleteloszlás beállítását a paneleken. A cikk feltárja, a megfelelő hőprofilhoz szükséges adatok mérésekkel történő előállítását, illetve annak szükségességét, hogy hogyan lehet ezen adatokat modellezés segítségével kiegészíteni. A cikk összefoglalja a modellezéssel szerzett többletinformáció előnyét, gyakorlati hatását. A matematikai modellek különböző szempontok alapján való osztályozása után egy konkrét síkbeli példán keresztül bemutatja az inverz távolsággal súlyozott hőmérsékleteloszlási modellezési eljárást. Végezetül taglalja a modellezett értékek ellenőrzésének fontosságát és módszerét figyelembe véve a mérésekkel kapott értékek korlátjait.

2. ADATOK, INFORMÁCIÓK, INFORMÁCIÓS RENDSZEREK

Az információs rendszerek egyik legfontosabb eleme az adat és az információ. „Az adatok: mindaz, amit látunk, hallunk, érzünk (akár szaglás útján, akár tapintással, akár emocionális úton). Az adat az által válik információvá, hogy a befogadó az észlelésen túl jelentéssel ruhazza fel.” (www.agr.unideb.hu) Az információt sokan próbálták megfogalmazni, de még olyan definíció nem ismert, ami egyértelműen elfogadott. Abban viszont mindegyik megegyezik, hogy bizonytalanságot, ismerethiányt csökkent.

Az információs rendszereken általánosságban az információ megszerzését, gyűjtését, ezek feldolgozását, a felhasználásukhoz, a döntésekhez szükséges műveletek elvégzését, szükség esetén az így kapott információk megjelenítését értjük. Ha technikai szempontból vizsgáljuk, akkor beleértjük a tárolásukat, keresésüket és továbbításukat is.

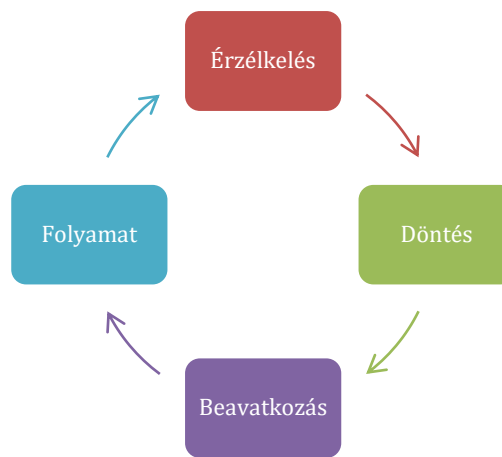
3. FOLYAMATAUTOMATIZÁLÁS

A folyamatautomatizálás az automatika területéhez tartozik, mely magában foglalja a vezérlést és a szabályozást. Mindkettőnél cél, hogy a rendszert, az irányítástechnikánál megismertek szerint az állapotuk és a bemenő jelek alapján eljuttassuk a célállapotba. A vezérlés az *1. ábra* szerint egy nyílt hatásláncú folyamat. Használata akkor célszerű, ha a bemenő jelek értelmezése és feldolgozása után a rendszer bemenetére adott jelek segítségével a rendszer biztosan eljut a megtervezett célállapotba. Szabályozásnál a folyamat egy negatív visszacsatolós rendszer, ahol a szabályozott jellemzőt (jellemzőket) méréssel ellenőrizzük és összehasonlítjuk az alapjellel vagy alapjelekkel és eltérés esetén döntést hozunk egy szabályozóberendezéssel, hogy milyen beavatkozással érhetjük el a kívánt célállapotot és ennek megfelelően beavatkozunk. A szabályozás a *2. ábra* szerint egy zárt hatásláncú folyamat. Ezek a beavatkozások lehetnek online vagy offline folyamatok is. A folyamatautomatizálásnál jól felismerhetők az információs rendszer részei és funkciói.

Az információszerzés (ÉRZÉKELÉS) és -gyűjtés jelen esetben fizikai, technikai és műszaki adatok mérését jelenti.



