

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ**

Cu titlu de manuscris
C.Z.U: 621.316.027.2:004.42

VIERU DMITRII

**CERCETAREA IMPACTULUI CONSUMULUI ȘI GENERĂRII
DISTRIBUITE ÎN REȚELELE DE JOASĂ TENSIUNE ASUPRA
CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE**

221.01 „Sisteme și tehnologii energetice”

Teză de doctor în științe inginerești

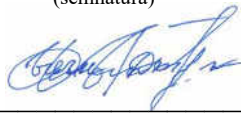
Conducător științific:

Consultant științific:



(semnătura)

Autor:



(semnătura)

Vladimir BERZAN

doctor habilitat în științe
tehnice, profesor universitar
Dmitrii ZAIȚEV
doctor științe tehnice,
conferențiar cercetător
Dmitrii VIERU

Chișinău, 2025

Vieru Dmitrii, 2025

CUPRINS

ADNOTARE	3
ABSTRACT	4
PE3IOME	5
LISTA DE ABREVIERI	6
INTRODUCERE	7
I. ANALIZA SITUAȚIEI ÎN DOMENIUL CERCETĂRII IMPACTULUI CONSUMULUI ȘI GENERĂRII DISTRIBUITE ÎN REȚELELE DE JOASĂ TENSIUNE ASUPRA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE	14
1.1. Scurt istoric privind dezvoltarea generării energiei electrice	14
1.2. Aspecte generale privind generarea distribuită	29
1.3. Noțiuni generale privind calitatea energiei electrice în contextul generării distribuite	36
1.4. Studiul elementelor neliniare în rețelele electrice de joasă tensiune cu surse și sarcini distribuite	43
1.5 Concluzii la capitolul I.....	46
II. ELABORAREA CONCEPTULUI ȘI A METODOLOGIEI DE CALCUL PENTRU CERCETAREA REGIMULUI REȚELEI DE JOASĂ TENSIUNE CU SURSE ȘI SARCINI DISTRIBUITE	48
2.1. Argumentări a posibilității utilizării conceptului de superpoziție la analiza regimului circuitelor multifilare de joasă tensiune cu sarcini distribuite	48
2.2. Particularitatea calculului rețelelor electrice de joasă tensiune cu sarcini neliniare și generare distribuită.....	57
2.3. Aplicarea procedurii pentru calculul regimului circuitului cu parametri complecși	75
2.4. Calcularea regimului rețelei cu trei faze de joasă tensiune.....	87
2.5. Elaborarea algoritmului de calcul al regimului rețelei electrice prin metoda curenților de buclă	90
2.6. Concluzii la capitolul II	93
III. MODELAREA IMPACTULUI CONSUMULUI ȘI GENERĂRII DISTRIBUITE CONCOMITENTE ÎN REȚELELE ELECTRICE DE JOASĂ TENSIUNE	95
3.1. Modelarea rețelei electrice de joasă tensiune cu consumatori și surse de generare distribuită.....	95

3.2. Examinarea impactului generării distribuite în rețelele electrice de tip RL asupra profilului de tensiune	103
3.3. Calculul rețelei electrice cu sarcini și surse de generare distribuite cu tensiunea $U=380$ V în diferite regimuri de funcționare	122
3.4. Estimarea impactului variabilelor independente asupra corectitudinii restabilirii semnalului ne-sinusoidal.....	124
3.5. Concluzii la capitolul III	126
CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI.....	128
ANEXE.....	138
DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII.....	166
CURRICULUM VITAE.....	167
SCRISOARE DE MULȚUMIRE	170

ADNOTARE

Vieru Dmitrii, „Cercetarea impactului consumului și generării distribuite în rețelele de joasă tensiune asupra calității energiei electrice” Teză de doctor în științe inginerești, Chișinău, 2025

Structura tezei: Introducere, trei capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 121 de surse, 128 pagini text de bază, 62 de figuri, 11 tabele. Rezultatele obținute sunt publicate în 13 lucrări științifice, prezentate la două foruri internaționale și trei conferințe științifice.

Cuvinte-cheie: metode clasice de calcul, generarea distribuită, calitatea energiei electrice, surse distribuite, regim de scurtcircuit, regim de mers în gol, metoda operațională, sarcini neliniare.

Scopul lucrării: stabilirea impactului surselor de generare distribuită conectate în rețelele electrice de joasă tensiune cu sarcini distribuite asupra calității energiei electrice prin elaborarea unor metode noi de calcul ce ar permite stabilirea profilului de tensiune în diferite regimuri de funcționare a rețelelor electrice de joasă tensiune.

Obiectivele cercetării: 1) Elaborarea procedurii de calcul al regimului staționar a rețelei electrice arborescente care va permite stabilirea profilului de tensiune în rețelele electrice de joasă tensiune cu surse de generare și sarcini distribuite; 2) Stabilirea procedurii de liniarizare a elementelor neliniare (surse distribuite de energie și sarcinilor neliniare cu componente liniare) din rețelele electrice de joasă tensiune, reieșind din profilul tensiunii stabilit în nodul examinat; 3) Adaptarea metodei de calcul a rețelei electrice cu parametrii complecși în regim tranzitoriu pentru rețeaua arborescentă cu surse și consumatori distribuiți; 4) Examinare impactului dependențelor dintre puterile consumate și generate conform curbelor de sarcină și generare asupra profilului de tensiune; 5) Evaluarea profilului de tensiune în noduri pentru stabilirea impactului calitativ asupra calității energiei electrice.

Noutatea și originalitatea științifică: în baza metodologiilor de calcul elaborate s-a cercetat impactul generării distribuite asupra profilului de tensiune ca componentă a calității energiei electrice și s-a propus liniarizarea surselor neliniare la examinarea impactului în funcție de puterea aparentă a armonicilor fundamentale în fazele rețelei de alimentare.

Rezultatele obținute aduc contribuții la încercarea de soluționare a problemei științifice importante și rezidă din elaborarea unor metodologii generalizate de calcul a rețelei electrice arborescente cu sarcini și surse de generare distribuită în baza cărora se vor evalua profilele tensiunilor în orice nod a rețelei cu stabilirea impactului acestora asupra calității energiei electrice.

