

**PRIMENA MQTT PROTOKOLA U SISTEMIMA ZA MONITORING ENERGETSKIH TRANSFORMATORA****APPLICATION OF MQTT PROTOCOL IN TRANSFORMER MONITORING SYSTEMS**

Aleksandar JOVANOVIĆ, Marko NOVKOVIĆ\*, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija  
Sébastien GIRARD, Patrick PICHER, HYDRO-QUÉBEC, Quebec, Canada  
Zoran RADAKOVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija

**KRATAK SADRŽAJ**

Internet stvari (engl. *Internet of Things* – IoT) postaje sastavni deo savremene civilizacije. Grupe senzora, mikroprocesorskih ili telekomunikacionih uređaja koji razmenjuju podatke bez interakcije sa čovekom postoje kako kod jednostavnih kućnih uređaja tako i kod složenih industrijskih procesa. Zbog toga postoji potreba za korišćenjem jednostavnog i brzog komunikacionog protokola. Jedan od najrasprostranjenijih je MQTT protokol za povezivanje uređaja preko interneta, baziran na pošiljalac/pretplatnik (engl. *publisher/subscriber*) arhitekturi, inicijalno je razvijen za upotrebu u SCADA sistemima, tako da je veoma rasprostranjen u industrijskim aplikacijama.

Monitoring sistemi za transformatore omogućavaju dobijanje brojnih korisnih tehničkih informacija: procenu ostarelosti tj. utrošenog životnog veka (na osnovu temperature najtoplije tačke i sadržaja vlage u izolacionom sistemu), procenu mogućnosti preopterećenja transformatora, detekciju kvara u rashladnom sistemu itd. Za ove namene su potrebni sledeći ulazni podaci: razne temperature, opterećenje, napon, status rashladne opreme, nivo vlage, pozicija regulacione sklopke i atmosferski uslovi.

U radu je predstavljena primena MQTT protokola u okviru sistema za termički monitoring transformatora koji je baziran na detaljnom dinamičkom termo-hidrauličkom mrežnom modelu (engl. *Thermo-Hydraulic Network Model* – THNM). Proračuni THNM-a su, u pogledu potrebnih procesorskih resursa, veoma zahtevni, pa je realno da se proračuni vrše na centralizovanim mestima (npr. u dispečerskim centrima). Za uspešnu realizaciju proračuna potrebno je prikupiti veliku količinu ulaznih podataka (veliki broj senzora i mala vremenska rezolucija) zbog čega je upotrebljen MQTT protokol. Primena MQTT protokola omogućava i jednostavno prikupljanje svih merenih veličina u sistemu na jednom memorijskoj lokaciji (*cloud-u*) bez upotrebe žičnih veza, kao i dobijanje ovih i poruka o alarmima na mobilnom telefonu, računaru ili pametnom satu bilo kada i bilo gde.

**Ključne reči:** MQTT, komunikacioni protokoli, energetski transformatori, sistemi za monitoring

**ABSTRACT**

In today's world of digitalization, the Internet of Things (IoT) becomes an integral part of our lives. The groups of interrelated devices embedded with sensors, computing power and other technologies for exchanging information over a network without human-to-human or human-to-computer interaction range from simple household appliances to big industrial machines. To enable this type of communication a number of communication protocols are used. One very popular is MQTT, a lightweight, publish/subscribe, bi-directional protocol for connecting devices over the internet. The MQTT is originally developed for use within the SCADA systems, therefore it is widespread in industrial applications.

The benefits of power transformers monitoring are numerous: loss of life estimation (based on the measured or calculated hot-spot temperature, and measured moisture content), estimation of overload capability, cooling system fault detection, etc. The data needed to implement computational methods are: different temperatures, load, voltage, cooling equipment status, moisture, tap changer position, and atmospheric conditions.

The paper presents the application of MQTT protocol in the scope of the thermal monitoring application based on the detailed dynamic Thermo-Hydraulic Network Model (THNM). The computations of THNM are complex and it is expected that the concept for running them for all transformers positioned remotely over the grid is on a central computer in the dispatching centre. The effective way to obtain input data (from a number of sensors and with small time resolution) is using the MQTT protocol. The MQTT protocol enables effective collection of the field measurements for all transformers on one cloud location without any wire connection or getting measurements or alarm notifications on mobile phone or computer or smartwatch anytime or anywhere.

**Key words:** MQTT, communication protocols, power transformers, monitoring systems

Aleksandar Jovanović, Marko Novković, Zoran Radaković, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Laboratorija 89, 11000 Beograd, tel: 011 3218 339, jovanovic@hostcalculus.com, novkovic@etf.rs, radakovic@etf.rs, Patrick Picher, Sebastien Girard, HYDRO-QUÉBEC, Quebec, Canada, Girard.Sebastien8@hydroquebec.com, picher.patrick@hydroquebec.com

\* Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, novkovic@etf.rs

## 1. UVOD

### 1.1 Opterećivanje energetskih transformatora

Energetski transformatori su jedan od osnovnih gradivnih elemenata elektroenergetskog sistema. Oni rade u uslovima promenljivog opterećenja i temperature ambijenta, koji prouzrokuju i promene temperature različitih delova transformatora. Povećanje temperature dovodi do degradacije (starenja) materijalna, pre svega čvrste izolacije. U slučajevima kada ove temperature dostižu veoma visoke vrednosti, može doći i do trenutnog oštećenja, kvara transformatora i njegovog ispada iz pogona. Za svaku klasu izolacije definisane su kritične vrednosti temperature koje se ne smeju preći.