1. ábra. A vezérlés nyílt hatáslánca



2. ábra. A szabályozás zárt hatáslánca

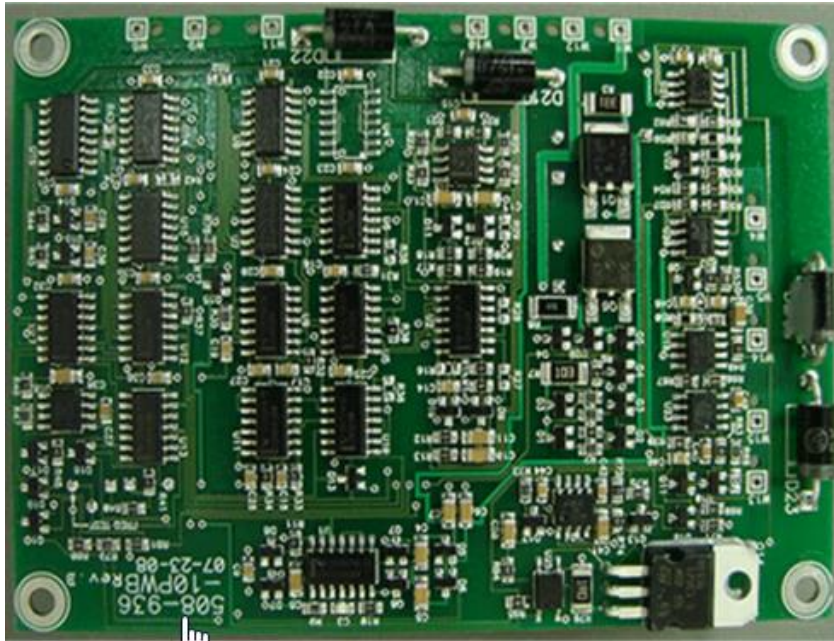
4. HŐMÉRSÉKLETELOSZLÁS MODELLEZÉSE

Ebben a részben a cikk a hőmérsékleteloszlással mint döntésmeghatározó tényezővel foglalkozik egy konkrét technológia kapcsán. A hőmérsékleteloszlás megismerése sok technológiai folyamat alapját képezi. A hőmérsékleteloszlás ismerete nagymértékben hozzájárul a folyamatok minőségi fejlesztéséhez. Ez a folyamatkarakterisztika az alapja a kialakuló termék-karakterisztikáknak, mint például a PCB (Printed Circuit Board), azaz Nyomtatott Áramköri Kártyák (NYÁK)) gyártásnál használt felületszerelt SMT (Surface Mount Technology) technológia újraömlesztéses (reflow) forrasztásánál, vagy számos vegyipari technológiánál.

A megoldandó probléma: síkban és térben a jelenlegi mérési módszerek alapján csak korlátozott számú hőmérsékleti adat kapható. Cél, hogy a sík és a tér néhány pontjában mért hőmérsékleti érték alapján a többi (véges számú) pontban a hőmérsékleti értékek becsülhetők legyenek. Ennek eredményeként a technológiák újabb eszközt kapnak a minőség javulására és az energiák megtakarítására.

A 3. ábrán egy minta PCB látható, ahol modellezés alapján szeretnénk kiszámítani az ismeretlen helyeken a hőmérsékleti értékeket a PCB-gyártásnál használt SMT-technológia újraömlesztéses (reflow) forrasztásánál (Yang et al., 2020).

A 4. ábrán látható, hogy a számmal jelölt helyeken ismerjük a hőmérsékleti értékeket a mért értékek alapján, az üres helyeken a modellezés eredményeként szeretnénk becsülni vagy kiszámítani a hőmérsékleti értékeket.