Semnificația teoretică: implicarea unui aparat matematic utilizat la rezolvarea ecuațiilor liniare combinat cu metodologia de calcul a curenților de buclă, demonstrează operabilitatea și simplitatea aplicării în circuitele complexe așa cum sunt rețelele electrice de joasă tensiune. Numărul mare de noduri și sarcini, complexitatea rețelelor electrice de joasă tensiune, varietatea și caracterul sarcinii, impune aplicarea metodei operaționale de calcul a ecuațiilor integro-diferențiale, ceea ce reprezintă aportul teoretic de bază a acestei lucrări.

Valoarea aplicativă constă în: stabilirea metodelor de calcul, în cadrul proiectelor de cercetare, a profilelor de tensiune din rețelele electrice de joasă tensiune cu surse de generare și sarcini distribuite, ce ar permite evaluarea impactului asupra unor indici de calitate a e.e.

Rezultatele cercetării teoretice și practice au fost realizate în cadrul elaborării documentației de proiect a societăților de proiect pentru instalarea generatoarelor distribuite și a societăților de diagnosticare a surselor de calitate a energiei electrice, precum și prin publicații științifice în reviste naționale și internaționale.

ABSTRACT

Vieru Dmitrii, “*Study of the impact of distributed consumption and generation in low voltage networks on power quality*”, dissertation for the degree of PhD of technical sciences, Chisinau, 2025

Structure of the thesis: Introduction, three chapters, general conclusions and recommendations, bibliography of 23 titles, 128 pages of main text, 62 figures, 11 tables. The obtained results are published in 13 scientific articles, presented at two international forums and three scientific conferences.

Keywords: classical calculation methods, distributed generation, quality of electricity, distributed sources, short-circuit mode, idle mode, operation method, non-linear loads.

The purpose of the work: to determine the influence sources of distributed generation, working in low-voltage electrical networks with distributed loads, on the quality of electricity by developing new calculation methods that would allow to determine the voltage profile in different operating modes of low-voltage networks.

Research tasks: 1) Development of a method for calculating the stationary mode of an electric network, which will allow establishing the voltage profile in low-voltage electric networks with generation sources and distributed loads; 2) Establishing of process of linearization of non-linear elements (distributed energy sources and non-linear loads with linear components) of low-voltage electric networks resulting from the voltage profile established in the node under study; 3) Adaptation of the method of calculation of the electric network with complex parameters in the transition mode for the network with distributed sources and consumers; 4) Investigation of the influence of the dependencies between the consumed and generated power on the load and generation curves on the voltage profile; 5) Estimation of the voltage profile in nodes to determine the qualitative influence on the quality of the electricity.

Scientific novelty and originality: on the basis of the developed calculation methods, the influence of distributed generation on the voltage profile as a component of the quality of electricity is studied and the linearization of nonlinear sources is proposed when studying the influence of the load on the voltage profile.

The obtained results contribute to the demand for the solution of an important scientific task and lie at the basis of the development of generalized methods for the calculation of the electric network with loads and sources of distributed generation, on the basis of which the voltage profiles in any node of the network will be estimated with the determination of their impact.

Theoretical significance: the use of the mathematical apparatus for solving linear equations, combined with the method for calculating contour currents, demonstrates the efficiency and simplicity of its application in complex circuits, such as low-voltage electrical networks. The large number of nodes and loads, the complexity of low-voltage electrical networks, the variety and nature of the load require the application of the operational method of solving integro-differential equations, which is the main theoretical contribution of this work.

The practical importance is: to establish, within the framework of research projects, methods for calculating the voltage profiles of low-voltage electrical networks with generation sources and distributed loads, which would allow us to estimate the influence on some indicators of the quality of the electricity.

Implementation of scientific results. Theoretical and practical research results have been implemented by developing project documentation of project companies for installation of distributed generators and companies for diagnosis of power quality sources, as well as by scientific publications in national and international journals.

РЕЗЮМЕ

Виеру Дмитрий, *Исследование влияния распределённого потребления и генерации в сетях низкого напряжения на качество электроэнергии*”, диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук, Кишинёв, 2025 г.

Структура диссертации: Введение, три главы, общие выводы и рекомендации, библиография из 121 наименований, 128 страниц основного текста, 62 фигуры, 11 таблиц. Полученные результаты опубликованы в 13 научных статьях, представлены на двух международных форумах и трёх научных конференциях.

Ключевые слова: классические методы расчета, распределённая генерация, качество электроэнергии, распределённые источники, режим короткого замыкания, режим простоя, метод эксплуатации, нелинейные нагрузки.

Цель работы: установить влияние источников распределённой генерации, работающих в низковольтных электрических сетях с распределёнными нагрузками, на качество электроэнергии путём разработки новых методов расчёта, которые позволили бы установить профиль напряжения в различных режимах работы низковольтных сетей.

Задачи исследования: 1) Разработка методики расчёта стационарного режима электрической сети, которая позволит установить профиль напряжения в низковольтных электрических сетях с источниками генерации и распределёнными нагрузками; 2) Установление процесса линеаризации нелинейных элементов (распределённых источников энергии и нелинейных нагрузок с линейными составляющими) низковольтных электрических сетей, возникающих из профиля напряжения, установленного в исследуемом узле; 3) Адаптация метода расчёта электрической сети с комплексными параметрами в переходном режиме для сети с распределёнными источниками и потребителями; 4) Исследование влияния зависимостей между потребляемой и вырабатываемой мощностью по кривым нагрузки и генерации на профиль напряжения; 5) Оценка профиля напряжения в узлах для определения качественного влияния на качество электроэнергии.

Научная новизна и оригинальность: на основе разработанных методик расчёта исследовано влияние распределённой генерации на профиль напряжения как составляющую качества электроэнергии и предложена линеаризация нелинейных источников при исследовании влияния по полной мощности основной фазной гармоники в узле электросети.

Полученные результаты вносят вклад в попытку решения важной научной задачи и лежат в основе разработки обобщённых методов расчёта электрической сети с нагрузками и источниками распределённой генерации, на основе которых будут оцениваться профили напряжения в любом узле сети с установление их воздействия.

Теоретическая значимость: использование математического аппарата, используемого для решения линейных уравнений, в сочетании с методикой расчёта контурных токов, демонстрирует работоспособность и простоту применения в сложных схемах, например, в низковольтных электрических сетях. Большое количество узлов и нагрузок, сложность низковольтных электрических сетей, разнообразие и характер нагрузки требуют применения оперативного метода расчёта интегро-дифференциальных уравнений, что и составляет основной теоретический вклад данной работы.

