

10. КВАЛИТЕТ НА ЕЛЕКТРИЧНАТА ЕНЕРГИЈА

Основна задача на електроснабдувањето е испорака на електрична енергија на потрошувачите со определен квалитет. Квалитетот на електричната енергија се огледа во постигање на:

- работа на системот со константна фреквенција,
- континуитет во испораката на електричната енергија,
- квалитет на напонот.

Во оваа глава ќе стане збор само за третата категорија на квалитет, т.е. за **квалитетот на напонот**.

Секој електричен уред е предвиден да работи со напон кој може и да се разликува од неговата номинална вредност, но **секое отстапување на напонот** од номиналниот, неповолно **се одразува** или **врз квалитетот** на неговата работа или врз **неговиот животен век**. Значи, секој потрошувач што работи со напон што се разликува од неговата номинална вредност е, поради тоа, помалку или повеќе **оштетен**.

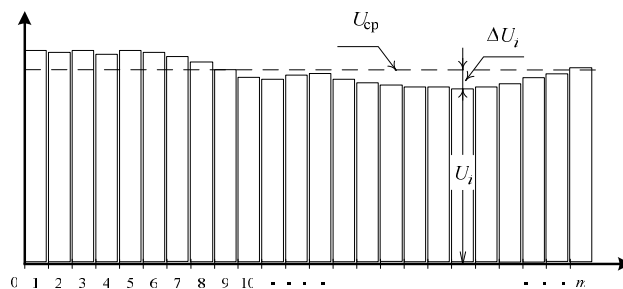
Анализата на овој проблем во многу земји од светот довела до заедничка констатација дека секој kWh, испорачан на еден потрошувач под напон U којшто се разликува од неговата номинална вредност U_n за износ ΔU , предизвикува кај потрошувачот **штета** која ќе биде пропорционална на отстапувањето ΔU^2 . Ако притоа напонот уште и варира во текот на денот, штетите од нерегуларноста на напонските прилики ќе бидат уште поголеми.

Истражувањата во Франција (Electricité de France – EdF) покажале дека, глобално гледано, за дистрибутивниот конзум, ако на потрошувачите им се испорачува електрична енергија под напон кој е за **5%** понизок од номиналниот, кај нив се предизвикуваат штети чија големина ќе изнесува околу **12,5%** од вредноста на преземената електрична енергија. Ако притоа напонот уште и се колеба околу наведената вредност за 5% (што значи дека напонот ќе биде понекогаш и за 10% помал од номиналниот), штетите ќе бидат двојно поголеми.

Штетите кај **индустриските потрошувачи** поради нерегуларните напонски прилики се најчесто уште поголеми.

Мерила за квалитетот на напонот во некоја точка од мрежата се :

- **средната вредност на напонот U_{cp} ,**
- **средноквадратното отстапување на напонот σ .**



Слика 10.1. Варијација на напонот во текот на денот (дневен дијаграм на напонот)

Овие две големина можат да се пресметаат со помош на изразите (10.1) и (10.2), врз основа на познатиот дневен дијаграм на напонот во посматраната точка (слика 10.1).

$$U_{cp} = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_m}{m} = \sum_{i=1}^m \frac{U_i}{m}, \quad (10.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta U_1^2 + \Delta U_2^2 + \Delta U_3^2 + \dots + \Delta U_m^2}{m-1}} \approx \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(U_i - U_{cp})^2}{m}}. \quad (10.2)$$

Општо прифатениот **критериум за квалитет на напонот** може да се формулира на следниот начин.

Во текот на 95% од времето на работа напонот кај потрошувачот треба да се наоѓа во интервалот од $0,95 \cdot U_n$ до $1,05 \cdot U_n$, а само во 5% од времето на работа се дозволува пречекорување на гореспоменатите граници.

Отстапувањето на напонот U од неговата номинална вредност U_n во границите $0,95 \cdot U_n < U < 1,05 \cdot U_n$ во нормални услови на работа може да се смета за технички допуштено за поголемиот број електрични приемници. Сепак, и вака малите отстапувања на напонот предизвикуваат кај нив штети кои делумно ќе бидат опишани во наредниот дел.

10.1. ВЛИЈАНИЕ НА ОТСТАПУВАЊЕТО НА НАПОНОТ ВРЗ РАБОТАТА НА ЕЛЕКТРИЧНИТЕ ПРИЕМНИЦИ И ЕЛЕМЕНТИТЕ НА ЕЛЕКТРИЧНИТЕ МРЕЖИ

10.1.1. Влијание на отстапувањето на напонот врз работата на електричните приемници

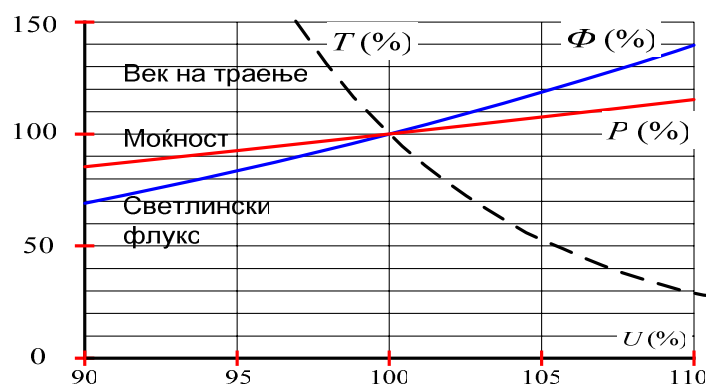
Секое отстапување на напонот на приемникот од неговата номинална вредност ги влошува неговите услови на работа. Најраспространет приемник на електрична енергија е *сијалицата со вжарено влакно*. Основни величини кои ја карактеризираат нејзината работа се:

- светлосниот флукс Φ ,
- потребната активна моќност P и
- векот на траење T .

Сите овие големина зависат од напонот U . Таа зависност е прикажана во табелата 10.1, односно на сликата 10.2.

Табела 10.1. Зависност на карактеристиките на светилка со вжарено влакно од напонот U

U (%)	Φ (%)	P (%)	T (%)
90	68	85	440
95	83	92	205
100	100	100	100
105	119	108	50
110	141	116	26



Слика 10.2. Графички приказ на зависностите од табелата 10.1

Втор карактеристичен претставник на електричните приемници во индустријата, па и во широката потрошувачка, е *асинхронот мотор*.

Моментот на вртење M , лизгањето s како и коефициентот на корисно дејство на моторот η зависат од напонот U на краевите на моторот.

Со *снижувањето на напонот* доаѓа до:

- зголемување на лизгањето s
- намалување на брзината на вртење n и
- зголемување на загубите на активна моќност во моторот,
- негово засилено загревање.

Смалениот број на вртежи се одразува неповолно и врз работата на механизмот (работната машина), придвижуван од моторот, и доведува до:

- намалување на продуктивноста на работата,
- зголемено време на работење,
- зголемена потрошувачка на електрична енергија,
- и друго.

При паѓање на напонот за повеќе од **10%** во однос на номиналниот напон на моторот, во некои ситуации може да дојде и до негово *закочување*.

Од друга страна, *зголемувањето на напонот* над номиналната вредност U_n доведува до:

- влошување на факторот на моќност $\cos \varphi$
- зголемена потрошувачка на реактивна моќност.

