

Detekcija dežja na osnovi združitve tlačnega in akustičnega principa

Mark Vintar, Marko Kos (mentor)

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, UM FERI, Koroška cesta 46, 2000 Maribor
E-pošta: mark.vintar@student.um.si

Rain detection based on the combination of pressure and acoustic principles

Abstract. Rainfall is a natural phenomenon, that people tried to measure and analyze for centuries. Every raindrop has mass and velocity, so it has kinetic energy. This kinetic energy can be transformed into a more useful form, such as force and pressure, from which useful information can be extracted. This paper introduces the combined use of pressure and acoustic principles for rain detection. Both principles separately have some disadvantages. Their combination can support each other's weaknesses. The paper represents the composition and operation of pressure and acoustic concepts, as well as the implemented algorithm, experimental results, problems associated with these principles and their potential use in practice.

1 Uvod

Detekcija dežja in drugih padavin je dandanes izrednega pomena. Zelo je razširjena v avtomobilski industriji, vremenskih postajah, pametnih hišah, kmetijstvu...

Principov detekcije dežja je veliko. Med bolj popularnimi je optični princip, ki je zelo odporen na dejavnike iz okolja v primerjavi z nekaterimi drugimi principi. Pri optičnem principu se po navadi uporablja infrardeči vir svetlobe, ki se ob prisotnosti vodne kapljice drugače lomi in odbije. To spremembo zaznamo s pomočjo fotodiode ali fototranzistorja [1]. Znan princip je tudi merilec s prekucnim vedrom. S pomočjo lijaka se dežne kaplje zbirajo v dve vedri, ki sta pritrjeni na tečaj. Ko v vedro priteče določena znana količina dežja, se vedro prekucne in polniti se začne drugo vedro. S štetjem kolikokrat se vedro prekucne lahko določimo količino dežja [2]. Zanimiv je tudi induktivni princip, pri katerem se izkorišča pojav vrtničnih tokov [3]. Osnovo predstavlja tuljava, ki je dana pod kovinsko ploščo. Ko kapljica zadane ploščo, ta začne nihati. V plošči se inducirajo vrtnični tokovi, ki imajo za posledico spremembo induktivnosti tuljave in s tem spremembo frekvence resonančnega vezja, na podlagi katere zaznamo padavine. Uporabljajo se tudi detektorji dežja na osnovi prevodnosti [4]. Tukaj imamo ploščo iz vzporednih prevodnih trakov. Ko vodne kaplje padejo na ploščo, ustvarijo prevodne poti in spremenijo prevodnost plošče. Ta princip je enostaven in cenovno ugoden, ampak ima slabo občutljivost na majhne kapljice. Tlačni princip, kot že samo ime pove, dobiva informacije na podlagi sprememb tlaka. Akustični princip je precej podoben tlačnemu principu, saj zajema informacije iz

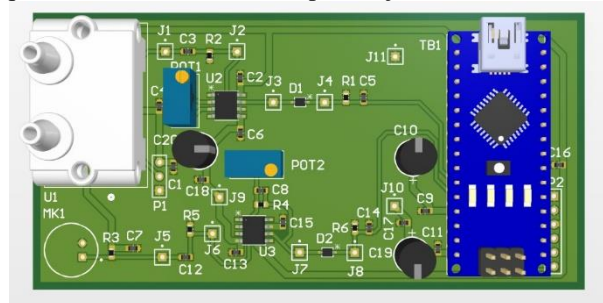
zvoka, ki pa je mehansko valovanje pri katerem prihaja do zgoščin in razredčin v zraku, torej sprememb tlaka. Iz sprememb tlaka pa lahko izluščimo informacije in zaznamo prisotnost dežja ter posredno določimo količino dežja. Razlika med tlačnim in akustičnim principom je v sestavi senzorja in občutljivosti na spremembo tlaka. V [5,6,7,8] so opisani detektorji dežja na osnovi akustičnega principa. V [5] je opisan potencial implementacije cenovno nizkih akustičnih senzorjev dežja v sistemih za opozarjanje pred poplavami. V [6] je bila izvedena primerjava med akustičnim principom in prekucnim vedrom. V [7] je predstavljeno načrtovanje akustičnega senzorja z avtomatizirano telemetrijo na podlagi SMS ali internetne povezave. V [8] je predstavljen akustični senzor podjetja Vaisala, ki deluje na podlagi piezoelektričnega efekta.