Прикладное значение состоит в: установлении в рамках исследовательских проектов методов расчёта профилей напряжения низковольтных электрических сетей с источниками генерации и распределёнными нагрузками, которые позволили бы оценить влияние на некоторые показатели качества электроэнергии.

Внедрение научных результатов. Теоретико-практические результаты исследования были реализованы при разработке проектной документации проектных компаний по установке распределённых генераторов и компаний по диагностике источников качества электроэнергии, а также посредством научных публикаций в национальных и международных журналах.

LISTA DE ABREVIERI

GD	Generarea distribuită
e.e	e.e
REJT	Rețele electrice de joasă tensiune
SGD	Surse de generare distribuită
GD	Generare distribuită
SD	Sarcini distribuite
SER	Surse de energie regenerabilă
M.G	Mers în gol
s.c	Scurtcircuit
c.c	Curent continuu
NAIE	Normele de amenajare a instalațiilor electrice
SEE	Sistem electroenergetic

INTRODUCERE

Motivația alegerii subiectului. Dezvoltarea rapidă și diversificarea SGD cu generare directă în REJT și consum concomitent, stabilește necesitatea evaluării impactului asupra calității e.e. Lipsa unor metode analitice de calcul, din cauza numărului mare de consumatori, numărului mare de SGD și prezența surselor neliniare conduce la apariția incertitudinii privind calitatea e.e, ceea ce va poate genera deconectări, avarii, incendii sau electrocutări. Alegerea subiectului ține de elaborarea unor metode analitice de calcul necesare pentru stabilirea impactului asupra calității e.e în speță asupra profilului tensiunii, la etapa elaborării studiilor de fezabilitate și fezabilitate a rețelelor.

Actualitatea și importanța problemei abordate. SEE în ansamblul reprezintă mulțimea de elemente destinate generării, transportării și distribuiri e.e conectate între ele. SEE actual include centrale de generare a e.e, stații de ridicare și coborâre a nivelului de tensiune, linii electrice de joasă, medie și înaltă tensiune. Totodată, SEE cuprinde și toate instalațiile care sunt considerate neelectrice cum ar fi mecanismele ce acționează generatoarele, pilonii pe care sunt suspendate conductoarele etc.

Arhitectura clasică a sistemului electroenergetic se datorează prezenței surselor de energie pe anumite teritorii. Producerea globală de e.e are următorul aspect: centrale pe combustibili fosili (cca. 54%), centrale amplasate pe râuri (cca. 36%) și centrale nucleare (cca. 10%).

Conform bazelor de date ale companiei de cercetare independentă „Enerdata” se constată că odată cu dezvoltarea SER, către anul 2023 producere e.e capătă următorul aspect: centrale pe combustibili fosili (cca. 45,4%), centrale amplasate pe râuri (cca. 15,2%), centrale nucleare (cca. 9,1%), centrale eoliene și solare (cca. 30,3%), astfel crescând semnificativ ponderea energiei din SER, în produsul mondial, comparativ cu arhitecturile clasice.

Producerea e.e din combustibili fosili, are un impact negativ asupra mediului ambiant deoarece în urma arderii cu emisii mari de dioxid de carbon (CO₂), sporește încălzirea globală. Totodată, epuizarea combustibililor fosili influențează creșterea prețurilor la combustibil și respectiv creșterea prețurilor e.e. la nivel global.

Amplasarea centralelor electrice pe cursurile râurilor au efecte negative asupra sistemii ecologice a râurilor. Construirea unor baraje deseori conduce la modificări geologice în zonă având impact negativ care poate conduce la dezastre ecologice.

Accidentul nuclear din 26 aprilie 1986, la centrala electrică de la Cernobîl și urmat de accidentul nuclear de la centrala electrică Fukushima Daiichi din data de 11 martie 2011, au condus

la catastrofe ecologice mondiale cu pierderi de vieți omenești, iar potrivit diferitor surse numărul acestora depășește cifra de un milion.

În prezent se atestă o creștere a populației pe glob cu aproximativ un miliard de persoane comparativ cu perioada inițială a creării sistemelor electroenergetice, fapt ce impune extinderea acestora. Dezvoltarea topologică a sistemului electroenergetic prevede extinderea rețelelor, modernizarea acestora privitor la creșterea capacităților de generare.

Centralele existente deseori nu permit instalarea unor puteri suplimentare de generare, iar funcționarea la parametrii inițiali calculați, impune regimuri de funcționare anormale. Astfel, creșterea capacității de generare a centralei sporește consumul de combustibili fosili.

Reieșind din cele expuse, putem conchide, că sistemele electroenergetice actuale reprezintă sisteme centralizate care au un șir de dezavantaje, și anume:

- managementul defectuos la exploatarea optimă în vederea creșterii randamentului sistemului și diminuării emisiilor cu efect de seră;
- influențe negative asupra mediului ambiant cu provocări de dezastre ecologice mondiale;
- sensibilitatea rețelelor electrice la avarii în cascadă urmată de căderea SEE în ansamblu;
- generarea de pierderi mari în transportul și distribuția e. e cauzată de distanțe mari dintre centralele electrice și consumatorii finali.

În scopul diminuării dezavantajelor indicate, sunt propuse un șir de soluții care pot diminua dependența sistemului electroenergetic de combustibili fosili prin integrarea surselor de energie regenerabile în sistemele electroenergetice existente prin implementarea surselor de generare regenerabilă.

La momentul actual pentru producerea e.e. din SER sunt folosite energiile eoliene, solare, și acvatice. SER geotermale sunt realizate în termoenergetică, iar aplicarea lor la producerea e.e în proporții industriale nu și-au găsit locul din cauza randamentului scăzut cauzat de temperaturile insuficiente ale aburului. Folosirea resurselor acvatice drept SER are o pondere mai aplicativă în sectorul de producere a e.e, și anume energia râurilor. Aplicarea altor SER acvatice așa precum energia valurilor sau cea a mareelor din diferite motive tehnice nu și-au găsește aplicarea în serie.

Amplasarea centralelor electrice de mari puteri din SER ocupă teritorii vaste, ce creează dificultăți pentru agricultură, circulației maritime, iar complexitatea acestora duce la micșorarea fiabilității SEE. Caracterul intermitent de generare a energiei din SER, pentru puteri mari impune rezervarea de putere din surse convenționale de energie.