U pojedinim transformatorima, naročito onim značajnijim, koriste se sistemi za nadzor, kojima se prikupljaju vrednosti karakterističnih temperatura (jedna od njih može biti i temperatura najtoplije tačke izolacije namotaja, merena fiber-optičkim senzorima), vrši njihova vizualizacija i prikaz operaterima/dispečerima. Pored ovoga, sistemi za monitoring mogu imati i naprednije opcije, poput proračuna ostarelosti izolacije, ili procene mogućeg preopterećenja transformatora tokom njegove eksploatacije. U ovom slučaju potrebni su i dodatni ulazni podaci, poput sadržaja vlage u čvrstoj izolaciji, stanja uključenosti elemenata rashladnog sistema, a ukoliko ne postoji merenje temperature u najtoplijoj tački izolacije, potrebni su i podaci o ambijentalnim uslovima i opterećenju. Za primenu sofisticiranijih i tačnijih proračunskih metoda, potrebni su i podaci o poziciji regulacione sklopke i naponu na priključcima transformatora. Dakle, svi ovi podaci se prikupljaju i prenose do računarskog sistema na kome se vrše termički proračuni i vizuelizacija dobijenih rezultata.

### 1.2 Mogućnosti za termičke proračune

Postoji praktična potreba za proračunima temperature tokom prelaznih termičkih procesa, kao što je objašnjeno u poglavlju 1.1.

Imajući u vidu praktične aspekte u fazi projektovanja i u sistemima za monitoring tokom rada transformatora, detaljni termo-hidraulični mrežni model predstavlja optimalni pristup za proračun temperatura u uljnim energetskim transformatorima, kako u ustaljenom stanju, tako i tokom prelaznih procesa (za ove dinamičke termičke modele će se koristiti skraćenica detaljni DTHNM). Glavna prednost detaljnog THNM-a u odnosu na CFD (engl. *Computational Fluid Dynamics*) proračune je njegova mogućnost primene na trenutno dostupnim računarima (bez primene superkompjutera), naročito u slučaju sistema za monitoring. Takođe, prednost u odnosu na CFD je robustniji metod rešavanja jednačina modela i manje problema sa konvergencijom. Dubina zalaženja u konstrukciju, kao i uvažavanje uticaja karakteristika materijala na raspodelu temperature unutar transformatora veoma su visoki kod primene detaljnih THNM modela. Zbog toga izrada ovakvih modela, odnosno njihova softverska implementacija predstavljaju kompleksan i obiman poduhvat, pri čemu je glavni izazov postavljanje i rešavanje sistema nelinearnih jednačina koje opisuju prenos toplote i hidrauliku. Detaljni THNM je potrebno graditi „od dna ka vrhu“ tj. potrebno je uspostaviti i rešiti mreže za svaki od delova (namotaji, jezgro, rashladni sistem itd.), a zatim globalnu hidrauličku mrežu i rešiti je. Softveri bazirani na detaljnim THNM-ima su danas dostupni (npr. za „core type“ transformatore [1], gde je osnova modela prikazana u [2], ili za „shell type“ transformatore [3]). Rezultat primene detaljnog THNM-a je globalna raspodela protoka ulja i temperatura ulja na ulasku i izlasku u delove transformatora (namotaje, jezgro, rashladnu opremu itd.). Pored toga, kao rezultat, dobija se i detaljna raspodela temperature (npr. temperatura u svakom provodniku namotaja, ili temperatura ulja u svakom od rashladnih kanala).

### 1.3 Ulazni podaci potrebni za termički proračun

Skup podataka koji je potrebno prikupiti za monitoring sistem koji obuhvata primenu detaljnog THNM-a, kao i procenu ostarelosti je:

1. Temperatura ambijenta,
2. Temperatura vode (za slučaj da se primenjuje razmenjivač toplote ulje-voda),
3. Opterećenje svakog namotaja (primar, sekundar, tercijar...),
4. Napon,
5. Pozicija regulacione sklopke,
6. Stanje uključenosti rashladne opreme (pumpe, ventilatori, kompaktni hladnjaci/radijatori),
7. Količina padavina (kiša/sneg),
8. Brzina i smer vetra,
9. Solarna iradijansa, kao i azimutni i inklinacioni ugao,
10. Temperature merene pomoću ugrađenih optičkih senzora (gornje ulje, donje ulje i za svaki od namotaja temperatura najtoplije tačke izolacije i temperatura ulja na izlasku iz namotaja).

## 1.4 Sistem za akviziciju podataka

U radu je predstavljen MQTT protokol (engl. *Message Queuing Telemetry Transport*) baziran na pošiljalac/pretpatnik (*publisher/subscriber*) strukturi. MQTT protokol predstavlja veoma jednostavan i efikasan načina za razmenu podataka između uređaja preko interneta, čak i u slučaju nepouzdanih mreža, sa malim protokom i/ili velikim kašnjenjem u komunikaciji. Ove karakteristike čine protokol idealnim za primenu u IoT (engl. *Internet of Things*) aplikacijama, kao i svim ostalim aplikacijama u kojima postoje ograničenja u pogledu brzine internet komunikacije, procesorskih resursa i upotrebe baterije [4].