Во просек, на секој процент зголемување на напонот, бараната реактивна моќност од моторот се зголемува за над **3%**. Со тоа се зголемуваат загубите на моќност и енергија во неа.

Утврдено е дека при *долготрајна работа* на еден асинхрон мотор со напон кој е за **10%** под неговата номинална вредност, векот на траење на моторот (односно животниот век на изолацијата на моторот) се намалува за околу два пати.

Отстапувањето на напонот од номиналната вредност негативно се одразува и кај **другите видови приемници**:

- термичките апарати во домаќинствата,
- електротермичките постројки,
- постројките за електролиза,
- уредите за заварување во индустријата, и др.

Кај **сијалиците со празнење во гасови** при напон над номиналниот **секој зголемент процент** на напонот им **го скратува векот за 3%**. За исто толку расте и потрошувачката на реактивна енергија на светилката. Доколку пак напонот е пренизок и изнесува, на пример, само **90%** од номиналниот, ваквите светилки не ќе можат да се вклучат во работа.

Кај термичките уреди во домаќинствата моќноста е пропорционална на квадратот од напонот. Секое зголемување на напонот за **1%** ќе значи зголемување на нивната моќност за **2%**, но истовремено и намалување на нивниот животен век за **3%** – и обратно.

Радио и ТВ приемниците се најчувствителните уреди во домаќинствата. За да можат тие воопшто да работат, нивниот напон не смее да биде помал од **90%** или поголем од **105%** од номиналната вредност.

За **ублажување на сите укажани проблеми** кај приемниците, како и заради подобрување на техничките и економските показатели во работењето, се врши **нормирање на дозволеното отстапување на напонот**. Во нашата земја ова нормирање е регулирано со прописите само за напонот во нисконапонските мрежи, каде што се дозволува тој да се движи околу номиналниот напон во границите -10 до $+5\%$, т.е.:

$$0,9 \cdot U_n \leq U \leq 1,05 \cdot U_n .$$

Меѓутоа, **препорачливо е**, отстапувањето на напонот да биде ограничено и напонот, во зависност од видот на приемниците, да не излегува од границите:

- од $-2,5\%$ до $+5\%$ во електричните инсталации за осветление на индустриските хали и јавни згради и простории;
- од -5% до $+10\%$ во мрежи кои напојуваат асинхрони мотори;
- од -5% до $+5\%$ за сите останати приемници.

10.1.2. Влијание на отстапувањето на напонот кај елементите на електроенергетските мрежи

Отстапувањето на напонот од неговата номинална вредност се одразува негативно и во самата мрежа, т.е. на нејзините елементи.

Кај **трансформаторите** доаѓа до **зголемени загуби** на активна и реактивна моќност **во железото** кога тие работат со **напон повисок од**

номиналниот и тоа зголемување (поради нелинеарната карактеристика на магнетизирање на магнетското коло) е силно изразено¹.

Ова покачување на загубите значи **зголемено загревање** на железното јадро и на намотките на трансформаторот и нивно **побрзо стареење**. Тоа исто така значи и зголемување на вкупните загуби во мрежата и намалување на економичноста во погонот.

До зголемување на **загубите** во трансформаторот во **бакарот** и до негово **прекумерно загревање** се доаѓа и кога трансформаторот е силно оптоварен а работи со **напон под номиналниот**.

Кај **надземните водови** (далекуводите) работата со превисок напон е ограничена од аспект на изолацијата и нејзиното напрегање со таканаречениот највисок погонски напон. Но кога водот пренесува моќност при **снижен напон**, **се зголемуваат загубите на активна и реактивна моќност** и енергија во преносот.

Кај **каблите зголемениот напон** доведува до зголемени **загуби во диелектрикот ($\text{tg}\delta$)**, загревање на изолацијата, зголемени парцијални празнења во неа (што значи намалување на векот на траење на кабелот).

Кога пак кабелот пренесува одредена моќност, но при **снижен напон**, слично како и кај надземните водови **загубите** во преносот исто така **се зголемуваат**.

Кај **кондензаторските батерии** моќноста Q_{KB} што тие ја произведуваат зависи од квадратот на напонот. Така, на пример, една кондензаторска батерија со моќност од **100 kvar** при напон кој изнесува **90%** од номиналниот ќе произведува само **81 kvar**, додека пак при напон **110%** од номиналниот ќе произведува **121 kvar**, но затоа **нејзиниот век на траење ќе се намали за два пати**.

¹ За илустрација на реченото ќе ни послужи следниот податок, добиен по експериментален пат од страна на производителите на трансформатори во нашата земја (ЕМО-Охрид): при работа на **дистрибутивен трансформатор 10/0,4 kV/kV 630 kVA** со напон повисок од номиналниот за **5%** доаѓа до зголемување на **загубите на активна моќност во железото за 26%**. Зголемувањето на **загубите на реактивната моќност** во случајот ќе биде уште поголемо. Така, на пример, според странски производители на трансформатори 110/СН, при работа на трансформаторот со напон поголем за **5%** во однос на неговата номинална вредност зголемувањето на реактивните загуби во железото оди и до **65%**.

10.2. СРЕДСТВА И НАЧИНИ ЗА РЕГУЛАЦИЈА НА НАПОНОТ ВО ЕЛЕКТРИЧНИТЕ МРЕЖИ

10.2.1. Општо за регулацијата на напонот

На својот пат од изворите до потрошувачите електричната енергија минува големи растојанија – преку трансформаторите за покачување на напонот, преносната мрежа, трансформаторите за снижување на напонот ВН/СН, па сè до дистрибутивните трансформатори СН/НН, каде што таа се трансформира на ниво на кое директно може да се користи. Но и сега, таа повторно се распределува низ нисконапонската мрежа до секој одделен потрошувач и краен корисник.

Бидејќи оптоварувањето на системот се менува во текот на денот, се менуваат и падовите на напон во мрежата, па според тоа се менуваат и напоните во поедините точки од мрежата.

Во преносната мрежа односот помеѓу максималното и минималното оптоварување се движи негде од 1,5 до 2 но затоа во дистрибутивните мрежи тој однос е честопати и поголем од 4. Толку голем распон на варијации на оптоварувањето, без сомнение, ќе предизвика и големи варијации на напонот, многу поголеми отколку што може да се толерира. Од тие причини е неопходно да се врши регулација на напонот во разни точки од мрежата.

Регулација на напонот претставува комплекс од мерки со кои се настојува да се ограничат отстапувањата на напонот кај потрошувачите во дозволени граници.

За таа цел на располагање ни стојат разни начини и средства за регулација на напонот, меѓу кои поважни се:

- регулација на напонот во електричните центри со промена на возбудната струја на синхроните генератори;
- регулација на преносниот однос кај регулационите трансформатори (регулација под товар – РПТ);
- промена на преносниот однос кај трансформаторите СН/СН и СН/НН кои немаат можност за РПТ (регулација во безнапонска состојба – РБС);
- регулација на напонот со помош на паралелни кондензаторски батерии;
- користење на редни кондензаторски батерии;
- зголемување на пресекот на спроводниците;
- промена на бројот на паралелно приклучените водови или трансформатори.