În scopul diminuării numărului de dezavantaje ale SEE existente se propune implementarea conceptului generării distribuite (GD). Acest concept prevede o generare a e.e din SER conectate la rețeaua publică cu posibilitatea consumului și generării concomitente a e. e.

GD micșorează gradul de emisie a gazelor cu efect de seră, creează o nouă piață de energie bazată pe diverse surse de energie, oferă posibilități de dezvoltare a micilor producători de e.e, reduce încărcarea rețelelor electrice, micșorează pierderile de transport și distribuție a e.e, asigură o securitate în alimentare cu e. e și reduce cererea de producere a e.e în orele de vârf.

Totodată, implementarea GD prevede și o serie de dezavantaje cum ar fi: condiții specifice de racordare a SER cu rețelele electrice de distribuției existente, investiții ridicate, costul ridicat al energiei produse din cauza menținerii capacității de rezervă și influența asupra nivelului de penetrare a sistemului electroenergetic.

Nivelul de penetrare asupra sistemului electroenergetic este determinat de numărul de surse de generare. Funcționarea intermitentă a SER are următoarele aspecte:

- profilul tensiunii în diferite puncte ale rețelei are valori diferite și depinde de cantitatea de energie generată;
- în urma generării intermitente apar tensiuni tranzitorii;
- valorile curenților de scurtcircuit se majorează;
- pierderile de e.e nu se modifică;
- calitatea și fiabilitatea e.e nu corespunde normelor și standardelor aprobate.

Totodată, instalațiile electrice ale consumatorului transformă e.e în alte forme de energie. Durata de viață, calitatea produsului final, securitatea acestora depinde de calitatea de e.e prestată de furnizor. Arhitectura clasică a rețelelor a stabilit standarde și norme care ar exclude careva posibilități de influență asupra utilajului. Arhitectura GD cu conectarea SER ce funcționează în diferite regimuri pot avea un impact negativ/pozitiv asupra calității e.e, iar rezultatul conectării nu este examinat.

Calitatea e.e reprezintă indicatorul de performanță a produsului finit, care indică posibilitatea aplicării acestui produs conform destinației fără careva pierderi (economice sau vitale). În așa mod SEE depinde de parametrii de calitate a e.e. la diferite trepte, iar careva modificări ale topologiei clasice cu conectarea unor instalații de generare a e.e conduce la distorsionarea parametrilor, poate genera avarii în întregul sistem la diferite trepte inclusiv și la treaptă de consum cu pierderi economice importante.

Problema de cercetare este actuală, are un interes major atât sub aspect teoretic și normativ, cât și sub aspect practic pe plan național și internațional.

Este de menționat că pe plan național dezvoltarea GD începe prin aprobarea Hotărârii Guvernului nr. 1092/2000 cu privire la resursele energetice regenerabile de unde apare necesitatea valorificării eficiente a SER prin care se aprobă planul acțiunilor autorităților publice centrale și locale privind utilizarea resurselor energetice regenerabile care prevede montarea unor

microhidrocentrale, agregat-pilot eolian, construirea unui sistem autonom de alimentare cu energie electrică antigrindină, ceea ce pune unele începuturi de cercetare în domeniul prenotat. Ulterior, este aprobată Legea energiei regenerabile nr. 160/2007 obiectul căreia este constituirea unui cadru juridic a sectorului energiei regenerabile în speță și pentru comercializarea e.e prin rețelele electrice de distribuție și/sau transport cu o putere de cel puțin 10 kW. Prezenta lege a fost abrogată prin Legea nr. 10/2016 privind promovarea utilizării energiei din surse regenerabile cu modificările următoare.

Așadar, temei pentru dezvoltarea domeniului cercetat este Legea nr. 29/2011 pentru ratificarea Statutului Agenției Internaționale pentru Energie Regenerabilă (IRENA), în care intră toate formele de dezvoltare a energiei regenerabile inclusiv și cele din domeniul electroenergetic (REJT).

În temeiul dezvoltării tehnologiilor, se constată necesitatea conectării producătorii de e.e din SER în REJT, iar cadrul legal din Republica Moldova nu permite și din acest considerent art. 29 alin (2) din Legea nr. 10/2016, se modifică prin obligarea furnizorilor să achiziționeze e.e din SER astfel consolidând necesitatea stabilirii impactului GD în REJT. Tot aici, apare și limitarea de putere posibilă de generare din SER până la 200 kW, dar nu mai mare decât puterea contractată.

Dezvoltarea GD pe teritoriul Republicii Moldova a condus la necesitatea aprobării unei Hotărâri de Guvern cu privire la aprobarea limitelor de capacitate, cotelor maxime și categoriilor de capacitate în domeniul energiei electrice din surse regenerabile până în anul 2020 (HG nr. 689/2018) pentru a putea limita capacitățile de generare și reduce impactul în rețelele electrice ceea ce pune în aplicare art. 34 din Legea nr. 10/2016, ulterior revizuită și reaprobată prin Hotărârea Guvernului nr. 401/2021 cu privire la aprobarea limitelor de capacitate, a cotelor maxime și a categoriilor de capacitate în domeniul e.e din surse regenerabile valabile până la data de 31 decembrie 2025 (cu modificările ulterioare).

Reieșind din cele expuse, se constată că Republica Moldova are un cadru normativ care oferă posibilitatea implementării GD din SER și de unde se stabilește o necesitate de cercetare a impactului asupra unor parametri de calitate a e.e fără modificări conceptuale ale arhitecturii SEE existent.

În așa mod, cercetarea în domeniul GD devine pentru Republica Moldova o actualitate dictată de Acordului de Asociere între Republica Moldova, pe de o parte, și Uniunea Europeană și Comunitatea Europeană a Energiei Atomice și statele membre ale acestora, pe de altă parte, care încurajează producerea e.e din surse regenerabile de către consumatori și dictează schimbul de consum-generare conform unei piețe libere.

Scopul cercetării constă în stabilirea impactului SGD conectate în REJT cu SD asupra calității e.e prin elaborarea unor metode noi de calcul ce ar permite stabilirea profilului de tensiune în diferite regimuri de funcționare precum și echivalarea surselor de tensiune prezentate de un spectru de armonici superioare condiționate de prezența sarcinilor neliniare în condițiile stabilirii profilurilor de tensiune în nodurile rețelelor electrice arborescente cu surse și sarcini distribuite.