## 2. MQTT

### 2.1 Osnovne informacije o MQTT protokolu

MQTT je OASIS (engl. *Organization for the Advancement of Structured Information Standards*) standard za IoT [5]. MQTT su stvorili *Andy Stanford-Clark* (u to vreme radio u IBM-u) i *Arlen Nipper* (u to vreme radio u *Arcom*- u (*Eurotech* danas)) 1999. godine. Protokol je nastao iz potrebe da se omogući konekcija sistema za praćenje stanja naftovoda i gasovoda. Ovi sistemi se uglavnom postavljaju na veoma udaljenim mestima sa veoma lošom ili nikakvom komunikacijom. Jedini mogući način da se ovo ostvari, u tom trenutku, bila je komunikacija pomoću satelita. Ova usluga se tada naplaćivala po količini prenetih podataka, što je u slučaju komunikacije sa više hiljada takvih uređaja predstavljalo veliki trošak. Zbog toga je bilo potrebno napraviti komunikacioni protokol koji će omogućiti dovoljno pouzdan prenos podataka sa optimalnom količinom podataka. Dakle, MQTT je nastao kao privatni protokol, ali je 2010. otvoren za javnost (postao je „*Royalty free*“), a 2014. je postao i OASIS standard (obe verzije koje su u upotrebi (3.1.1 i 5.0), dok je rasprostranjenija verzija 3.1.1 usvojena i od strane ISO (engl. *International Organization for Standardization*)).

### 2.2 Arhitektura

Kao što je već rečeno u poglavlju 1.4, MQTT koristi pošiljalac/pretpatnik strukturu. U ovoj strukturi postoje dva tipa uređaja – brokeri i klijenti.

Glavni zadaci brokera su: prijem svih poruka, filtriranje primljenih poruka, odlučivanje koji klijenti su „zainteresovani“ za prijem tih poruka, i slanje poruka „zainteresovanim“ klijentima. Brokeri su u suštini serveri koji omogućavaju komunikaciju između različitih klijenata tj. sva komunikacija mora da ide preko brokera, dok klijenti međusobno ne komuniciraju. Na ovaj način je moguće efikasno dostaviti različite poruke velikom broju klijenta tako da svaki klijent dobije samo one poruke koje su mu namenjene, uz efikasno korišćenje komunikacionih kapaciteta tj. prenete količine podataka (ovo je veoma bitno u slučaju mreža sa nekoliko hiljada uređaja). Klijenti mogu imati ulogu pošiljaoca (onog koji šalje neki podatak), pretpatnika (onog koji prima neke podatke) ili obe. Dakle, klijenti su oni uređaji (od najsitnijeg mikrokontrolera/senzora, pa sve do servera) na kojima je pokrenuta MQTT biblioteka koja omogućava konekciju sa brokerom putem interneta.

Postoje gotova programska rešenja koja olakšavaju upotrebu MQTT-a i kreiranje aplikacija. Dok je programiranje klijenata relativno jednostavno, kreiranje brokera je mnogo zahtevnije i zbog toga se uglavnom koriste gotova rešenja (najpoznatiji *Eclipse Mosquitto*, *HiveMQ* i *EMQ*).

Sve poruke u MQTT-u se razmenjuju kao teme (engl. *topics*). Teme su hijerarhijske struktura sa „/“ kao razdelnikom (slično kao web adrese ili adrese foldera u računarima) – npr. „senzor/TransformatorskaStanica1/Temperaturata“. Ove strukture omogućavaju pretpatnicima da izaberu koje podatke tačno žele da dobijaju – npr. sve poruke objavljene na temu „Temperatura“ ili sve poruke koje stižu sa jedne transformatorske stanice „senzor/TransformatorskaStanica1“. Teme ne predstavljaju konačno definisane strukture – ako broker dobije poruku objavljenu u temi koja ne postoji, nova tema će biti kreirana, posle čega će svi klijenti moći da se pretplate na tu temu.

Kako bi se optimizovala komunikacija koriste se male poruke sa definisanim strukturama. Svaka poruka ima definisano zaglavlje (engl. *header*), čiji prvi bajt sadrži vrednosti logičkih promenljivih za konfigurisanje komunikacije, a u nastavku slede jedan do tri bajta, u kojima se navodi dužina poruke. Ostatak je sadržaj same poruke i njegova veličina može biti do 256MB. Struktura same poruke nije definisana protokolom, već je definiše korisnik (može biti binarna, tekstualna, ili čak potpuno struktuirana (XML ili JSON)).

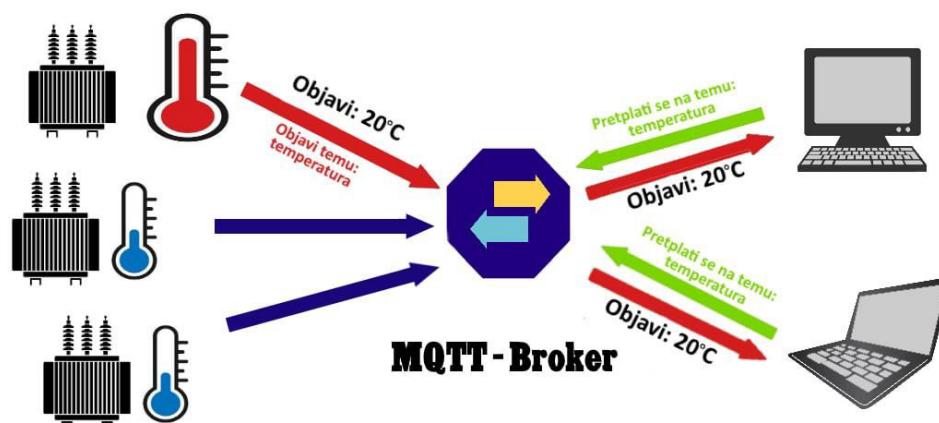
Kako bi optimizovala upotrebna raspoloživih računarskih resursa i dostupne internet komunikacije, definisane su samo četiri operacije koje može da izvrši klijent: objavi (PUBLISH) set podataka (poruku), pretplati se (SUBSCRIBE) na temu, PING – klijent periodično šalje brokeru poruku na koju očekuje odgovor kako bi se proverilo da li veza između njih postoji, odjavi se (DISCONNECT) sa mreže tj. brokera.