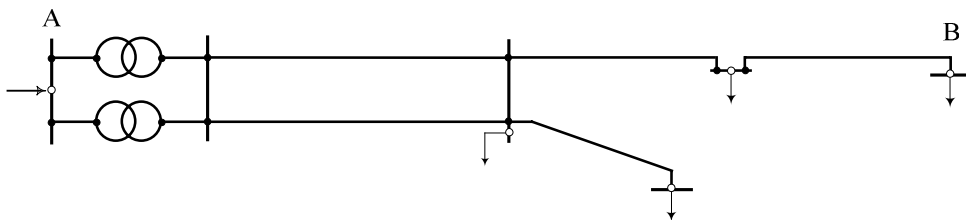
10.2.2. Регулација на напонот при електричните центри

Со промената на возбудната струја кај синхроните генератори во електричните центри се менува и напонот на клемите на гене-

раторот. Дозволените граници на оваа регулација се од -5% до $+5\%$ од номиналниот напон, но честопати, кога генераторот е силно оптоварен, а особено во режимот на максимално оптоварување, не може да се постигне ни овој распон на регулација. Покрај тоа, регулацијата на напонот во границите $\pm 5\%$ од U_n е доволна само во случаите кога централата напојува **мала мрежа**, со релативно **мала должина**.

Во општ случај, генераторите се врзани на заедничкиот електроенергетски систем и самите тие **не се доволни** за успешна регулација на напонот. Затоа, тие претставуваат само **помошно средство** за регулација на напонот.

10.2.3. Регулација на напонот со измена на вклопната состојба во мрежата



Слика 10.3. Регулација на напонот во мрежата со промена на нејзината вклопна состојба

Овој начин на регулација ќе го објасниме на примерот прикажан на сликата 10.3.

Падот на напон, а со тоа и напонот U_B во точката “В”, меѓу другото, зависи од големината на оптоварувањето P_B и Q_B , но и од параметрите R_{ek} и X_{ek} на делот од мрежата помеѓу напојната точка “А” и посматраната точка “В”. Општата формула за загуба на напон, како што е познато, гласи:

$$\Delta U = \Delta U_{AB} \approx \frac{P_B \cdot R_{ek} + Q_B \cdot X_{ek}}{U_n}. \quad (10.3)$$

Се гледа дека со измената на R_{ek} или X_{ek} може да се менува падот на напон ΔU , а со тоа и напонот во точката “В”. Истото тоа важи и за напонот во било која друга точка од мрежата.

Овој начин на регулација е **можен** само ако во мрежата имаме делови изведени со паралелни водови или ако во напојната трансформаторска станица има **барем два** паралелно врзани трансформатори, како што е тоа прикажано на сликата 10.3. Со исклучувањето на еден вод или трансформатор се зголемува R_{ek} и X_{ek} , а со тоа доаѓа до намалување на напонот U_B - и обратно.

Со **исклучувањето** на водови или трансформатори во мрежата истовремено доаѓа и до **зголемување на загубите** на моќност и енергија во неа, а покрај тоа се **намалува и сигурноста** во електроснабдувањето. Затоа овој вид регулација ретко се применува, и ако се применува, тогаш тоа се прави **само во вечерните и ноќните часови**, во режимот на

минимално оптоварување, кога има потреба од смалување на напонот и кога загубите на моќност се мали.

Обично се практикува ваквата регулација да се врши со исклучување на трансформатори во напојните трансформаторски станици и тоа од следните две причини:

- трансформаторите се значително подоверливи елементи од водовите, па ризикот поради смалената сигурност со нивното исклучување е помал;
- исклучувањето на дел од трансформаторите во режимот на минималното оптоварување е поволно и од аспект на загубите во трансформацијата, бидејќи со тоа се намалуваат загубите во железото, па на тој начин се намалуваат и вкупните загуби.

10.2.4. Регулација на напонот со промена на преносните односи кај електроенергетските трансформатори

Како што е познато, високонапонските намотки кај современите енергетски трансформатори ВН/СН, како и среднонапонските намотки кај трансформаторите СН/НН, покрај **основниот отцеп** кој одговара на номиналниот преносен однос, имаат и **дополнителни**, таканаречени „**регулациони**“ отцепи. Со нивно користење може да се менува преносниот однос на трансформаторот, т.е. **коефициентот на трансформација** k_T .

Промената на коефициентот на трансформација може да се врши на два начина: во **безнапонска состојба** (т.е. тогаш кога трансформаторот е исклучен од мрежата) и **под товар**.

10.2.4.1. Трансформатори со можност за регулација во безнапонска состојба (РБС)

Промената на коефициентот на трансформација во безнапонска состојба практично и не претставува регулација, бидејќи за секоја негова промена е потребно да се изврши исклучување на трансформаторот од погон и нагудување (подесување) на преносниот однос, што е воопшто неприфатливо како за дистрибутерот така и за самите потрошувачи.

Ваквиот начин на регулација се користи само кај помалите трансформатори **СН/СН** и **СН/НН**, со номинален напон на среднонапонската намотка 10 kV, 20 kV и 35 kV. Вообичаено е регулацијата да се врши во опсегот од **-5 % до +5%** околу номиналниот преносен однос, со чекор на регулација **2,5%**. Тоа значи дека ваквите трансформатори на примарната страна имаат вкупно **5 отцепи** - еден основен (кој одговара на номиналниот преносен однос) и четири регулациони: **-2,5% ; -5% ; +2,5% и +5%**.

Од веќе споменатите причини, како и од други технички причини (корозија на контактите од слободните отцепи), менувањето на преносниот однос кај овие трансформатори се врши ретко, најчесто **два пати** (во зимскиот и летниот период) или **четири пати** (**сезонски измени**) во годината.

10.2.4.2 Трансформатори со можност за регулација под товар (РПТ)

Промената на коефициентот на трансформација под товар со цел да се сузбиваат колебањата на напонот во напојната мрежа претставува права регулација, па затоа трансформаторите со ваква можност се нарекуваат и *регулациони трансформатори*.

Во нашата електроенергетска мрежа речиси сите трансформатори 110/СН кои напојуваат среднонапонски дистрибутивни мрежи **се регулациони**.

Кај овие трансформатори **во секој момент** можеме да избереме таков коефициент на трансформација (тоа се врши обично автоматски) со кој се постига **напонот** на секундарната страна (или пак напонот во некоја друга точка од мрежата СН) да **го држимо на константна**, однапред зададена **вредност**, независно од оптоварувањето и напонските прилики на примарната страна од трансформаторот.

Исто така, со помош на регулационите трансформатори, можно е и **програмирано водење** (т.е. **управување**) на напонските прилики во напојуваната мрежа, со што се подобрува уште повеќе квалитетот на напонот. Ваквиот начин на работа на овие трансформатори е кај нас веќе реализиран во повеќе градови.

За таа цел кај регулационите трансформатори постои вградена **регулациона преклопка** (најчесто во звездиштето на високонапонската намотка), со помош на која е можна **измена на преносниот однос под товар**.