Obiective specifice:

Obiectivul 1. Elaborarea procedurii de calcul al regimului staționar a rețelei electrice arborescente care v-a permite stabilirea profilului de tensiune pentru REJT cu SGD.

Obiectivul 2. Stabilirea procedurii de liniarizare a elementelor neliniare (surse distribuite de energie și sarcinilor neliniare cu componente liniare) din REJT, reieșind din profilul tensiunii stabilit în nodul rețelei examinate.

Obiectivul 3. Adaptarea metodei de calcul a rețelei electrice cu parametrii complecși în regim tranzitoriu pentru rețeaua arborescentă cu surse și consumatori distribuiți.

Obiectivul 4. Examinare impactului dependențelor dintre puterile consumate și generate conform curbelor de sarcină și generare asupra profilului de tensiune.

Obiectivul 5. Evaluarea profilului de tensiune în noduri pentru stabilirea impactului calitativ asupra calității e.e.

Ipoteza de cercetare constă în faptul, că profilul tensiunii poate fi analizat ca element al calității e.e și oferă posibilitatea stabilirii impactului generării și consumului distribuit în REJT, iar metodele utilizate pentru cercetare pot fi clasice și permit calculul profilului tensiunii din noduri conform topologiei rețelei în condiții de majorarea a puterii consumate de către receptorii racordați distribuit la aceste rețele și a cotei SGD. Totodată, rezultatele obținute pot fi aplicate la stabilirea impactului elementelor neliniare ale rețelei prin liniarizarea acestora și stabilirea valorilor inițiale ale tensiunii din noduri.

Sinteza metodologiei de cercetare și justificarea metodelor de cercetare. Au fost examinate și cercetate metodologiile existente de calcul a impactului SGD asupra calității e.e, de unde s-a ajuns la concluzia, că metoda curenților de buclă are mai multe avantaje privind soluționarea problemei științifice formulate, deoarece asigură mai multe posibilități de dezvoltare a procedurilor formalizate de calcul, care au la bază un algoritm determinist de elaborare a modelului matematic a circuitului analizat cu topologie aliatoare, determinată de distribuția receptorilor de e.e, variația puterii acestor receptori, inclusiv creșterea puterii lor, a puterii SGD racordate la această rețea de alimentare.

Implementarea rezultatelor științifice. Rezultatele cercetării sunt puse în aplicare prin publicarea a 13 lucrări științifice, prezentate la două foruri internaționale și trei conferințe științifice.

Aprobarea rezultatelor cercetării și valoarea aplicativă a lucrării. Rezultatele cercetării au fost implementate în procesul de proiectare „Modelul de calcul a rețelei electrice de joasă tensiune cu receptori distribuiți” și „Algoritmul de calcul a circuitului cu surse distribuite de energie” (Actele se anexează). Rezultatele au fost utilizate în cadrul proceselor decizionale a proiectanților la proiectarea rețelelor electrice de joasă tensiune cu SGD și SD.

Structurarea lucrării. Introducere, trei capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 121 de surse, 128 pagini text de bază, 62 de figuri, 11 tabele. Rezultatele obținute sunt publicate în 13 lucrări științifice, prezentate la două foruri internaționale și trei conferințe științifice.

Capitolul I. Analiza situației în domeniul cercetării impactului consumului și generării distribuite în REJT asupra calității e.e stabilește premisele și tendința dezvoltării GD la nivel global în dependență de evoluția conceptului de asigurare cu e.e sigură, curată și sporirea eficienței distribuției e.e. S-au examinat scheme de bază a GD, clasificarea receptorilor de e.e, cerințe către calitatea e.e în REJT, s-au identificat și analizat factorii cu impact asupra calității e.e, clasificarea receptorilor și a surselor de poluare a rețelelor electrice, analiza caracteristicilor SGD, ce convertesc energia SER în e.e. Se prezintă rezultate ale analizei indicilor de calitate a e.e. în contextul problemei științifice investigate, deci, acei indici care pot fi cei mai sensibili la schimbarea regimului de consum al receptorilor de e.e și generării distribuite în baza surselor de energie regenerabilă.

Capitolul II. Elaborarea metodologiei conceptului de analiză în rețeaua electrică de joasă tensiune cu surse și sarcini distribuite. În acest capitolul au fost propuse și argumentate abordări privind analiză regimurilor circuitelor electrice cu SGD și SD la funcționarea simultană pentru diferite condiții de generare (putere variabilă în timp a instalațiilor fotovoltaice conectate la rețeaua electrică de joasă tensiune). S-a argumentat procedeul de calcul al regimului permanent și tranzitoriu bazat pe metoda curenților de buclă pentru aplicare la calcularea regimului în REJT cu topologie variabilă. Această abordare permite aplicarea metodei curenților de buclă, fără a modifica algoritmul de elaborare a modelului de calcul a regimului, ce contribuie la un grad mai ridicat de formalizare a procedeului de calcul cu excluderea posibilelor erori, care pot apare la elaborare modelului circuitului respectiv. Procedeul propus permite stabilirea impactului individual a fiecărei SGD și a fiecărui RE racordați la rețeaua de alimentare. Pentru analiza

comparativă sunt prezente rezultate ale calcului regimului rețelei obișnuit cu alte metode de calcul: metoda clasică a curenților de buclă, metode combinate.

Capitolul III. Modelarea și verificarea corectitudinii conceptului și metodologiei propuse. Se prezintă rezultate ale simulărilor matematice ale regimurilor de funcționare pentru o porțiune a REJT cu utilizarea curbei reale de sarcină pe parcursul unei zile, care se poate modifica de la un sezon la alt sezon, concomitent se studiază și impactul variației sarcinii în condițiile de schimbare a puterii SGD. Condițiile inițiale utilizate în calcule, o analiză parametrică a impactului, diferiți factori asupra regimului REJT, sunt racordate la condițiile reale de funcționare a rețelei de alimentare cu e.e, luând în considerare majorarea lungimii porțiunii rețelei peste lungimea limită stabilită de către documentele normative în vigoare, precum și majorarea numărului de sarcini distribuite racordate la rețea. Sunt prezentate rezultate al simulării cu metoda propusă a regimurilor rețelei obișnuite cu aplicarea softului MATLAB, ce a permis o identificare a caracterului impactului SGD și SD asupra calității e.e. care va permite studierea la etapa de prefzabilitate și fezabilitate, elaborarea unor produse analitice ce pot fi ulterior utilizate pentru formularea condițiilor tehnice pentru cercetare sau proiectare.