### 2.3 Primer MQTT arhitekture

Posmatra se jedan uređaj koji u sebi sadrži senzor za merenje temperature i nalazi se na nekoj udaljenoj lokaciji. Potrebno je temperaturu koju meri taj senzor poslati na server, kako bi je sačuvali u bazi podataka. Takođe, potrebno je poslati tu temperaturu i jednom računaru, kako bi on mogao da je obradi. Na drugoj strani postoje server i računar, kojima je potrebno dostaviti ovu temperaturu. Dakle, uređaj sa senzorom biće klijent sa ulogom pošiljaoca, dok će server i računar biti klijenti sa ulogom pretplatnika.

**2.3.1 Uspostavljanje veze klijent-broker** – Prvi korak je odluka koji će broker biti korišćen. Postoji puno brokera (komercijalnih ili javno dostupnih), sa svojim različitim prednostima i manama, koje je moguće koristiti. Neki su pogodni za male i jednostavne aplikacije, dok su neki pogodni za kreiranje velikih industrijskih aplikacija. Ovo je vezano sa mogućnošću skaliranja sistema (koji resursi su dostupni, koliko će biti klijenata i da li će u budućnosti postojati potreba za povećanjem broja klijenata) i bezbednosnim zahtevima (kako se vrši autentifikacija novih klijenata i da li postoji potreba za enkripcijom poruka). Naravno, postoji mogućnost i razvoja privatnog brokera, ali to zahteva veoma detaljno poznavanje sistema i zbog toga se veoma retko radi. Nakon toga potrebno je povezati sve klijente (senzor, server i računar u posmatranom primeru) sa brokerom. Proces povezivanja počinje tako što klijent šalje CONNECT poruku brokeru. Ova poruka sadrži sve podatke neophodne za uspostavljanje veze. Postoje tri obavezna podatka: 1) identifikator klijenta (broj koji klijent šalje brokeru prilikom konekcije, a koji broker koristi za identifikaciju klijenta i proveru statusa veze klijent-broker), 2) logička promenljiva koja govori brokeru da li je sesija koja se uspostavlja trajna (vrednost promenljive netačno) ili nije (vrednost promenljive tačno) – pogledati 6. tačku u poglavlju 2.4 i 3) najduži vremenski interval u sekundama tokom kojeg je moguće da klijent i broker ne razmene ni jednu poruku (klijent mora redovno da šalje PING poruku na koju broker mora da odgovori, kako bi se proverilo postojanje veze između njih). Opcione informacije su: 1) korisničko ime i lozinka za autentifikaciju koji klijenti mogu da primaju poruke sa ovog klijenta, pored tačne teme na koju su se pretplatili (kao dodatni vid zaštite) i 2) podaci potrebni za realizaciju opcije „Poslednja želja i testament“ – pogledati 8. tačku u poglavlju 2.4. Broker na CONNECT poruku odgovara sa CONNACK porukom, koja sadrži logičku promenljivu sa informacijom da li informacije o vezi već postoje tj. da (trajna sesija) i povratni informaciju o uspostavljanju veze (da li je uspostavljena ili nije, i ako nije zbog čega nije). Kada se jednom uspostavi veza, broker je održava otvorenom sve dok klijent ne pošalje poruku da želi da se odjavi ili dok ne dođe do prekida internet veze.

**2.3.2 Objavljivanje poruke** – Kada se komunikacija između brokera i klijenta uspostavi, klijent (temperaturni senzor u primeru) može odmah da počne da objavljuje poruke (one se nazivaju PUBLISH poruke). Sadržaj jedne PUBLISH poruke je sledeći: 1) identifikator poruke – služi brokeru da na jedinstven način identifikuje poruku (koristi se samo u slučaju nivoa pouzdanosti većeg od 0 – pogledati tačku 5. u poglavlju 2.4), 2) temu („temperatura“ u primeru), 3) nivo pouzdanosti, 4) logičku promenljivu da li je poruku potrebno zadržati (pogledati tačku 7. u poglavlju 2.4), 5) sadržaj poruke (izmerenu temperaturu u primeru) i 6) logičku promenljivu da li je poruka duplikat prethodno poslate poruke (bitno za nivo pouzdanosti veće od 0). Nakon što broker primi PUBLISH poruku, obrađuje je i na osnovu teme distribuira svim klijentima koji su pretplaćeni na tu temu (u primeru su to server i računar). Ovaj proces je ilustrovan na Slici 1.



Slika 1 – Ilustracija komunikacije između senzora i servera/računara

**2.3.3 Pretplata na temu** – Preostali klijenti (server i računar) su pretplatnici. Dakle, potrebno je da se pretplate na neke teme kako bi mogli da dobijaju poruke. U primeru, oni se prijavljuju na temu „temperatura“. Proces pretplaćivanja počinje tako što klijent pošalje SUBSCRIBE poruku brokeru. Ova poruka sadrži identifikator (kao i PUBLISH poruka) i listu tema na koje želi da se prijavi, kao i nivo pouzdanosti sa kojim je potrebno te poruke

dostaviti. Na ovu poruku broker odgovara sa SUBACK porukom koja, takođe, sadrži identifikator, kao i listu odgovora o uspešnosti prijavljivanja na svaku od zahtevanih tema. Nakon uspešne pretplate na temu, klijent dobija sve poruke objavljene u ovoj temi sve dok ne otkaže pretplatnu na nju. Ovaj proces je veoma sličan procesu pretplaćivanja (UNSUBSCRIBE i UNSUBAC poruke).