Опсегот на регулацијата кај регулационите трансформатори ВН/СН обично изнесува **-15%, +15%**, макар што понекогаш се оди и на помал **(-10%, +10%)** или пак, доколку е тоа неопходно, и на поголем опсег **(-20%, +20%)**. Регулацијата е, се разбира, **степенеста**, т.е. напонот на регулираната (секундарната) страна може да се менува во скокови. *Чекорот на регулација* најчесто изнесува од **1% до 1,5%**. Постојат регулациони трансформатори со помал чекор **(0,78%)**, но постојат и такви со чекор **2%**. Преголемиот чекор дава **груба регулација**, додека пак премалиот чекор дава навистина **пофина регулација**, но затоа ја прави преклопката посложена и значително поскапа.

Регулацијата кај ваквите трансформатори е обично **автоматска**. Параметарот на регулацијата е најчесто напон (напонот на секундарот, односно напонот во некоја друга карактеристична точка од мрежата, добиен со телемерење), или пак и напон и струја (напонот на секундарот и струјното оптоварување на трансформаторот).

За да **работи** регулаторот **стабилно** и да нема голем број непотребни сработувања на регулационата преклопка, тој не треба да реагира на мали и брзи варијации на напонот во мрежата кои имаат преоден карактер и претставуваат честа и нормална, но неизбежна појава. Поради тоа **зоната** (подрачјето) **на нечувствителност** по напон се избира доволно голема **(1% до 1,5%)**, па на тој начин регулаторот дава команда за измена на преносниот однос само тогаш кога отстапува-

њата меѓу регулираната и бараната вредност на напонот ја надминуваат споменатата вредност.

Освен тоа, за да се избегне реагирањето на регулаторот на краткотрајните колебања на напонот, кои се случуваат при разни регуларни вклучувања и исклучувања на потрошувачите во напојуваната мрежа, се воведува и временско **доцнење** (**временско затегање**) на дејството на регулаторот. Ова временско затегање зависи од локалните услови и може да се движи од **десетина секунди** па сѐ до **неколку минути**. На тој начин регулационата преклопка е заштитена од преголем број непотребни сработувања (операции) и од предвремено истрошување на нејзиниот контактен систем.

Кај некои од постарите типови регулациони трансформатори не постои можност за автоматска регулација. Кај нив дежурниот уклопничар далечински, од командната табла, дава налог на регулаторот под товар за измена на преносниот однос. За овие трансформатори се вели дека имаат **рачна регулација** на напонот.

Регулационите трансформатори во најголема мера **придонесуваат** за подобрување на **квалитетот на напонот**. Тие не вршат само регулација и одржување на просечната (средната) вредност на напоните во мрежата на некое однапред зададено ниво, туку вршат и **сузбивање** на колебањата на напонот околу неговата средна вредност, што е мерка за подобрување на квалитетот на испорачаната електрична енергија.

За разлика од нив, трансформаторите со можност за регулација во **безнапонска** (исклучена) **состојба не ги сузбиваат колебањата** на напонот, туку можат да ги менуваат средните, т.е. просечните вредности на напонот на регулираните собирници со низок напон во дистрибутивната нисконапонска мрежа.

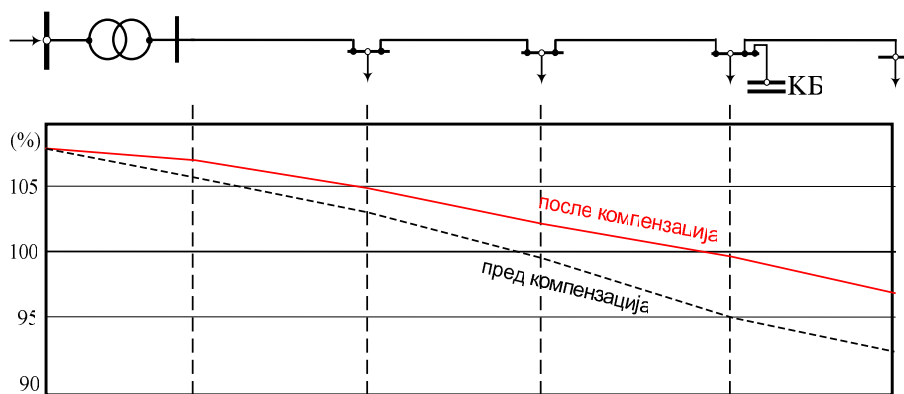
10.2.6. Регулација на напонот со помош на кондензаторски батерии

Претходно споменатите средства за регулација на напонот често пати не се доволни за постигање напонски прилики во мрежата со задоволителен квалитет. Во тој случај, како помошно средство со кое се постига подобрување на условите на погонот, се користат статичките кондензатори (кондензаторски батерии). На тој начин, покрај производството на реактивна моќност, т.е. компензација на товарот, тие се користат и за регулација на напонот.

Ако во некоја точка од мрежата приклучиме кондензаторска батерија, тогаш **напонот** во неа (а и во соседните точки) **ќе се покачи** за определен износ ΔU којшто зависи од тоа колкава е моќноста Q_{KB} на батеријата, но и од тоа на кое место во мрежата таа е приклучена. Покачувањето на напонот ΔU може да се пресмета со формулата:

$$\Delta U = \frac{Q_{KB} \cdot X_{\Sigma}}{U_n}, \quad (10.4)$$

каде што X_{Σ} е реактивната отпорност на делот од мрежата помеѓу местото на приклучување на батеријата и напојната точка на мрежата. Со приклучување на кондензаторската батерија, напонот во останатите точки од мрежата исто така ќе се измени (зголеми).



Слика 10.4. Напонски профил долж компензиран СН извод, пред и по компензацијата

На сликата 10.4 е прикажан напонскиот профил долж изводот од една среднонапонска (10 kV) мрежа, напојувана од трансформаторска станица 35/10 kV/kV, пред и по приклучувањето на кондензаторска батерија (КБ) во една нејзина точка.

Значи, ако инсталираме кондензаторска батерија со одредена моќност во мрежата, со тоа го покачуваме напонот во сите точки од мрежата. Соодветните прирасти на напонот во поедините точки од мрежата можеме да ги пресметаме со помош на изразот (10.4). Меѓутоа, проблемот обично се поставува обратно, па се бара да се пресмета колкава треба да биде моќноста на кондензаторската батерија за да се подигне напонот во дадена точка од мрежата за износ $\Delta U\%$.

За решавањето на овој проблем многу поедноставно е да се користи **табелата 10.2**. Во неа е содржан податокот за тоа **колкава треба да биде реактивната моќност Q_{KB}** на батеријата со која се постигнува **покачување на напонот** во посматрана точка за само **1%**. Таа вредност е дадена за разни места на приклучување на батеријата. Во истата табела е даден и податокот, колкаво покачување на напонот ќе предизвика инсталирање на кондензаторска батерија од **100 kvar** во разни точки од мрежата.