3. ábra. Egy minta PCB

				260				
270								
	265				262			
			263				250	

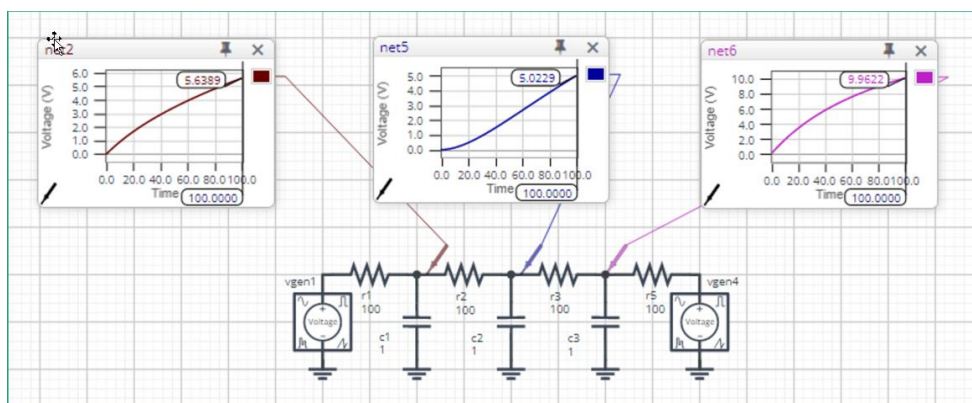
4. ábra. A modellezés célja, hogy az üres celláknál is megkapjuk a hőmérsékleti értékeket

A kérdés, hogy megtudható-e a többi helyen a hőmérsékleti érték. A modellezéshez meg kell határozni a modellel kapcsolatos elvárásokat. Fontos a pontosság, a modellezés sebessége, a mérési pontok száma, illetve tudnunk kell, hogy a modellünk milyen körülmények között alkalmazható. Jelen esetben ezt információtechnológia szempontból adatfeldolgozásnak tekintjük, ahol megfelelő modellalkotással megkaphatjuk azokat a modellezett adatokat, amik szükségesek a megfelelő döntés megalkotásához. Jelen esetben egy hőprofil elkészítése több órát vesz igénybe, ami egy offline feladat, de minden új PCB gyártásánál, illetve új reflow kemence használatánál új kihívást jelent. Az adatok pontossága és a modellezés sebessége sok esetben fordítottan arányos elvárás. Jelen esetben a pontosságot a forrasztásra kerülő alkatrészek adatlapja határozza meg, a modellezés ideje pedig összemérhető lehet a hőprofil készítés idejével.

5. HŐMÉRSÉKLETELOSZLÁS FIZIKAI ÉS ELEKTROTECHNIKAI MODELLEZÉSE

Bármely fizikai folyamat, jelenség modellezését célszerű a fizikai modellalkotással kezdeni. A fizikai modellalkotásnál differenciálegyenletek (DE), egyenletrendszerek írják le a jelenségeket. A sík és a tér véges pontra való felosztása után az egyes pontokat a hőkapacitások jellemzik és a környezetükkel való kapcsolatukat a hőellenállásokkal lehet leírni. Peremfeltételekként kerül felhasználásra a mért értékek bevitele a modellbe. A DE megoldásai adják a kérdéses pontokban a hőmérsékleti értékeket (adoc.pub). Az így megadott DE megoldását különféle programok segítségével oldhatjuk meg pl. Matlab (de.mathworks.com).

A modellalkotásunkat segítheti, ha a fizikai modellalkotás eredményeit felhasználva elkészítjük a rendszer elektrotechnikai modelljét. A modellezést a neten ingyenesen elérhető „Partquest” alkalmazás segítségével végeztem el (explore.partquest.com). Az analógiákat felhasználva a DE-ket az elektrotechnikai áramkör, a hőkapacitást a kondenzátorok, a hőellenállásokat az ellenállások helyettesítik. A mért értékeket feszültségforrásokkal modellezzük ezzel biztosítva, hogy értékük ne tudjon változni a modellezés közben. A megoldásokat a kérdéses pontokban kialakuló feszültségek adják mind időben és mind állandósult állapotban. Erre mutat példát az 5. ábra, ahol egy egydimenziós-eloszlás kerül modellezésre 5 pontban előbb leírtak alapján.