Za združitvev tlačnega in akustičnega principa smo se odločili zaradi različne občutljivosti na velikost kapljic. Pri nevihtnem deževanju, kjer se pojavlja grom in kjer je velikost in število kapljic visoko, akustični princip daje netočne rezultate zaradi visoke prisotnosti zunanega šuma. Dopolni ga lahko tlačni princip, ki je v večji meri odporen na zunanji šum.

Zgradba članka je naslednja: v poglavju 2 je opisana fizična sestava detektorja in njegovi ključni deli. V poglavju 3 je razloženo fizikalno ozadje delovanja. Poglavje 4 prikazuje zasnovano merilnega sistema in kako posamezn del sistema pripomore k njegovi celoti. V poglavju 5 so prikazane meritve in njihovi rezultati. Sledi še zaključek, kjer so povzete ugotovitve.

2 Sestava detektorja

Detektor je sestavljen iz tiskanega vezja (slika 2.1) in lijaka (slika 2.2), na vrh katerega je pritrjena membrana. Na dnu lijaka je s cevko pritrjen senzor tlaka. V plašč lijaka je vgrajen tudi mikrofون. Na tak način lahko senzor tlaka in mikrofون zaznavata nihanje tlaka v istem zaprtem prostoru, s čimer dosežemo primerljive rezultate.

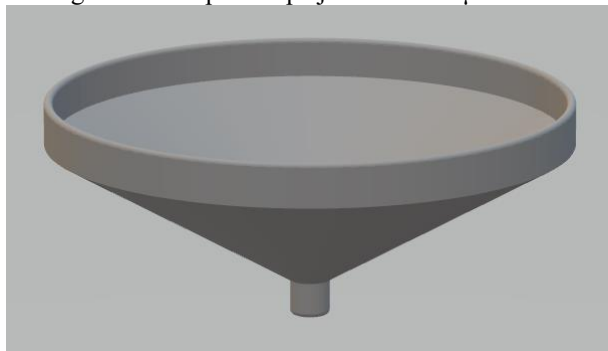


Slika 2.1: Tiskano vezje z vsemi komponentami, načrtano v programskem paketu Altium Designer

Za izdelavo membrane smo izbrali gumijasto opno. Pomembno je, da je elastična ter odporna na vplive iz okolja in temperaturne spremembe.

Za tlačni princip je uporabljen senzor diferenčnega tlaka z nazivno vrednostjo tlaka 125 Pa. Senzor meri razliko tlakov med odprtinama. Ena odprtina je preko cevke povezana z lijakom, druga pa je povezana z atmosfero okolice.

Za akustični princip je uporabljen kondenzatorski mikrofonski senzor, ki je veliko bolj občutljiv v primerjavi s tlačnim senzorjem, saj je njegov namen zaznavati zvok, katerega tlačna amplituda pa je lahko reda μPa .



Slika 2.2: Lijak, načrtan v programu Autodesk Fusion 360, natiskan s 3D tiskalnikom

3 Fizikalno ozadje delovanja

Dež sestoji iz vodnih kapljic, ki med padanjem iz neba pospešujejo, dokler ne dosežejo svoje končne hitrosti. Večja kot je končna hitrost, večja bo sila zračnega upora na posamezno kapljico. Ta sila kapljico deformira in ji spremeni obliko. Kapljice so lahko različnih velikosti, zato so tudi različnih oblik. Majhne kaplje so približno sferične, večje pa vedno bolj ploščate oblike. Zaradi kohezije vode, so prisotne sile ki tiščijo molekule vode skupaj v obliko kapljice. Če je kapljica prevelika, bodo sile, ki tiščijo kapljico narazen postale prevelike in kapljica se bo razletela na več manjših.