Табела 10.2. Регулација на напонот со помош на кондензаторски батерии

Е л е м е н т	Потребна моќност на батеријата за постигање пораст на напонот од 1%	Процентуален пораст на напонот при инсталирање на КБ од 100 kvar
Трансформатори 10/0,4 и 20/0,4 kV/kV		
100 kVA	18 kvar	5,6 %
160 kVA	29 kvar	3,45 %
250 kVA	43 kvar	2,33 %
400 kVA	70 kvar	1,43 %
630 kVA	110 kvar	0,91 %
1000 kVA	170 kvar	0,60 %
Надземен вод со должина 1 km		
$U_n = 0,4 \text{ kV}$	5 kvar	20,00 %
$U_n = 10 \text{ kV}$	3000 kvar	0,033 %
$U_n = 35 \text{ kV}$	35000 kvar	0,003 %
Кабел со должина 1 km		
$U_n = 0,4 \text{ kV}$	24 kvar	4,17 %
$U_n = 10 \text{ kV}$	12500 kvar	0,008 %
$U_n = 35 \text{ kV}$	125000 kvar	/

10.3. КОНТРОЛА НА КВАЛИТЕТОТ НА НАПОНОТ ВО МРЕЖИТЕ

Со текот на времето доаѓа до постепено **менување** на условите на работа на електричните мрежи – од една страна поради **поработ** на бројот и моќноста на потрошувачите, а од друга страна поради **измените** во самата мрежа. Затоа, потребно е, повремено, но систематски, да се врши **проверка** на прифатливоста на квалитетот на напонските прилики.

Под **контрола на квалитетот** на напонот обично се подразбира контрола (регистрација) на отстапувањата на напонот од неговата номинална вредност во нормални режими на работа.

Дистрибутивните мрежи најчесто се многу разгранети. Тие напојуваат прилично голем број потрошувачи. Голем е и бројот на трансформаторските станици СН/НН во среднонапонските мрежи. Затоа следењето и испитувањето на напонските прилики кај секој потрошувач, па дури и кај секоја трансформаторска станица СН/НН, е практично невозможно. Контролата на квалитетот на напонот ќе мора да се врши само во определен број **карактеристични точки** од мрежата. Бројот на овие точки треба да е достаточен за да се има комплетен увид во напонската состојба на напоните во сета мрежа. Притоа, точките во кои ќе го следиме напонот ги избираме така што, знаејќи го напонот во нив, лесно ќе можеме да ги пресметаме и напоните во преостанатите точки од мрежата.

Контролата на напонот ќе треба да се врши за **нормален режим** на работа на мрежата (нормална вклопна состојба). Режимите кои ретко се јавуваат не треба да бидат меродавни за оценката на квалитетот на напонот. Контролата треба да биде **перманентна и систематска**. Таа треба да се врши во подолг временски период, за да се собере доволен обем на статистички материјал врз основа на кој ќе можат да се извлечат објективни проценки на состојбата на квалитетот на напонот. Обично, се посматра период од еден месец и тој треба да биде претставник на една цела сезона. Постапката се повторува за секоја годишна сезона.

Процесот на измената на параметрите на режимот (оптоварувањата, напоните, струите и друго) во електроенергетските мрежи има случаен карактер. Тоа се должи на случајните промени на моќностите на потрошувачите и доведува до тоа што показателите за квалитетот на напонот имаат исто така случајна природа. Затоа при анализа на овие појави ќе треба да се применуваат статистички методи за контрола на квалитетот на напонот.

Пример 10.1. Напонот на 0,4 kV страна во ТС 10/0,4 kV/kV 400 kVA изнесува 400 V. Да се избере моќноста на кондензаторската батерија, која ќе биде приклучена директно на собирниците 0,4 kV во самата трафостаница, така што ќе се постигне покачување на напонот на 420 V.

Решение:

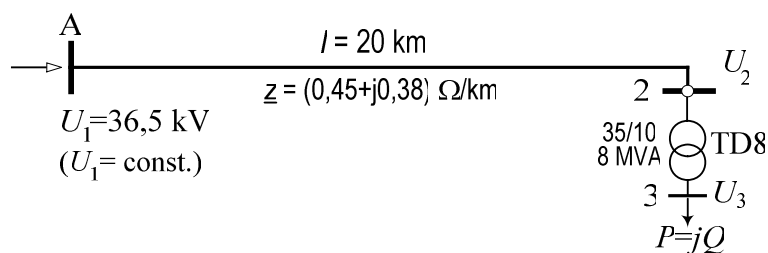
Во овој случај потребното покачување на напонот ќе биде $\Delta U = 420 - 400 = 20 \text{ V}$. Неговата процентуална вредност ќе изнесува:

$$\Delta U\% = (\Delta U/U_n) \cdot 100 = (20/400) \cdot 100 = 5\% .$$

Од табелата 10.2 се гледа дека за покачување на напонот за **1%** се потребни **70 kvar**, што значи дека за добивање на бараното покачување од **5%** ќе биде потребна 5 пати поголема моќност, т.е, потребната моќност ќе изнесува $Q_{KB} = 5 \cdot 70 = 350 \text{ kvar}$.

□ □ □

Пример 10.2. Трансформаторска станица 35/10 kV/kV се напојува преку еден 35 kV надземен извод, долг $l = 20 \text{ km}$, со подолжна редна импеданција $z_0 = (0,45 + j0,38) \Omega/\text{km}$ (слика П.10.2.1). Напонот на почетокот од водот се одржува на константна вредност преку целиот ден и изнесува до $U_1 = 36,75 \text{ kV} = \text{const}$. За трансформаторот Т се познати следните податоци: тип TD8; $(35 \pm 2 \times 2,5\%)/10,5 \text{ kV/kV}$; 8 MVA; $u_k\% = 7,0\%$; $i_0\% = 1,0\%$; $\Delta P_{Cun} = 54 \text{ kW}$; $\Delta P_{Fe} = 9,4 \text{ kW}$. Тој работи со својот номинален преносен однос $k_T = k_{Tn} = 35/10,5$.



Слика П.10.2.1. Шема на набљудуваната мрежа

Потрошувачот којшто се напојува од 10 kV собирници претставува станбена населба и припаѓа на категоријата потрошувачи „домаќинства“ (D). Во режимот на максималното оптоварување неговата моќност изнесува $\underline{S}_M = P_M + jQ_M = (6,5 + j3)$ MVA, додека во режимот на минимално оптоварување моќноста на потрошувачот е 6 пати помала и изнесува $\underline{S}_m = P_m + jQ_m = (1,105 + j0,510)$ MVA. Да се пресмета интервалот ($U_{3,\min} \div U_{3,\max}$) во кој што ќе варира напонот U_3 при потрошувачите во текот на денот. Потоа со компјутерска симулација, со помош на програмата „DM.xls“, да се утврди варијацијата на напонот U_3 во текот на денот т.е. временската зависност $U_3(t)$; ($t = 1, 2, \dots, 24$). Колкави се средната вредност $U_{3,\text{cp}}$ и стандардната девијација σ_{U_3} на напонот. Дали напонот излегува од дозволените граници помеѓу 9 и 11 kV ($U_n \pm 10\% \times U_n$). Која мерка ни стои на располагање за подобрување на таа ситуација.