## 2.4 Glavne karakteristike MQTT protokola

MQTT protokol je postao defakto standard za razmenu poruka u IoT aplikacijama. Karakteristike MQTT-a koje ga čine idealnim za ovu namenu su [6]:

1. Jednostavnost i efikasnost – MQTT klijenti su veoma mali (sa stanovišta zauzimanja memorijskog prostora) i zahtevaju veoma malo računarskih resursa. Zbog toga su idealni za implementaciju na mikrokontrolerima i mogu se koristiti u oblastima sa veoma lošom internet komunikacijom.
2. Protokol baziran na događajima – klijenti objavljuju poruke samo kada postoji informacija koju je potrebno poslati, a brokeri objavljuju poruke pretplatnicima samo kada stigne nova poruka. Ne postoji periodično (objavljivanje iste poruke) ili kontinuirano objavljivanje podataka. Ovo optimizuje količinu komunikacije između uređaja i potrebne resurse.
3. Dvosmerna komunikacija – klijenti mogu biti pošiljaoci i pretplatnici tj. moguće je slati poruke sa uređaja na server i sa servera na uređaje. Ovo je veoma korisno kada je potrebno proslediti istu poruku velikom broju različitih uređaja.
4. Mogućnost priključenja velikog broja različitih uređaja, pri čemu je jednostavno naknadno povećanje broja uređaja.
5. Pouzdanost dostavljanja poruka – u mnogim IoT aplikacijama (posebno industrijskim) pouzdanost dostavljanja poruka je veoma bitna. Zbog toga su u MQTT-u definisana tri nivoa pouzdanosti (engl. *Quality of Service* – QoS): 0 – najviše jednom – najniži nivo pouzdanosti, ne postoji garancija da će poruka biti dostavljena (često se naziva „ispali i zaboravi“), 1 – bar jednom – poruka će sigurno biti dostavljena bar jednom, ali postoji mogućnost da bude dostavljena i više puta i 2 – tačno jednom – najviši nivo pouzdanosti, poruka će sigurno biti dostavljena tačno jednom, najbezbedniji i najsporiji nivo pouzdanosti.
6. Podrška za nepouzdate mreže – MQTT poseduje opciju koja se naziva trajna sesija (engl. *persistent session*) koja omogućava čuvanje podataka o konekciji između klijenta i brokera (identifikator klijenta i teme na koje je pretplaćen) ukoliko dođe do prekida komunikacije, tako da se ponovno uspostavljanje komunikacije može obaviti mnogo brže nego kada je ona prvi put uspostavljena. Ovo podešavanje je opciono i ukoliko nije izabrano, nakon prekida veze svi podaci o klijentu se brišu.
7. Zadržane poruke (engl. *retained messages*) – kada se klijent pretplati na novu temu, ne postoji podatak kada će nova poruka biti poslata tj. kada će pretplatnik dobiti prve podatke. Broker može da sačuva poslednju poslatu poruku tako da kada se klijent pretplati odmah može da dobije tu poruku tj. klijent će dobiti bar jednu poruku sa podacima i može odmah početi sa njihovom upotrebom.
8. Poslednja želja i testament (engl. *Last Will and Testament* - LWT) – klijenti mogu da specificiraju poruku koju će broker poslati svim ostalim klijentima u slučaju neplaniranog isključenja klijenta sa mreže. Ovo može biti korisno za programiranje raznih opcija u IoT aplikacijama.
9. Sigurnost – sve poruke su kriptovane koristeći TLS protokol, a klijenti se autorizuju koristeći različite moderne protokole za autentifikaciju (npr. OAuth).

## 2.5 Neki od korisnika

MQTT se danas koristi u velikom broju različitih kućnih i industrijskih aplikacija. Neke od njih su [7]:

- Auto industrija [8] i IoV [9],
- Logistika [10],
- Proizvodnja [11] i [12],
- Pametne kuće – sigurnosni sistem [13] i linija pametnih kuhinjskih uređaja [14].