Če predpostavimo, da je kapljica poljubne velikosti sferična, lahko izračunamo njeno približno končno hitrost. Pri končni hitrosti mora veljati, da je vsota vseh sil enaka nič. Če upoštevamo gostoto zraka ρ_{zrak} , presek kapljice A , uporovni koeficient C in hitrost kapljice v , lahko določimo silo s katero zrak deluje na kapljico med padanjem. Prav tako lahko na podlagi volumna kapljice, gostote vode ρ_{kaplja} in gravitacijskega pospeška g določimo silo teže vodne kapljice, ki deluje v nasprotni smeri kot sila zraka. Če sedaj upoštevamo vse našete parametre, lahko zapišemo enačbo (1), s katero lahko določimo približno končno hitrost dežne kaplje.

$$v_{končna} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{kaplja} \cdot g}{3 \cdot 0.5 \cdot \rho_{zrak} \cdot A \cdot C}} \quad (1)$$

Pri enačbi (1) upoštevamo približno gostoto vode, zraka ter gravitacijski pospešek, ki velja na območju Slovenije.

V tabeli spodaj so prikazane velikosti kapljic pri različnih tipih dežja in njihove približne končne hitrosti.

Velikosti kapljic smo povzeli po tabeli iz [9].

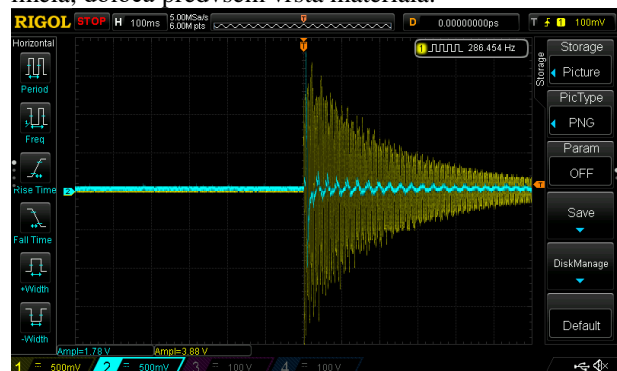
Tabela 1: Približne končne hitrosti za kapljice različnih velikosti [9]

Tip dežja	Premer kapljice (mm)	Končna hitrost (m/s)
<u>Rahel dež</u>		
Majhne	0.5	3.40
Velike	2.0	6.80
<u>Zmeren dež</u>		
Majhne	1.0	4.81
Velike	2.6	7.75
<u>Močan dež</u>		
Majhne	1.2	5.27
Velike	4.0	9.62

Ker so končne hitrosti kapljic relativno majhne, se kapljice med padanjem tej hitrosti že hitro približajo. Zaradi tega pri merjenju umetno ustvarjenih kapljic in poustvarjanju dežja ni potrebna večja višina, saj se že pri višinah 1 do 5 metrov precej približamo končni hitrosti kapljic.

Ko kapljica udari ob membrano, se njena kinetična energija pretvori v prožnostno energijo membrane. Ker se membrana začne premikati, začne ustvarjati tlačni val. Sledi prehodni pojav (slika 3.2) izmenjevanja kinetične energije v prožnostno in obratno, pri tem pa se del energije pretvori v mehansko valovanje. Kako dolgo traja ta prehodni pojav in s kakšnimi frekvencami niha, je odvisno od več dejavnikov.

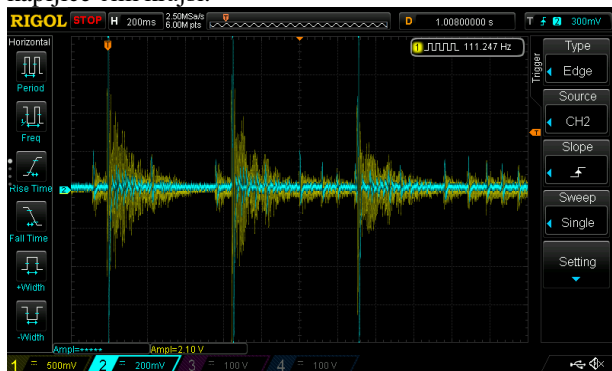
Eden izmed dejavnikov je velikost kapljic. Večja kot je kinetična energija kapljice, dalj časa bo trajala pretvorba kinetične energije v mehansko. Frekvenca nihanja membrane je neodvisna od velikosti kapljic. Na frekvenco vplivajo material, debelina, površina, oblika in napetost membrane. Vsaka membrana ima vsaj eno resonančno frekvenco, lahko jih ima tudi več. Kako bo membrana prožnostna in katere resonančne frekvence bo imela, določa predvsem vrsta materiala.