I. ANALIZA SITUAȚIEI ÎN DOMENIUL CERCETĂRII IMPACTULUI CONSUMULUI ȘI GENERĂRII DISTRIBUITE ÎN REȚELELE DE JOASĂ TENSIUNE ASUPRA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE

1.1. Scurt istoric privind dezvoltarea generării energiei electrice

Studierea fenomenelor electrice își are originea în epoca antică odată cu descoperirea fenomenului de magnetizare în regiunea Thessalía din prefectura Greacă Magnesia. În lucrările sale filosoful grec Sōkrátēs atestă că „pietrele Magnesia” atrag elementele din fier, iar fenomenele de electrizare pentru prima dată au fost descrise de filosoful grec presocratic Thales din Milet (cca 640 î.n.Hr. – 550 î.n.Hr.). Dezvoltarea acestor fenomene în producerea e.e în acea perioadă era dificilă, succesul maxim obținut era utilizarea chihlimbarului în curățarea hainelor de praf datorită fenomenului de electrizare [1, 2].

Prima aplicație practică a fenomenului de magnetizare o are apariția busolei și este folosită în marină cu succes. Marele demnitar al imperiului Sòng Cháo, filosoful și enciclopedistul Shen Kuo (1031-1095) descrie pentru prima dată în lucrările sale despre necorespunderea acului busolei cu punctele cardinale Nord-Sud astfel descriind fenomenul de magnetizare [1,2]. În anul 1269, Pierre de Maricourt descrie proprietățile magneților prin liniile câmpului magnetic [1,3]. Fenomenul de necorespundere a acului ceasornicului este observată în Europa de către Cristoforo Colombo în anul 1484 în timpul navigării prin Oceanul Atlantic[1,4]. În anul 1550, omul de știință Gerolamo Cardano face pentru prima diferența dintre forțele magnetice și cele electrice [1,5]. În așa mod în anul 1600 pentru prima dată cercetătorul englez William Gilbert în urma studierii fenomenelor de magnetizare definește conceptual fenomenul de electricitate [1,6]. În 1646 englezul Thomas Browne utilizează în lucrările sale cuvântul de electricitate [1,7].

În anul 1808 de către inventatorul Sir Humphry Davy, 1st Barone este pentru prima dată transmisă e.e de la două baterii la o sursă de lumină astfel apare primul circuit electric [1,8].

Studierea ulterioară a fenomenelor electricității începe cu Georg Simion Ohm cu ajutorul unei pile electrice executate de către Volta. Din anul 1826 odată cu apariția legilor descrise de Ohm începe o nouă etapă de calcul a circuitelor electrice [1,8].

În anul 1831, Michael Faraday a inventat generatorul electric propulsat de un motor cu abur, micșorând prețul e.e semnificativ [1,8,9].

Aplicarea legilor descrise și alcătuirea circuitelor compuse pentru acea perioadă pune baza creării SEE. Spre exemplu, în anul 1844 la Paris, apoi în Philadelphia este prezentată lampa electrică cu arc inventată de către Humphrey Davy în anul 1808 [1,8].

În 1879, Edison construiește prima rețea de distribuție a e.e și îl brevetează. Această rețea este alcătuită din: sursă de c.c, conductoare de legătură și becuri incandescente. La 4 septembrie 1882, în New York City, de către Edison este creată prima rețea de distribuție și furnizare a e.e destinată alimentării a cca. 85 de clienți, cu cca. 400 de becuri [1, 8, 7].

Totodată, pe teritoriul Rusiei Țariste în orașele mari așa precum Moscova și Sankt Petersburg, după înființarea unei structuri energetice (1880) care avea scop promovarea politicilor în domeniul electroenergetic, în anul 1882 apar și primele rețele de furnizare a e.e destinate consumatorilor mici. În anul 1883, este construită prima centrală electrică alcătuită din 12 generatoare puse în funcțiune de 3 locomobile [11].

În această perioadă se atestă și primele cercetări în domeniul conversiei energiei solare în energia electrică, spre exemplu, în 1883 în baza cercetărilor efectuate de către Alexandre Edmond Becquerel (a. 1839), Willoughby Smith (a. 1873), William Grylls Adams și Richard Evans Day (a. 1876) este confecționată de către Charles Fritts, prima celulă fotovoltaică cu eficiență de 1% [8].

În anul 1887, Edison are în proprietate cca. 100 de stații electrice de generare pe curent continuu caracterizate prin pierderi mari de energie la lungimi de cca. 1-2 km, fapt prin ce se impune crearea unui nou concept de generare [8,10,12].

În anul 1888 fizicianul Nikola Tesla creează generatorul polifazic care îl conectează la sistemele electrice existente și creează conceptul de generarea multifazică, care pune bazele dezvoltării rețelelor electrice. În anul 1891, în Germania experimentatorul rus M. O. Доливо-Добровольский, transmite la distanța de 175 km (Laufen – Frankfurt) e.e produsă de un motor electric asincron trifazat acționat de o cascadă de apă artificială și astfel pune la bază dezvoltarea transportului de e.e generată din surse trifazate cu puterea de 220 kW și tensiune de 23,8 kV [8,10,13,14].

Reieșind din faptul, că la acel moment erau diferite clase de tensiune și surse de e.e (în 1895), pentru prima dată se introduc careva standarde unice care ar satisface cerințele producătorilor de utilaj. În baza deciziei luate se construiește stația de generare Adams amplasată pe Cascada Niagara cu următorii parametri: sistem trifazat, curent alternativ, tensiunea de 11 kV care are menirea de a transporta e.e în regiunea Buffalo din SUA [15].

Amplasarea centralelor electrice în nemijlocită apropiere de consumatori reprezintă prima concepție de GD. În anul 1873 Lenz, prin intermediul unei linii de 1 km, pune în funcțiune o pompă și este prima persoană care reușește să transporte energia mecanică la distanță prin conversia acesteia din e.e, astfel demonstrează că același tip de motor electric poate funcționa în regim de generare și consum [8, 16].