### 3. Primena MQTT protokola u sistemu za termički monitoring

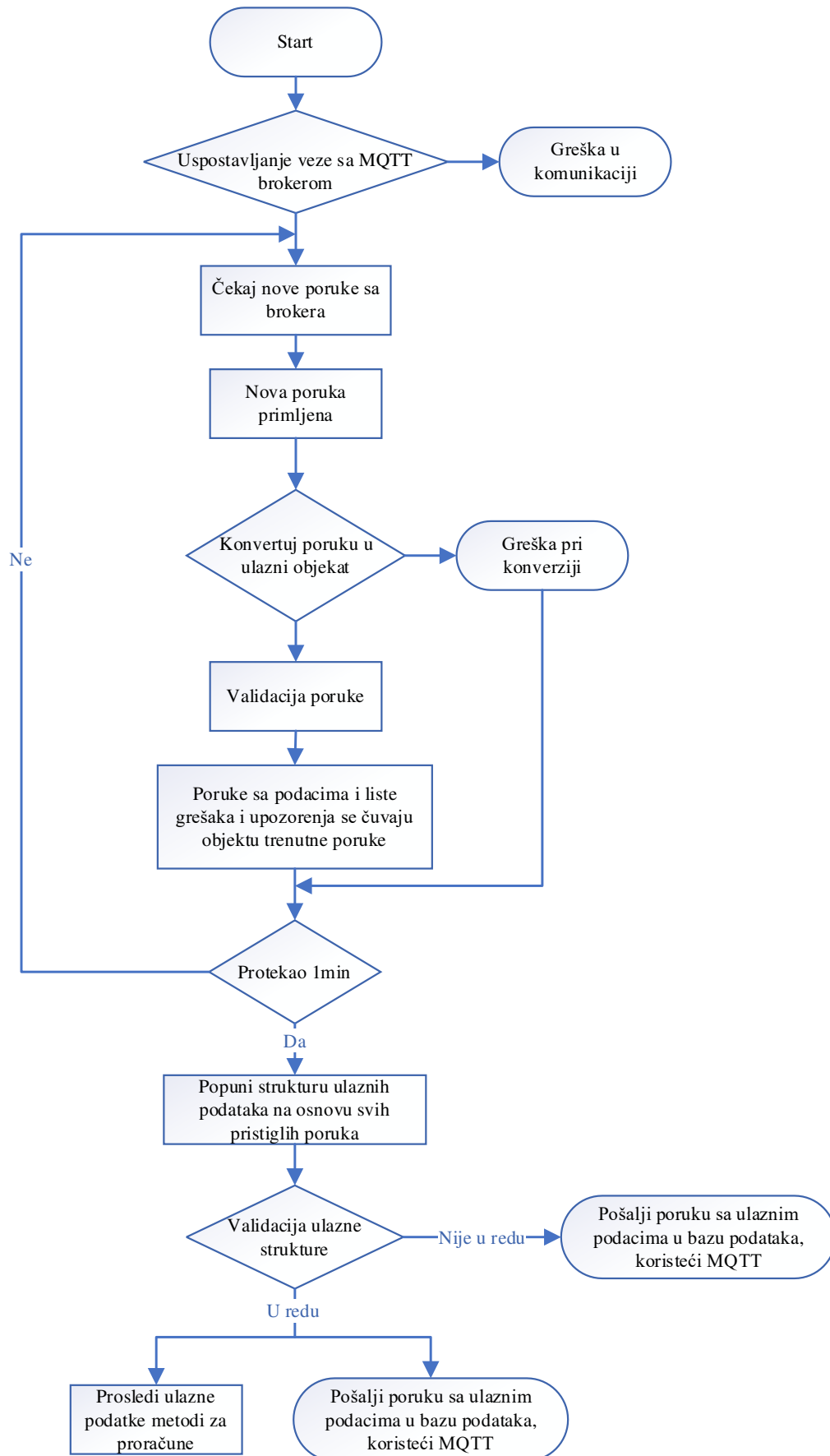
Tokom razvoja aplikacije za termički monitoring transformatora, bazirane na detaljnom DTHNM-u, pojavilo se pitanje kako na efikasan način prikupiti sve potrebne ulazne podatke. Kao što je opisano u poglavlju 1, skup ulaznih podataka može biti relativno veliki, a podatke je potrebno prikupiti sa veoma malom vremenskom rezolucijom. Usvojena je vrednost vremenske rezolucije od jednog minuta. Ovo je određeno potrebom da aplikacija sadrži mogućnost za detekciju maksimalne vrednosti temperature najtoplije tačke, kao i ukupne ostarelosti (koja od temperature najtoplije tačke zavisi eksponencijalno) tokom čitavog perioda eksploatacije transformatora. Potrebno je veoma često izvršavati zahtevne proračune detaljnog DTHNM-a za veliki broj transformatora, sa još većim brojem senzora sa kojih je potrebno prikupiti podatke, koji mogu da budu postavljeni na veoma udaljenim lokacijama. Proračuni se mogu izvršavati na centralnom serveru (npr. u dispečerskom centru) ili distribuirano na više računara postavljenih na različitim lokacijama (a da se samo rezultati proračuna šalju na centralni server). U oba slučaja, postojaće veoma intenzivna razmena poruka između senzora i računara na kojima se proračuni izvršavaju. MQTT je veoma pogodan za korišćenje u oba slučaja. Imajući sve ovo u vidu, kao i sve osobine MQTT-a prikazane u poglavlju 2, nameće se zaključak da je MQTT optimalno rešenje za prikupljanje potrebnog seta ulaznih podataka.

Na Slici 2 prikazan je dijagram toka koji ilustruje kako je MQTT protokol implementiran u aplikaciju za termički monitoring. Aplikacija (klijent) se prvo konektuje na MQTT broker i pretplaćuje se na definisane teme (temperature, struje, naponi itd.). Poruke sa različitih senzora (za jedan transformator) mogu stizati u različitim trenucima i sa različitim učestanošću. Sve poruke koje stignu tokom jednog minuta se validiraju. Ukoliko tokom ovog jednogminutnog intervala stigne više validnih poruka za isti podatak, samo se poslednja koristi. Naredni korak, nakon isteka jednog minuta, je prikupljanje svih pristiglih podataka i provera da li su tokom validacije generisane greške ili upozorenja. Ukoliko postoje greške u podacima neophodnim za izvršenje proračuna, ili ukoliko neki od njih uopšte nisu pristigli, ulazni podaci se neće proslediti na dalju obradu i proračun se prekida. Slično, ukoliko postoje upozorenja u podacima bez kojih se može izvršiti proračun bez velike greške, upozorenje se prijavljuje korisniku, dok se proračun nastavlja.