Slika 3.1: Prehodni pojav ene kapljice, izmerjen z osciloskopom. Signal tlačnega senzorja prikazuje modra karakteristika, signal mikrofona pa rumena karakteristika

Problem se pojavi, ko membrano zadane druga kapljica, medtem ko prehodni pojav prve kapljice še ni končan. V tem primeru pride do prekrivanja (slika 3.3), kar lahko povzroči napako v rezultatih. Zato želimo, da

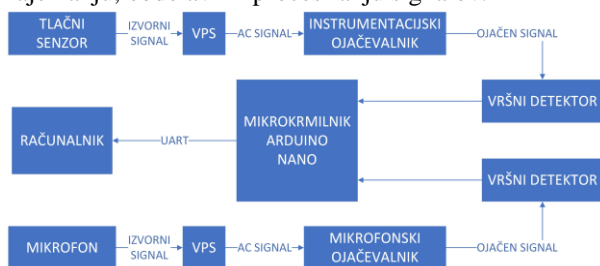
je dušenje membrane čim večje in s tem prehodni pojav kapljice čim krajši.



Slika 3.2: Prekrivanje signalov zaporednih kapljic, izmerjenih z osciloskopom. Signal tlačnega senzorja prikazuje modra karakteristika, signal mikrofona pa rumena karakteristika

4 Zasnova merilnega sistema

Blokovni diagram (slika 4.1) prikazuje posamezne dele merilnega sistema, ki imajo specifično vlogo pri zajemanju, obdelavi in procesiranju signalov.



Slika 4.1: Blokovni diagram detektorja dežja

Zasnova sistema je med tlačnim in akustičnim principom podobna, le elementi imajo različne vrednosti.

Signala tlačnega senzorja in mikrofona vsebujeta enosmerno komponento, ki jo odstranimo, saj nas zanima samo izmenična komponenta signala. V ta namen uporabimo pasivno visokoprepustno sito z dovolj nizko mejno frekvenco, da prepušča resonančne frekvence membrane.

Ker dežne kapljice povzročajo relativno majhne spremembe tlaka, je za procesiranje signala potrebno signal ojačati. To dosežemo z instrumentacijskim (za tlačni princip) in neinvertirajočim (za akustični princip) ojačevalnikom, katerima je dodan posamezni potenciometer za enostavno prilagajanje ojačenja. Ojačenje je nastavljeno tako, da največja pričakovana kapljica premera 4 do 5 mm, na sredino membrane povzroči pulzni signal maksimalne amplitude brez popačenja cca ± 4.5 V.

Za lažje procesiranje signala in lažjo določitev števila kapljic, je dodan vršni detektor. Sestavljen je iz diode, upora in kondenzatorja. Zaradi diode se vrednost signalov zmanjša na interval med 0 V in približno 4 V. Vršni detektor zajame vrednost največjega pulza v prehodnem pojavu in to vrednost drži določen čas, odvisno od RC konstante. Vrednosti upora in kondenzatorja sta določeni tako, da bo se kondenzator praznil približno toliko časa, kot traja prehodni pojav.

Za samo zajemanje in procesiranje signala smo uporabili vgrajen sistem Arduino Nano. Izhoda vršnih detektorjev sta povezana na njegov analogno-digitalni pretvornik, s katerim vzorčimo signala s frekvenco 200Hz. Na podlagi teh vzorcev smo programsko določili število kapljic in količino dežja. Rezultate smo pošiljali na računalnik serijsko preko komunikacije UART.

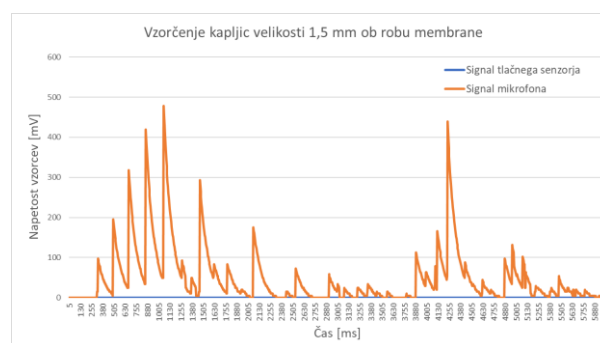
5 Meritve in rezultati

Vse meritve so bile izvedene na razliki višin približno 2 metra, kar je dovolj dobra aproksimacija končnih hitrosti dežnih kapljic. Ustvarjanje kapljic je bilo izvedeno na tri načine. Z brizgalko, ki ustvarja kapljice premera 4.5 mm, brizgalko, ki ustvarja kapljice premera 1.5 mm ter vodno cevjo z različnimi nastavki za aproksimacijo rahlega, zmernega in močnega dežja.