Решение:

1) Приближна пресметка на максималната и минималната вредност на напонот U_3

Подолжната импеданција на водот ќе биде:

$$\underline{Z}_V = \underline{z} \cdot l = (0,45 + j0,38) \cdot 25 = (11,25 + j9,50) \Omega$$

додека нејзината сведена вредност на 10 kV страна:

$$\underline{Z}_{V,\text{св}} = \underline{Z}_V \cdot (10,5/35)^2 = (1,013 + j0,855) \Omega$$

За трансформаторот TD8 се добива следната вредност за импеданцијата на редната гранка, сведена кон секундарна, 10 kV, страна:

$$\underline{Z}_T = (0,093 + j0,96) \Omega.$$

Вкупната (еквивалентна) импеданција на системот од изворот (точка 1) до потрошувачот, ќе биде:

$$\underline{Z}_{ek} = \underline{Z}_{V,\text{св}} + \underline{Z}_T = (1,106 + j1,815) \Omega.$$

Вкупната загуба на напон во системот ќе биде (приближно):

$$\Delta U \approx \frac{P \cdot R_{ek} + Q \cdot X_{ek}}{U_n}.$$

Тогаш напонот кај потрошувачот U_3 ќе биде:

$$U_3 = U_{1,\text{св}} - \Delta U = U_1 \cdot (1/k_T) - \Delta U.$$

На тој начин, за максималниот (max) и минималниот (min) режим добиваме:

$$\Delta U_{\max} \approx \frac{6,5 \cdot 1,106 + 3,0 \cdot 1,815}{10} = 1,263 \text{ kV};$$

$$U_{3,\max} = 10,95 - 1,263 = 9,686 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{\min} \approx \frac{1,105 \cdot 1,106 + 0,510 \cdot 1,815}{10} = 0,368 \text{ kV};$$

$$U_{3,\min} = 10,95 - 0,368 = 10,584 \text{ kV}$$

Средната (просечна) вредност на напонот (приближно) ќе биде:

$$U_{3,\text{cp}} = (U_{3,\min} + U_{3,\max}) / 2 = 10,135 \text{ kV}.$$

2) Точна пресметка на максималната и минималната вредност на напонот U_3 со компјутерска симулација

Со помош на компјутерската програма „DM.xls“ се вршени симулации на работењето на набљудуваниот систем и при тоа, за вредноста на напонот $U_3(t)$ преку денот се добиени следните 24 вредности:

t (h)	1	2	3	4	5	6
U (kV)	10.65	10.69	10.71	10.75	10.74	10.74
t (h)	7	8	9	10	11	12
U (kV)	10.72	10.55	10.48	10.13	10.02	9.63
t (h)	13	14	15	16	17	18
U (kV)	9.79	9.96	10.55	10.52	10.53	10.44
t (h)	19	20	21	22	23	24
U (kV)	10.21	9.93	10.07	10.44	10.60	10.60

Сега, од оваа табела, можеме да ги отчитаме минималната и максималната вредност на напонот U_3 :

$$U_{3,\min} = 9,635 \text{ kV и}$$

$$U_{3,\max} = 10,747 \text{ kV}.$$

Средната вредност, $U_{3,\text{cp}}$, и стандардната девијација, σ_{U_3} , на напонот $U_3(t)$, во согласност со изразите (10.1) и (10.2), ќе биде:

$$U_{3,\text{cp}} = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_{24}}{24} = \sum_{i=1}^{24} \frac{U_i}{24} = 10,395 \text{ kV},$$

$$\sigma_{U_3} = \sqrt{\sum_{i=1}^{24} \frac{\Delta U_i^2}{24-1}} =$$

$$\sigma_{U_3} = \sqrt{\frac{(U_1 - U_{3,\text{cp}})^2 + (U_2 - U_{3,\text{cp}})^2 + \dots + (U_{24} - U_{3,\text{cp}})^2}{24-1}};$$

$$\sigma_{U_3} = 0,356 \text{ kV}.$$

$$\sigma_{U_3} \% = \frac{\sigma_{U_3}}{U_{3,\text{cp}}} \cdot 100 = \frac{0,356}{10,395} \cdot 100 = 3,42\%.$$

Податоците за средната вредност и стандардната девијација на напонот во некоја точка од мрежата можат, според теоријата на веројатноста, да се употребат за проценка на веројатноста напонот во таа точка да добива вредности во одреден интервал (или надвор од него.). Така, на пример, ако се усвои претпоставката дека напонот претставува случајна величина која што подлежи на нормалниот (Гаусов) закон на распределба (што е обично исполнето) тогаш веројатноста во даден момент од денот напонот да добие вредност од интервалот $(U_{cp} \pm 1,96 \times \sigma_U)$ изнесува 0,95. Значи, треба да се очекува дека напонот во таа во таа точка во 95% од времето ќе има вредност од $(U_{cp} - 1,96 \times \sigma_U)$ до $(U_{cp} + 1,96 \times \sigma_U)$, а само во 5% од времето надвор од овој интервал.

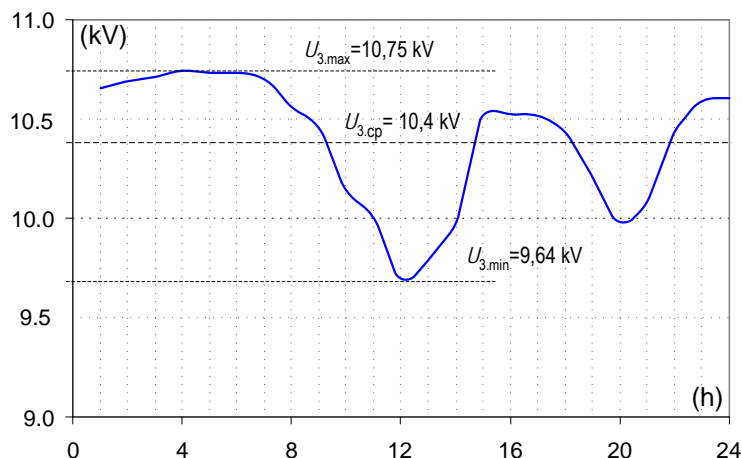
Во разгледуваниот случај ќе имаме:

$$(U_{3,cp} - 1,96 \times \sigma_U) = 9,7 \text{ kV};$$

$$(U_{3,cp} + 1,96 \times \sigma_U) = 11,1 \text{ kV}.$$

Значи во конкретниот случај, ако се набљудува подолг период од време (нпр. една цела сезона), може да се очекува дека напонот U_3 ќе се движи во интервалот $9,7 \text{ kV} < U_3 < 11,1 \text{ kV}$ во 95% од времето, а само во преостанатите 5% од времето може да добива вредности пониски од 9,7 или повисоки од 11,1 kV.

На сликата П.10.2.2 е прикажана зависноста $U_3(t)$ во текот на денот, добиена со помош на компјутерска симулација.