Consumatorii de e.e distribuită, precum iluminatul stradal, iluminatul clădirilor publice efectuat prin lămpile cu arc electric și cele cu filament devin pentru prima dată consumatori de energie distribuită [8].

Dezvoltarea primară a sistemelor electroenergetice era bazată pe utilizarea generatoarelor de puteri mici. Spre exemplu, în SUA, în anii 1880-1910 generatoarele erau amplasate pe râuri în zone muntoase cu o densitate de populație ridicată. În Germania producerea e.e avea la bază centralele electrice pe bază de combustibili fosili, precum cărbunele și lignitul. În Spania se construiesc centrale electrice în orașele Bilbao, Barcelona, Sevilla și Zaragoza. Dezvoltarea sectorului de construire a centralelor electrice se atestă în Italia, și anume, în orașele Milano, Genova, Veneția și Napoli. America Latină electrifică orașele Santiago de Chile (Chile) Buenos Aires (Argentina), și Montevideo (Uruguay). În România, în anul 1907 sunt instalate primele generatoare propulsate de motoarele Diesel [8].

Dezvoltarea electroenergeticii pe glob necesită investiții mari și fără implicări din partea statului era imposibilă. La acel moment, întreprinderile industriale în mare parte din cont propriu își asigurau rezerva de e.e, iar surplusul era livrat pentru consum public. Urmare a acestei tendințe în diferite țări se încep programe de dezvoltare a sectorului electroenergetic [8].

În anii 1910-1913 în Germania apar un șir de acte legislative care au menirea de naționalizare a rețelele electrice. SUA adoptă Legea cu privire la Utilitățile publice, care are scopul de a limita drepturile companiilor electroenergetice și de a monopoliza acest segment. Legea prevedea și unele aspecte privind cerințele tehnice pentru curentul electric. După anul 1895, aceasta este a doua etapă, când rețelelor electrice se impun câteva condiții reglementate de stat ce țin de unii parametrii a e.e. [8].

Anul 1913 îl putem considera și anul finalității dezvoltării GD, deoarece în Germania începe construcția unei stații termoelectrice mari pe cărbune care va conecta, într-un circuit închis, toate rețele electrice existente la acea perioadă și va alimenta cca. 15% din gospodăriile rurale și 20% din gospodăriile urbane [8].

Programul de electrificare a Rusiei ГОЭЛРО aprobat în decembrie 1920 prevedea necesitatea de impunere a unor indicatori așa precum: cai putere, kWh, tensiunea pentru transport etc. Aprobarea acestui Program a fost linia de start a procesului de destrămarea GD în Rusia și dezvoltarea principiilor de sistem. Deoarece întreg complex energetic de până atunci era construit de companiile germane putem considera, că dezvoltarea sistemului energetic din Rusia avea experiența germană din regiunea Ruhr [7].

Pe râul Colorado, în anul 1922 - 1923, 7 state ale Americii construiesc centrale hidroelectrice, iar în anul 1924 în SUA erau deja 35% din casele private racordate la rețeaua publică, iar în unele regiuni ale Californiei cifra ajungea și la 83% [8].

Criza economică din Germania din 1924-1927, asigură dezvoltarea GD prin montarea generatoarelor de mică putere, instalarea cărora necesită investiții mai mici. GD trece printr-o nouă modernizare de la micro rețele în generare către un sistem electroenergetic cu utilitate publică [8].

În SUA, în anul 1933, GD se dezvoltă conform Programului Comisiei Schacht, care prevede o creștere a vânzărilor de e.e bazată pe creșterea capacității de generare. La acel moment, funcționau 1500 de centrale de putere mică, care urmau a fi înlocuite cu câteva centrale mari [8].

Tot în același an (1933) este adoptată unitatea de măsură pentru puterea reactivă – Var. Aceasta este propusă de profesorul Constantin Budeanu la Forul Internațional din Stockholm, care reprezenta Comitetului Electrotehnic Român. Această a fost o propunere deosebit de importantă în dezvoltarea etalonării calității e.e. [7].

Anul 1935 plasează URSS după volumul de producere a e.e pe locul 2 în Europa și locul 3 în lume cu crearea următoarelor sisteme electroenergetice regionale: Moscova, Leningrad, Donbass, Ural. În anul 1940 este construită prima linie electrică de 220 kV care interconectează sistemul Dnepr cu sistemul Donbass [8].

Din cauza dezvoltării mai lente a sistemului național Românesc în anii 1940 elementele GD predomină. Centralele de utilitate publică aveau o capacitate de generare mai mică decât centralele amplasate la uzine și fabrici, dar aceasta nu satisface cerințele de e.e pe țară și populația era deservită în raport de 25% din numărul total al populației țării. Comparativ cu țările Europene în anul 1941 satele românești erau alimentate aproximativ cu 3.3%, ce prezintă un nivel scăzut de electrificare [8].

Anul 1942. Comisia Electrotehnică Internațională standardizează tensiunea de transport egală cu 275 kV. Este o dată importantă referitor la parametrii e.e cunoscuți de atunci și astfel constituie o nouă filă în dezvoltarea sistemului calității e.e. [8].

Modernizarea turbinelor cu aburi, creșterea capacității unitare de generare între anii 1950-1970, diminuează costurile centralelor, reduce suprafețele de montare, reduce distanțele liniilor electrice inclusiv consumul propriu de energie de la rețelele publice cu excluderea dezvoltării a GD [8].

Alt aspect referitor la diminuarea cercetărilor în domeniul GD îl constituie dezvoltarea centralelor nucleare. Prima centrală nucleară este construită în 1954, URSS regiunea Kaluga, or. Obninsk cu o putere nominală de 5000 kW. Tot în acest an în SUA începe construcția primei centrale nucleare cu puterea de 90 MW [8,17].

Începutul anilor 1970 în URSS are loc crearea sistemului electroenergetic unificat. În perioada dintre 1968-1970 se construiesc cele mai lungi linii electrice de transport și se fac cele mai mari studii în domeniul cercetării transportului e.e la distanțe mari, ce diminuează cota GD [8].

Criza de energie din anii 1973-1975 în SUA evidențiază creșterea prețurilor la e.e și dependența acestora de combustibilii fosili. În SUA se încep cercetări în căutarea a unor noi surse de energie și anume a SER, conectate local în zona de consum constituie o nouă fază a dezvoltării segmentului GD moderne [8, 18].