5.1 Občutljivost senzorskega sistema

Na podlagi meritev z brizgalkama je bila določena spodnja in zgornja meja velikosti kapljice, na podlagi katerih smo nastavili mejo detekcije in mejo nasičenja signalov. Na podlagi meritev z vodno cevjo pa je bila določena zgornja meja števila kapljic v nekem časovnem intervalu. Pri meritvah ob robu membrane je bilo potrebno upoštevati da površina membrane 4 mm od roba ni uporabna zaradi roba lijaka. To smo določili eksperimentalno.

Če sklepamo da je končna hitrost kapljic v naravi malenkost večja kot je bila hitrost kapljice (velikosti 4.5 mm) v našem eksperimentu (zaradi manjše višine), lahko določimo zgornjo mejo velikosti kapljice 4 mm. Pri velikih kapljicah ni težav z detekcijo, ne glede na to kje na membrano padejo. Iz slike 5.1 pa je razvidno, da kapljice velikosti 1.5 mm, ki padejo točno na rob membrane ustvarijo signal velikosti le nekaj mV, ki ga zazna le še mikroskop (oranžen signal). Ker podatke zajemamo z 10 bitnim AD pretvornikom, je kvant napetosti 5 mV. Zato za kapljice manjše od 1.5 mm uporabna površina membrane hitro pada.



Slika 5.1: Vzorčenje kapljic velikosti 1.5 mm ob robu membrane

Spodnje meje pogostosti kapljic praktično ni. Najmanjša možna izmerjena količina dežja je določena s časovnim intervalom shranjevanja vrednosti kapljic v algoritmu. Zgornjo mejo pogostosti kapljic pa določa časovna konstanta vršnega detektorja, ampak ni enolično določena, saj je odvisna od velikosti kapljice.

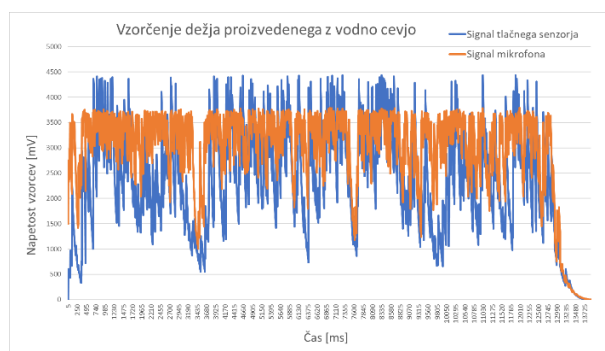
5.2 Tip membrane

Primerjani sta bili tanjša in bolj napeta membrana ter debelejša in manj napeta membrana. Ker je udarec kapljice ob membrano kot impulz, lahko izmerimo impulzni odziv membrane. Z mobilno aplikacijo Spectroid je bil določen spekter impulznega odziva za posamezno membrano. Razvidno je bilo, da tanjša in bolj napeta membrana vsebuje več harmonskih komponent, ki so bile bližje skupaj in zamaknjene proti višjim frekvencam. Debelejša in manj napeta membrana pa je vsebovala manj harmonskih komponent in pri nižjih frekvencah, kar je za posledico dalo lepši signal, katerega je bilo lažje filtrirati in zajeti.

Na meritve vpliva tudi kot lijaka oziroma membrane. Eksperimentalno je bilo določeno, da je optimalni kot membrane okoli 30° . Za kote večje od 30° postaja uporabna površina membrane precej majhna ter vrednosti signalov se znatno zmanjšajo, saj sunek sile ne deluje v smeri normale membrane. Posledica je znižanje občutljivosti detektorja. Za kote manjše od 30° pa se na membrani začnejo nabirati preveliki skupki kapljic, ki vplivajo na meritve.