5. ábra. Hőmérsékleteloszlás modellezése 1 dimenzióban

6. A HŐMÉRSÉKLETELOSZLÁS MATEMATIKAI MODELLEZÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

A hőmérsékleteloszlás fizikai és elektrotechnikai modellezésének korlátai abban állnak, hogy ismernünk kell a rendszer fizikai adatait minden egyes kiszámítandó pontra és a pontok közötti kapcsolatokra (hőkapacitás, hőellenállás). Homogén rendszerek esetén ez általában nem jelent problémát. A gyakorlatban, sok esetben inhomogén a rendszer, vagyis a fizikai paraméterek megismerése problémás lehet.

Az előző modellek korlátainak feloldását jelentheti, ha matematikai modellek segítségével modellezzük le a hiányzó hőmérsékleti adatokat. A modellek készítésénél fontos szempont a modellezések időigénye és pontossága, ami a felhasználhatóságukat is meghatározza. A modellek az alábbiak szerint csoportosíthatók: lineáris vagy nem lineáris modellek, ami attól függ, hogy a felhasznált matematikai műveletek lineárisok vagy nem lineárisok. A hőmérsékleteloszlásoknál elképzelhető mind a kétféle modell. Lineáris modelleket alkalmazhatunk, ha a rendszer homogén és nincs semmiféle torzítást előidéző tényező. Ha a hőmérsékleteloszlást időben modellezzük, akkor a linearitást torzító tényezők már nem elhanyagolhatóak.

Síkban a közelítést elvégezhetjük kétváltozós függvényközelítésekkel, ahol az ismert hőmérsékleti helyek adják a peremfeltételnél a bemeneti változókat és a mért értékek pedig a függvény értékeit. Térben a modellezés hasonló, de ebben az esetben háromváltozós függvényközelítéseket kell alkalmazni, ahol a peremfeltételek bemenetei a térbeli koordináta értékek, a mért hőmérsékleti érték pedig a függvényérték.

A modellek lehetnek statikusak és dinamikusak is. A dinamikus modellek esetén a lineáris modellek nem használhatóak, mert a fizikai és elektrotechnikai modelleknél már tárgyalt hőkapacitások torzításokat jelentenek az idő változása közben.

A matematikai modelleknél léteznek determinisztikus és sztochasztikus modellek is. A determinisztikus modelleknél a paramétereket a modell a kezdeti értékekből és/vagy a paraméterek korábbi értékeiből veszi. A sztochasztikus modell esetén a modellezés közben a véletlenszerűséget is felhasználjuk és ezekben az esetekben a változók állapotát nem a korábbi determinisztikus értékek, hanem a véletlenekkel modellezett változók eloszlásai írják le.

Abban az esetben, ha lehetőség van a matematikai modelleket több mérési eredménnyel támogatni, például a mérési pontokat megváltoztatva, azonos körülmények között a méréseket többször elvégezni, akkor újabb lehetőségek is adódnak a modellezésre. Ebben az esetben már alkalmazhatóak az intelligens számítási módszerek is, mint például a mesterséges intelligencia.

A 6. ábra a 4. ábrán szereplő mért hőmérsékleti értékek alapján modellezi a hiányzó értékeket. A modellezés az inverz távolsággal való súlyozást (Inverse Distance Weighting, IDW) (Sree Dhevi, 2014; Bartier és Keller, 1996) alkalmazza, mely a nem lineáris determinisztikus modellekhez tartozik. A modell képletei a következők:

$$u(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(x) * u_i}{\sum_{i=1}^N w_i(x)} \text{ ha } d(x, x_i) \neq 0 \text{ minden } i \text{ esetén} \quad (6.1.)$$

$$u(x) = u_i \text{ ha } d(x, x_i) = 0 \text{ néhány } i \text{ esetén} \quad (6.2.)$$