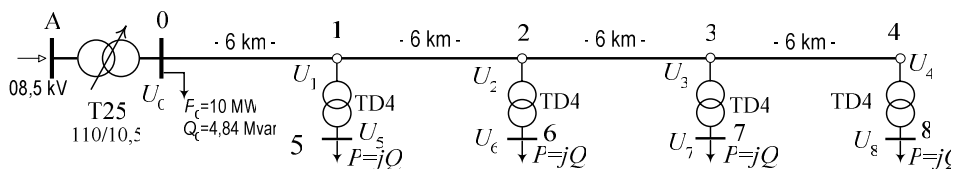
Слика П.10.2.2. Дневен дијаграм на промена на напонот $U_3(t)$



Пример 10.3. На сликата П.10.3 е прикажан 35 kV надземен извод преку кој што се напојуваат 4 трансформаторски станици 35/10 kV/kV. Сите 4 делници од изводот се изведени со ист пресек (јаже Al/Č 70/12 mm²) со подолжна редна импеданција $z_0 = (0,45 + j0,38) \Omega/\text{km}$ и имаат приближно исти должини $l = 6,0 \text{ km}$, секоја. Мрежата се напојува од

еден регулационен трансформатор, тип T25, за кого што се познати следните податоци: $S_n = 25 \text{ MVA}$; $U_{1n}/U_{2n} = (110 \pm 12 \times 1,25\%) / 36,75 \text{ kV/kV}$; $u_k\% = 10,5\%$; $\Delta P_{Cun} = 120 \text{ kW}$; $i_0\% = 0,7\%$; $\Delta P_{Fe} = 27 \text{ kW}$. Трансформаторите 35/10 се од ист тип (TD4) и за нив се познати следните податоци: $S_n = 4000 \text{ kVA}$; $U_{1n}/U_{2n} = (35 \pm 2 \times 2,5\%) / 10,5 \text{ kV/kV}$; $u_k\% = 7,5\%$; $\Delta P_{Cun} = 30 \text{ kW}$; $i_0\% = 1,0\%$; $\Delta P_{Fe} = 5,2 \text{ kW}$. Сите тие работат со константен преносен однос, еднаков на номиналниот ($\alpha\% = 0$). Напонот во напојната точка „А“ е константен преку целиот ден и изнесува $U_A = 108,5 \text{ kV}$ а трансформаторот T25 работи со својот номинален преносен однос.

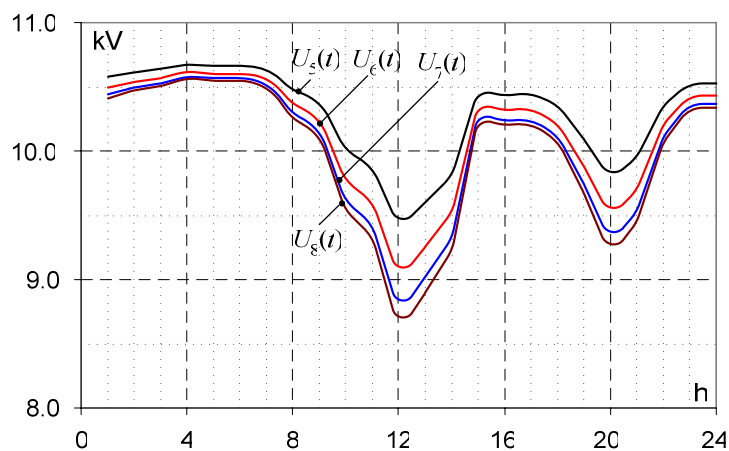
Мрежата напојува дистрибутивен конзум од категоријата „домаќинства“ (D). Познати се и вредностите на активните и реактивните оптоварувања во секоја ТС 35/10 и може да се смета дека се и тие приближно исти. Во режимот на максималното оптоварување нивните врвни вредности изнесуваат: $\underline{S}_i = (P_i + jQ_i) = (3,5 + j1,2) \text{ MVA}$; ($i = 1, 2, 3, 4$). Останатите изводи од напојната ТС 110/35 напојуваат исто така дистрибутивен конзум кој шо пулсира во текот на денот во ист ритам како и потрошувачите \underline{S}_i . Неговата врвна моќност изнесува $\underline{S}_0 = (P_0 + jQ_0) = (10 + j4,84) \text{ MVA}$.



Слика П.10.3.1. Приказ на набљудуваниот 35 kV надземен извод со 4 ТС 35/10 kV/kV

Со помош на програмата „DM.xls“ да се пресмета и прикаже интервалот во кој што ќе се менуваат напоните $U_5(t)$, $U_6(t)$, $U_7(t)$ и $U_8(t)$ во текот на денот како и нивните средни вредности и стандардни девијации.

Решение:



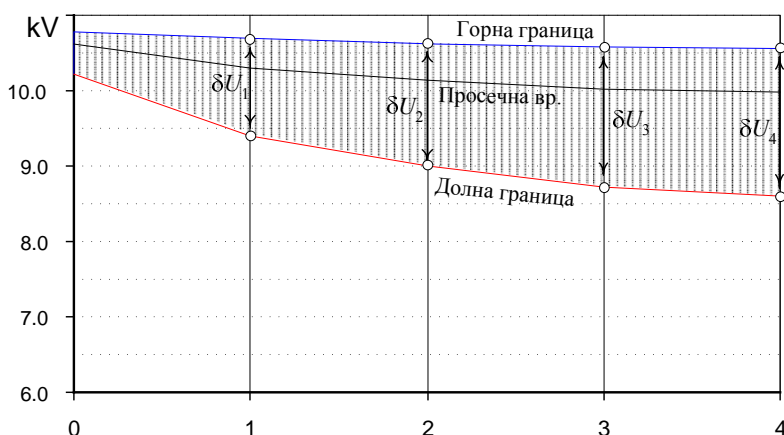
Слика П.10.3.2. Дневен дијаграм на промена на напонот $U(t)$ кај потрошувачите

Откога ќе се изврши моделирањето на мрежата од задачата, се добиваат следните резултати за кривите $U(t)$; ($t = 1, 24$) на напонот кај четирите потрошувачи. Тие се прикажани на сликата П.10.3.2.

Во табелата П.10.3.1 се прикажани статистички добиените вредности за минималната, средната и максималната вредност на овие напони како и стандарданата девијација на секој од нив. Врз основа на тие вредности е нацртан напонскиот профил по должината на изводот за трите карактеристични режими на оптоварување – максимален, среден и минимален. Тие се прикажани на сликата П.10.3.3. Од него може да се види во кој интервал ќе се движат напоните кај потрошувачите во текот на денот.

Табела П.10.3.1 Зависност $U(t)$ на напонот во собирницата бр 8.

	$U_5(t)$	$U_6(t)$	$U_7(t)$	$U_8(t)$
Мин. вредност U_{\min} (kV)	9.40	9.00	8.73	8.59
Ср. вредност $U_{\text{ср}}$ (kV)	10.29	10.13	10.03	9.97
Мах. вредност U_{\max} (kV)	10.67	10.62	10.58	10.56
Ст. девијација σ_U (kV)	0.40	0.48	0.55	0.58
Ст. девијација $\sigma_U\%$ (%)	3.90	4.73	5.47	5.85



Слика П.10.3.3. Напонски профил долж изводот за трите карактеристични режими и интервали на варијација на напоните

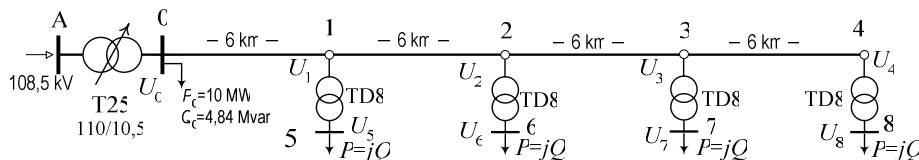
□ □ □

Пример 10.4. На сликата П.10.4.1 е прикажан истиот 35 kV надземен извод од претходната задача. Во сите 4 трансформаторски станици 35/10 kV/kV е извршена замена на трансформаторите со нови, поголеми, од типот TD8 со следните карактеристики: $S_n = 8000$ kVA; $U_{1n}/U_{2n} = (35 \pm 2 \times 2,5\%) / 10,5$ kV/kV; $u_k\% = 7,5\%$; $\Delta P_{Cun} = 54$ kW; $i_0\% = 1,0\%$; $\Delta P_{Fe} = 9,4$ kW. Сите тие работат со константен преносен однос, еднаков на номиналниот ($\alpha\% = 0$). Со оваа замена се очекува опсегот на варијациите на напонот кај потрошувачите да се намали.