### 4. Prikaz prikupljenih podataka u razvijanoj aplikaciji

Razvijena aplikacija za termički monitoring se (kao pretplatnik) povezuje sa tri temperaturna senzora (koji mere temperaturu ambijenta, gornjeg ulja i najtoplije tačke namotaja) i jednim strujnim senzorom (kao pošiljaocima), postavljenim na jedan transformator (slika 3), koristeći Eclipse Mosquitto MQTT broker. Tri sedmodnevna perioda rezultata merenja su prikazana na Slikama 4 – 6.

Temperatura najtoplije tačke izolacije je merena fiber optičkim vlaknima postavljenim u aksijalni odstožnik između diskova na vrhu namotaja. Fiber-optički senzori su povezani na adekvatni višekanalni uređaj za monitoring [15]. Temperature ambijenta i ulja u termometarskom džepu su merene otporničkim senzorima. Za merenje struje je korišćen strujni merni transformator. Za merenje temperature termootpornicima i merenje struje, korišćeni su merni pretvarači sa izlazom jednosmerne struje 4 – 20 mA, što predstavlja standardnu opremu u sistemima za nadzor transformatora. Podaci su tokom rada transformatora na mreži prikupljeni na *data logger*. Internet veza je ostvarena preko mreže mobilne telefonije (GSM modem). Podaci prikupljeni tokom tri perioda, svaki dužine 7 dana, prikazani su na slikama 4 do 6.

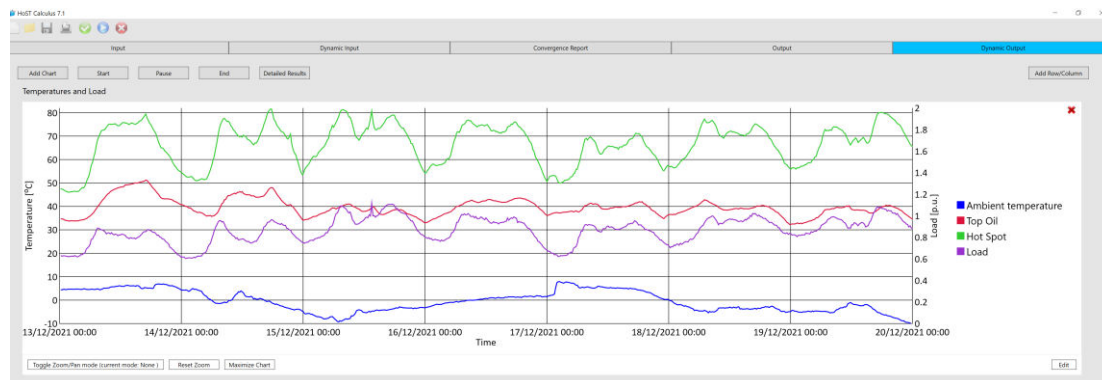


Slika 2 – Dijagram toka implementacije MQTT protokola u aplikaciji za termički monitoring



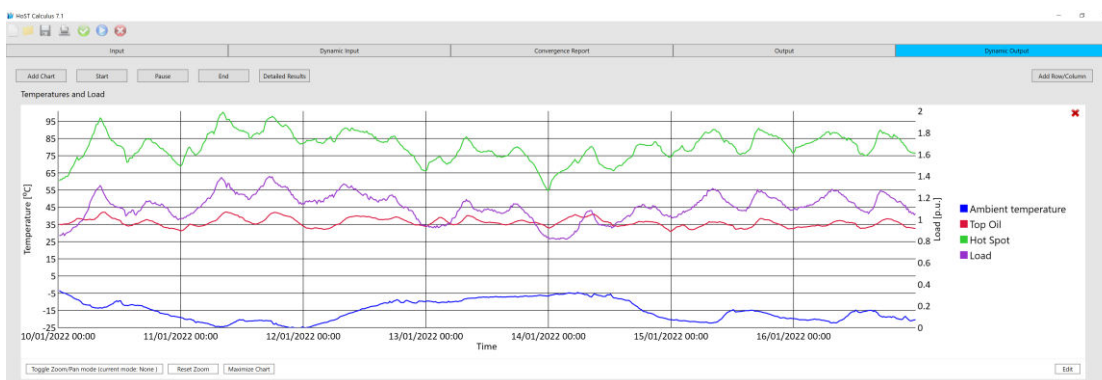
Slika 3 – Transformator koji je predmet monitoringa

Period od 13.12.2021. u 0:00h do 20.12.2021. u 0:00h, kada je izmerena minimalna temperatura najtoplije tačke izolacije (46,4°C), prikazan je na Slici 3 (ostale vrednosti u tom trenutku bile su: gornje ulje 33,8°C, ambijent 4,7°C, opterećenje 0,62 r.j.).



Slika 4 – Dijagram promene temperatura i opterećenja u periodu 13.12.2021. 0:00h – 20.12.2021. 0:00h