$$\text{ahol } w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (6.3.)$$

Jelölések: az $u(x)$ a modellezendő érték, u_i a mérésekkel kapott értékek. A $d(x, x_i)$ a modellezett pont távolsága a mért pont távolságától, w_i a modellezett pont és a mért pont közötti távolság reciprokjának hatványa. A modell ezzel súlyozza a mért értékeket a modellezett értékek kiszámítása közben. A 6.2. képlet azt az esetet jelenti, amikor a modellezés a mért helyen modellezné az értéket. A p kitevő egy paraméter. Jelen esetben a $p = 1$ paraméter lett felhasználva. A két szomszédos cella közötti távolságot a modell 1-nek veszi. A modellezés Excel VBA-program segítségével készült (excel-easy.com). A modellezett adatok egészre lettek kerekítve.

A 7. ábra a $p = 2$ értéket felhasználva készült. A 8. ábra a $p = 3$ értéket felhasználva mutatja a modellezett értékeket.

264	263	263	262	262	262	262	262	261	261
264	264	263	262	260	261	262	262	261	261
265	266	264	263	262	262	262	261	261	261
266	270	265	263	262	262	262	261	261	261
265	265	264	263	263	262	262	261	261	260
264	264	264	263	263	262	261	261	260	260
264	264	265	263	262	262	262	260	259	259
263	263	263	263	262	262	261	259	257	257
263	263	263	263	263	261	260	257	250	256
263	263	262	262	262	261	260	258	256	257

6. ábra. Inverz távolsággal súlyozott modellezés $p = 1$ (sárgával kiemelt értékek a mért értékek)

265	264	263	261	261	261	261	261	261	261
266	266	264	261	260	261	261	261	261	261
268	268	266	263	261	261	261	261	261	261
269	270	268	265	263	262	262	261	261	260
268	268	267	265	263	262	262	261	260	259
266	266	265	264	263	262	262	261	259	258
265	265	265	264	263	262	262	260	258	256
264	264	264	264	263	262	261	257	253	254
264	264	263	263	263	262	259	254	250	252
263	263	263	263	263	261	259	254	252	253

7. ábra. Inverz távolsággal súlyozott modellezés $p = 2$ (sárgával kiemelt értékek a mért értékek)

266	265	263	261	260	260	261	261	261	261
268	267	264	260	260	260	261	261	261	261
269	270	268	262	260	260	261	261	261	260
270	270	269	265	262	262	261	261	260	260
269	269	268	266	263	262	262	261	260	259
267	266	265	265	263	262	262	261	259	257
265	265	265	265	263	262	262	261	257	255
265	265	265	264	263	262	261	256	251	251
264	264	264	263	263	263	259	252	250	250
264	264	263	263	263	262	258	252	251	251

8. ábra. Inverz távolsággal súlyozott modellezés $p = 3$ (sárgával kikemelt értékek a mért értékek)

7. A MODELLEZETT ÉRTÉKEK ELLENŐRZÉSE

A hőmérsékleteloszlások modellezésénél fontos szempont, hogy a mérések megtervezésénél olyan helyeken mérjük az adatokat, amik jellemzőek a rendszerre és az eloszlásra. Ez azt jelenti, hogy érdemes megkeresni a legmelegebb és leghidegebb pontokat és azokat a pontokat, ahol olyan alkatrészek, elemek fordulnak elő, amik lényeges torzulást okozhatnak az eloszlásban.