5.3 Količina dežja

Na podlagi meritev s kapljicami, proizvedenimi z brizgalkami, so bile velikosti kapljic ovrednotene z napetostnimi nivoji signala. Na primeru (slika 5.2) je bilo zajetih 84 kapljic v 13,8 sekundah s povprečnim nivojem amplitude 2750 mV. Če upoštevamo polmer membrane 6 cm in s tem površino 0.011 m^2 , dobimo intenziteto 37.5 mm/h , kar je pričakovano, saj smo z vodno cevjo najverjetneje proizvajali večjo število večjih kapljic, kot pa jih je v realnem dežju, kjer so velikosti kapljic bolj raznolike.



Slika 5.2: Vzorčenje dežja proizvedenega z vodno cevjo

Algoritem za določanje količine dežja je zasnovan tako, da s pomočjo časovnika in prekinitve vzorčimo signala obeh senzorjev s frekvenco 200 Hz. V polje se shrani 256 vzorcev, nato se pa izračuna povprečje vzorcev signala tlačnega principa. Če je povprečje nad 50 mV (eksperimentalno določeno), se kliče prva funkcija, sicer se kliče druga funkcija. Obe funkciji imata enako vlogo, le da je ena za tlačni koncept, druga pa za

akustični. Funkciji na podlagi rezultatov meritev vsaki maksimalni vrednosti napetostnega signala, torej vsaki kapljici, priredita določen volumen. Nato se na podlagi trajanja vzorčenja, števila kapljic ter njihovih vrednosti določi količina dežja.

Zaključek

Predstavljeno delo prikazuje zasnovo sistema za detekcijo dežja in preliminarne rezultate detekcije ter vrednotenja količine dežja. Sama zasnova se je izkazala za delujočo in s tem je koncept potrjen. Za določitev količine dežja pa je potrebno izvesti še dodatne teste in eksperimente. Na slikah 5.1 in 5.2 je razvidno, da je senzor tlaka premalo občutljiv na rahlo deževje, signal mikrofona pa je pri močnem deževju večino časa v nasičenju, kar potrjuje odločitev o združitvi konceptov. Potrebno bi bilo nadaljevati meritve z drugačno membrano, pri kateri bi bil prehodni pojav čim krajši.

Literatura

- [1] H. X. Chen, »Design of Rain Sensor Based on Optical Principle,« Applied Mechanics and Materials. 668-669. 977-980. (2014), <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.668-669.977>
- [2] D. A. Segovia-Cardozo, C. Bernal-Basurco, L. Rodriguez-Sinobas, »Tipping Bucket Rain Gauges in Hydrological Research: Summary on Measurement Uncertainties, Calibration and Error Reduction Strategies. Sensors 2023, 23, 5385, <https://doi.org/10.3390/s23125385>
- [3] C. Clemens, A. Jobst, M. Radschun, J. Himmel, O. Kanoun, M. Quirnbach, »Development of an Inductive Rain Gauge,« Sensors, vol. 22, no. 15, p. 5486, Jul. 2022, <https://doi.org/10.3390/s22155486>
- [4] J. Marendić-Miljković, M. Tasić, S. Rajšić, Z. Vukmirović, »Precipitation onset detection with a rain sensor of improved sensitivity,« Accepted 13 June 2000, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00323-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00323-X)
- [5] N. Peleg, H. Torello-Sentelles, G. Mariethoz, L. Benoit, J. P. Leita, and F. Marra, »The Potential use of low-cost acoustic sensors to detect rainfall for short-term urban flood warnings,« Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 23, 1233-1240, 2023, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1233-2023>
- [6] E.M. Trono, M.L. Guico, N.J.C. Libatique, G.L. Tangonan, D.N.B. Baluyot, T.K.R. Cordero, F.A.P. Geronimo, A.P.F. Parrenas, »Rainfall Monitoring Using Acoustic Sensors,« <https://doi.org/10.1109/TENCON.2012.6412284>
- [7] M.L. Guico, G. Abrajano, P.A. Domer, J.P. Talusan, »Design and development of a novel acoustic rain sensor with automated telemetry,« MATEC Web of Conferences 201, 03003 (2018), <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820103003>
- [8] Vaisala RAINCAP Technology, <https://www.vaisala.com/en/vaisala-raincap-technology>
- [9] S. C. Warude, P. R. Unhale, S. P. Khandagale, A. D. Waykar, S. S. Gaonkar, »Harnessing of Kinetic Energy of Raindrops,« (2015), <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25168.66561>