Мрежата се напојува од истиот регулационен трансформатор, тип T25, за кого што се познати следните податоци: $S_n = 25$ MVA; $U_{1n}/U_{2n} = (110 \pm 12 \times 1,25\%) / 36,75$ kV/kV; $u_k\% = 10,5\%$; $\Delta P_{Cun} = 120$ kW; $i_0\% =$

0,7%; $\Delta P_{Fe} = 27 \text{ kW}$. Напонот во напојната точка „А“ е константен преку целиот ден и изнесува $U_A = 108,5 \text{ kV}$.

Мрежата го напојува истиот дистрибутивен конзум од категоријата „домаќинства“ (D) како во претходниот пример. Познати се и вредностите на активните и реактивните оптоварувања во секоја ТС 35/10 и може да се смета дека се и тие приближно исти. Во режимот на максималното оптоварување нивните врвни вредности изнесуваат: $\underline{S}_i = (P_i + jQ_i) = (3,5 + j1,2) \text{ MVA}$; ($i = 5, 6, 7, 8$). Може да се смета дека факторот на моќност на потрошувачите е константен преку целиот ден.



Слика П.10.4.1. Приказ на набљудуваниот 35 kV надземен извод со 4 ТС 35/10 kV/kV

Со помош на програмата „DM.xls“ да се пресмета и прикаже интервалот во кој што ќе се менува напонот $U_8(t)$ во текот на денот при крајниот потрошувач. Пресметките да се повторат два пати:

1) за случајот кога напојниот трансформатор T25 работи со вклучен автоматски регулатор на напонот (АРН), како регулационен, т.е. со променлив преносен однос така што има задача да го одржува напонот на својот секундар на вредноста најблиску до $U_0 = 36,75 \text{ kV}$,

2) за случајот кога АРН е исклучен и трансформаторот T25 работи со фиксен преносен однос $k_T = (110 - 2 \times 1,25\%) / 10,5 \text{ kV/kV} = 0,975 \times k_{T,n} = 104,5 / 10,5 \text{ kV/kV} = \text{const.}$ (регулаторот е поставен на позицијата -2, т.е. бројот н навивки на ВН намотка е за $\alpha\% = -2 \times 1,25\% = -2,5\%$ помал од номиналниот).

Кривите за зависноста $U_8(t)$; ($t = 1, 2, 3, \dots, 24$) за обата разгледувани случаја да се прикажат на ист дијаграм. Колкави се минималните, средните и максималните вредности во секој од овие два случаја. Кога е стандардната девијација (варијацијата) на напонот поголема и зошто. Во кој од нив квалитетот на испорачаната електрична енергија на потрошувачите од аспект на варијациите на напонот е повисок и зошто.

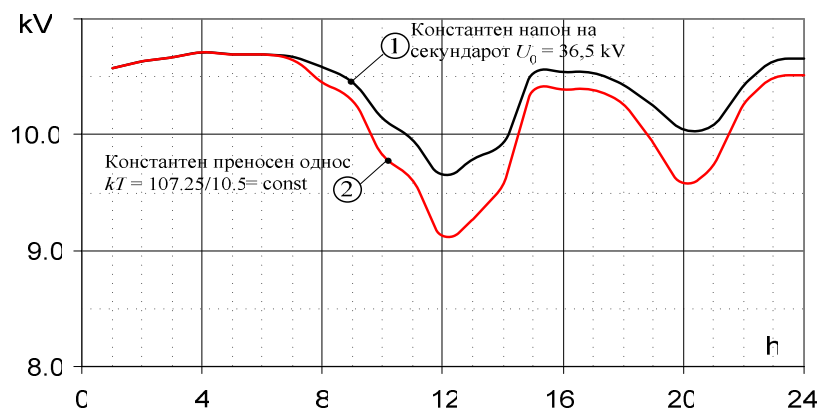
Решение:

Откога ќе се изврши моделирањето на мрежата од задачата, се добиваат следните резултати за временскиот тек на напонот $U_8(t)$; $t = 1, 24$, прикажан на дијаграмот од сл. П.10.4.1. Случајот 1 се однесува на работата на АРН на напојниот трансформатор со задача напонот на секундарот да го држи на константна вредност $U_0 = 36,5 \text{ kV}$. Во другиот случај „2“ овој трансформатор работи со фиксен преносен однос, $k_T = 0,975 \times k_{T,n} = 104,5 / 10,5 \text{ kV/kV}$. Притоа за цело време трансформаторот во последната ТС 35/10 работи со својот номинален преносен однос ($k_T = k_{T,n} = 35 / 10,5 \text{ kV/kV}$).

Временските текови на кривите $U_8(t)$ за двата случаја се прикажани на сликата П.10.4.2. Од нив заклучуваме дека максималните вредности на напонот $U_{8,max}$ и за обата начина на регулација во ТС 110/35 се постигаат во ноќните часови и имаат иста вредност $U_{8,max} = 10,7 \text{ kV}$. Но затоа минималните вредности на напонот се постигаат во време на системскиот максимум (12 h) и тие изнесуваат: $U_{8,min} = 9,58 \text{ kV}$ во првиот случај и $U_{8,min} = 9,03 \text{ kV}$ во вториот. Слично, средните вредности на напонот се: $U_{8,sp} = 10,39 \text{ kV}$ во првиот случај и $U_{8,sp} = 10,19 \text{ kV}$ во вториот. Исто така стандардната девијација σ_{U_8} изнесува $0,36 \text{ kV}$ (3,46%) и $0,51 \text{ kV}$ (4,94%) во првиот односно вториот случај (табела П.10/4.1).

Табела П.10.4.1 Глобални показатели за квалитетот на напонот $U_8(t)$ во собирницата бр 8.

величина	единица	случај 1	случај 2
$U_{8,min}$	(kV)	9.58	9.03
$U_{8,max}$	(kV)	10.71	10.71
$U_{8,med}$	(kV)	10.39	10.19
σ_{U_8}	(kV)	0.36	0.51
σ_{U_8}	(%)	3.46	4.94



Слика П.10.4.1. Дневни дијаграми на напонот $U_8(t)$ за обата разгледувани случаја

За квалитетот на испорачаната електрична енергија е битно колкава е средната вредност на напонот, т.е. за колкав износ таа се разликува од својата номинална вредност. Но исто така е важно колкави се неговите варијации околу таа средна вредност и најдобро е тие да бидат што е можно помали. Очигледно е дека варијацијата на напонот околу својата просечна вредност е помала кога е вклучен АРН на напојниот трансформатор 110/35 kV/kV. Затоа во тој случај квалитетот на испорачаната електрична енергија на потрошувачите е подобар.

□ □ □