A matematikai modellezések nélkülözhetetlen része a modellezett adatok ellenőrzése. Ezt elvégezhajjuk, hogy a modellalkotásnál nem használjuk fel az összes adatot. Az adatok egy része a modellezéshez szükséges a másik része pedig az ellenőrzéshez. Fontos megemlíteni, hogy meg kell különböztetnünk a megismételhető és nem megismételhető mérési eseteket. A nem megismételhető eseteknél a mért adatokból mindig más és más adatokat használunk fel az ellenőrzéshez, miközben a többi adatot a modellezéshez használjuk. A megismételhető eseteknél könnyebb a helyzet, mert a mérési pontok változtatásával újabb tesztpontokhoz juthatunk. Intelligens számítási módszerek esetén a mért adatok egy része a tanításhoz szükséges, a másik része pedig a modell ellenőrzését teszi lehetővé. Intelligens számítások esetén lehetőség nyílik a különböző rendszerek közötti szabályszerűségek feltárására is.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk megvizsgálta az információs rendszerek alapvető elemeit és folyamatait. Összefoglalta a legfontosabb alapfogalmakat. Az információs rendszereken belül általánosan kitért a folyamatautomatizálásra, összehasonlítva két fő elemét a nyílt hatásláncú vezérlést és a zárt hatásláncú szabályozást. Bemutatott egy problémát, ahol a mért hőmérsékletek önmagukban nem adnak megfelelő információt egy minden igényt kielégítő hőprofil készítéséhez, ami szükséges a NYÁK készítésénél a megfelelő hőprofil kialakításához. Szükséges a hőmérsékleteloszlás modellezése, mely segítségével megkaphatjuk a szükséges többlettinformációkat. A cikk foglalkozik a modellalkotás lehetőségével, kiemelve az adott esetben a modellel szemben elvárt követelményeket. Elemezi a hővezetés fizikai modelljét, mely segítségével

meghatározásra került az elektrotechnikai modell, mely lehetővé teszi, hogy egy egyenes mentén, vagy síkban, vagy térben és időben is modellezhessük a hőmérsékleteket a nem mért helyeken. Ezeknek a modelleknek a használatát korlátozza, hogy inhomogén esetben hogyan határozzuk meg a fizikai paramétereket, ami a modellhez szükséges. Ezek alapján a következő lépés a matematikai modellalkotás, mely kiküszöböli az előbbi modellek hiányosságát, figyelembe véve a kitűzött céllal kapcsolatos elvárásokat. A cikk összefoglalja a lehetőségeket azok alkalmazhatósága szerint. Bemutatásra kerül egy síkbeli hőmérsékleteloszlás modellezése, ahol a PCB-n 6 mért pont, mint peremfeltétel alapján inverz távolság súlyozással modellezzük le az ismeretlen hőmérsékleti értékeket. Az utolsó részben a cikk a modellezések által kapott adatok ellenőrzésének lehetőségeit tárgyalja.

IRODALOM

- [1] http://www.agr.unideb.hu/ebook/szamitogephasznalat/adat_informci.html, utoljára látogatott: 2022. 03. 23.
- [2] Lee, N.-C. (2001). Introduction to surface mount technology, reflow soldering processes. In N.-C. Lee (ed). *Newnes*. pp. 1–18, <https://doi.org/10.1016/B978-075067218-4/50001-4>
- [3] <https://explore.partquest.com/home>, utoljára látogatott: 2022. 03. 23.
- [4] <https://adoc.pub/grof-gyula-hkzles-ideiglenes-jegyzet.html>, utoljára látogatott: 2022. 03. 23.
- [5] <https://de.mathworks.com/help/symbolic/solve-a-single-differential-equation.html>, utoljára látogatott: 2022. 03. 23
- [6] Sree Dhevi, A. T. (2014). Imputing missing values using Inverse Distance Weighted Interpolation for time series data. Sixth International Conference on Advanced Computing (ICoAC), pp. 255–259. <https://doi.org/10.1109/ICoAC.2014.7229721>
- [7] Bartier, P. M., Keller, C. P. (1996). Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW). *Computers & Geosciences*, 22 (7), pp. 795–799. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(96\)00021-0](https://doi.org/10.1016/0098-3004(96)00021-0)
- [8] Yang, F., He, C., Xu, Q., Xiao, H. The study on thermal analysis method of PCB. 2020 IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*, 782, 022042, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/782/2/022042>
- [9] <https://www.excel-easy.com/vba.html>, utoljára látogatott: 2022. 03. 23.