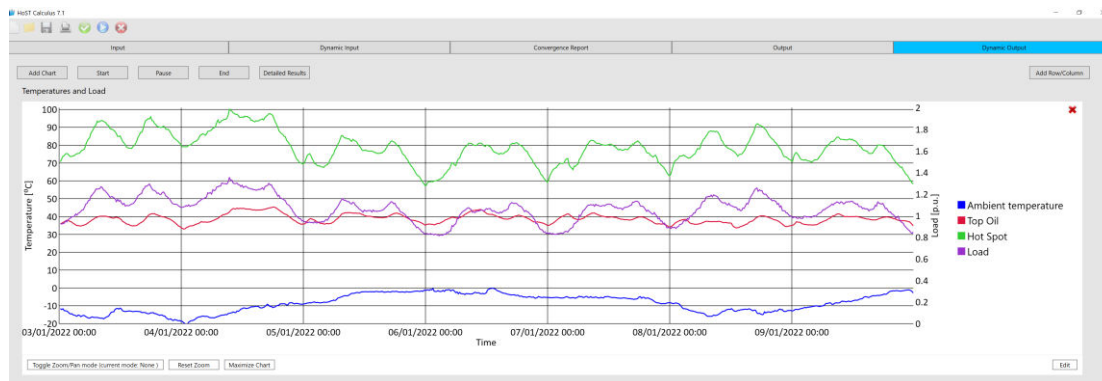
Period od 10.1.2022. u 0:00h do 17.1.2022. u 0:00h, kada je izmereno maksimalno opterećenje (1,38 r.j.), prikazan je na Slici 4 (ostale vrednosti u tom trenutku bile su: gornje ulje 41,3°C, ambijent -24,5°C, najtoplija tačka 100,1°C.).



Slika 5 – Dijagram promene temperatura i opterećenja u periodu 10.1.2022. 0:00h – 17.1.2022. 0:00h



Period od 3.1.2022. u 0:00h do 10.1.2022. u 0:00h, kada je izmerena maksimalna temperatura najtoplije tačke izolacije (100,8°C), prikazan je na Slici 5 (ostale vrednosti u tom trenutku bile su: gornje ulje 42,9°C, ambijent -14°C, opterećenje 1,34 r.j.).



Slika 6 – Dijagram promene temperatura i opterećenja u periodu 3.1.2022. 0:00h – 10.1.2022. 0:00h

Najveća temperatura tokom tronedeljnog perioda merenja je dostigla 100,8°C, što je vrednost bliska nominalnoj vrednosti temperature 98°C za primenjenu klasu izolacija. Iako je maksimalna vrednost opterećenja značajno prevazišla nominalnu, temperatura najtoplije tačke nije bila kritična, a starenje u tom trenutku nije bilo značajno ubrzano, zbog niske temperature ambijenta (-14°C).

## 5. Zaključak

U radu je predstavljena primena MQTT komunikacionog protokola u aplikaciji za termički monitoring energetskih transformatora. MQTT je danas jedan od standardnih protokola u IoT aplikacijama. Dat je skup ulaznih podataka potrebnih za proračune u aplikaciji za termički monitoring uljnih energetskih transformatora, baziranoj na detaljnom dinamičkom termo-hidrauličkom mrežnom modelu. Rezultate merenja sa velikog broja različitih senzora potrebno je prikupljati sa relativno malom vremenskom rezolucijom (1min). Lokacije na kojima su postavljeni transformatori mogu biti veoma udaljene i sa lošom komunikacijom.

Primer aplikacije bazirane na primeni MQTT protokola prikazan je u radu. U sklopu aplikacije urađen je i grafički korisnički interfejs, i u radu su dati primeri dijagrama promene veličina mernih pomoću četiri senzora, postavljenih na realnom transformatoru.

Primena detaljnog dinamičkog termo-hidrauličkog modela predstavlja moderni optimalni pristup dinamičkim termičkim proračunima transformatora uronjenih u izolacionu tečnost. Početne analize i razvoj su pokazale da je njegov razvoj moguć, ali prilično zahtevan i realno je očekivati će za razvoj relevantnih detalja u modelu trajati izvesno vreme. Jedna od komponenti u primeni ovog modela na transformatore koji su u radu na mreži je prikupljanje potrebnih ulaznih podataka. MQTT je standardni IoT komunikacioni protokol i pogodan je za prikupljanje ovih podataka. U ovom radu je opisan razvoj koji smo ostvarili u vezi sa temom prikupljanja ulaznih podataka i njihovom vizuelizacijom.

## LITERATURA

- [1] <https://www.hostcalculus.com> (Last checked: 23.05.2022.)
- [2] Radakovic Z, Sorgic M. Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers. IEEE Trans. on Power Delivery 2010., vol. 25, No. 2, pp. 790-802.
- [3] Campelo H. FluSHELL – A Tool for Thermal Modelling and Simulation of Windings for Large Shell-Type Power Transformers. Springer International Publishing, 2018.
- [4] <https://mqtt.org> (Last checked: May 9, 2022)
- [5] [https://www.oasis-open.org/committees/tc\\_home.php?wg\\_abbrev=mqtt](https://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=mqtt) (Last checked: May 9, 2022)
- [6] <https://www.hivemq.com/mqtt/mqtt-protocol> (Last checked: May 9, 2022)
- [7] <https://mqtt.org/use-cases> (Last checked: May 9, 2022)
- [8] <https://www.hivemq.com/case-studies/bmw-mobility-services/> (Last checked: May 9, 2022)
- [9] <https://www.emqx.com/en/blog/emqx-in-volkswagen-iov> (Last checked: May 9, 2022)
- [10] <https://www.hivemq.com/case-studies/matternet> (Last checked: May 9, 2022)
- [11] <https://www.bevywise.com/blog/iot-success-stories-mqtt-broker-celikler-holding/> (Last checked: May 9, 2022)
- [12] <https://www.hivemq.com/case-studies/daimler/> (Last checked: May 9, 2022)
- [13] <https://www.bevywise.com/blog/iot-home-security-system-mqtt-broker/> (Last checked: May 9, 2022)

[14] <https://www.hivemq.com/case-studies/caso/> (Last checked: May 9, 2022)

[15] <https://www.neoptix.com/index.asp> (Last checked: May 9, 2022)