După avertizarea de către Comisia Nucleară de Reglementare a SUA din anul 1979 cu privire la suspendare a cinci reactoare nucleare, care pot provoca accidente nucleare conduce la situația, că GD își întărește pozițiile. Un punct crucial a promovării energiei nucleare a fost accidentul nuclear din Cernobîl în 1986, URSS [8, 19].

Implementare SER pe scară largă începe după semnarea protocolului de la Kyoto din Japonia, care obligă țările semnatare cu economie de tranziție să reducă emisiile cu efect de seră. În anul 2009, Israelul devine prima țară care conform protocolului de la Kyoto construiește centrală electrică hibridă care funcționează pe energia solară și arderea gazelor. În lipsa energiei solare aceasta funcționează prin arderea gazelor naturale. În baza analizei s-a elaborat Anexa 1 și graficul din figura 1.1, care ilustrează teoria dezvoltării fractale introdusă de Benoit Mandelbrot în 1975 în domeniul economiei și dezvoltat la moment în domeniul energiei de către Бушуев Виталий [21, 22].

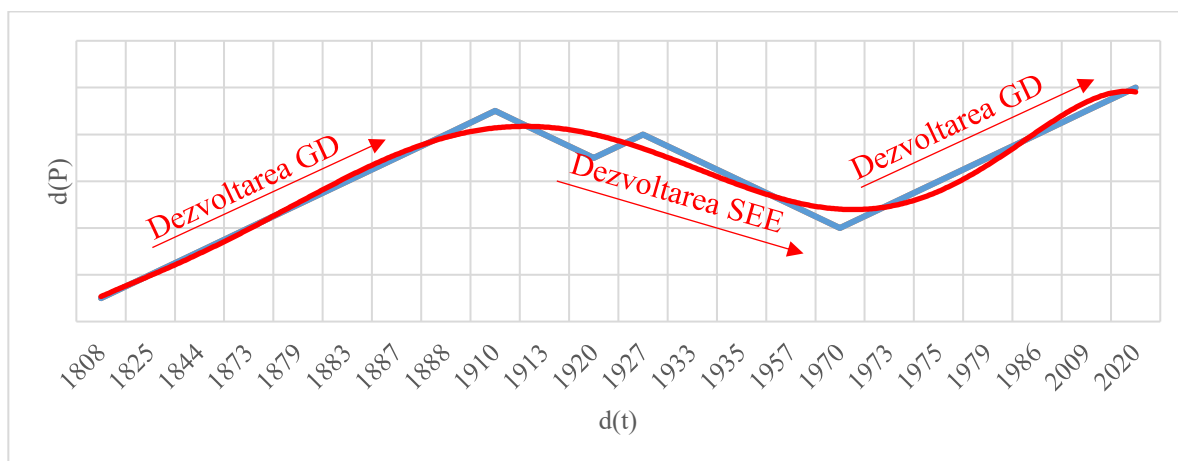


Fig.1.1. Evoluția caracteristică GD în dependență de puterea instalată

Din figura 1.1 reiese, că $\frac{d(P)}{d(t)} > 0$ în perioada anilor 1808-1910, 1920-1927 și 1970 – prezent. Deci, pentru aceste intervale, se identifică o rată de dezvoltare a puterii instalate cu

generare mică (distribuite), iar în anii 1910-1920, 1927-1970, $\frac{d(P)}{d(t)} \rightarrow 0$, deci, puterea instalată tinde spre zero, deoarece în această perioadă sunt dezvoltate sistemele electroenergetice mari. (P) - puterea de generare instalată, (t) - perioada de montare).

În anul 2009 Uniunea Europeană adoptă Directiva UE 2009/28, care are scopul de a spori utilizarea e.e din SER, iar în anul 2013, în Hamburg, Germania este construită o casă, care este independentă de energia centralizată, care se alimentează din SER [8].

Dezvoltarea GD a început odată cu descoperirea și aplicarea fenomenelor de electricitate și magnetizare și nu reprezintă forma clasică a GD. Odată cu apariția primelor circuite electrice, începe cercetarea fenomenelor electrice cu descrierea legilor clasice ale circuitelor. Aceste legi devin fundamentale în dezvoltarea ulterioară a GD și sunt aplicate și în prezent la calcularea diferitor fenomene electrice ce apar în sistemele actuale.

Graficul din figura 1.1 reprezintă perioadele de creștere și declin a dezvoltării GD. Aceste variații se datorează dezvoltării tendințelor de dezvoltare a economiei. Spre exemplu, investițiile și intervențiile din partea statului în dezvoltarea sectorului electroenergetic stopează dezvoltarea GD, dar stimulează dezvoltarea sistemele electroenergetice mari. Analizei dezvoltării GD indică, că acestea se datorează companiilor private, crizelor economice, crizelor politice, accidentelor nucleare și a avariilor din sistemele energetice mari.

Amprenta inovativă în aplicarea GD o au tehnologiile noi pe anumite perioade de timp care sunt aplicate hibrid la dezvoltarea sectorului prenotat, și anume: implementarea generatoarelor multifazice de c.a (1888), montarea hidrogeneratoarelor (1924-1927), conectarea SER (1986), conectarea SER la sistemele existente cu automatizarea acestora prin intermediul internetului (prezent).

Valorificarea SER reprezintă un obiectiv prioritar al politicii energetice, la nivel mondial. Până în anul 2020, majoritatea țărilor de pe glob preconizează limitarea emisiilor de CO₂ de la centralele electrice din aceste țări.

Capacitatea de generare a e.e al SUA în anul 1990 reprezintă cca. 42% din capacitatea totală de generare, iar combustibilul principal a fost cărbunele. La finele anului 2014 cota capacității de generare a e.e din cărbune scade cu 28% și reprezintă 39% din producția totală de e.e. Pe parcursul aceași perioade, ponderea capacității de generare a e.e pe bază de gaze naturale creștere semnificativă de la 19% în anul 1990, la 40% în anul 2014. Tot în această perioadă capacitatea de generare a e.e la centralele nucleare rămâne constantă și reprezintă cca. 20%.

Producerea e.e din SER este în creștere comparativ cu cea generată de hidrocentrale. Spre exemplu generarea energiei din surse eoliene a crescut semnificativ de la 0,2 % în anul 1990 la apx. 6% în anul 2014, iar cota efectivă de producere de la 0,1% la 4%. Se atestă o creștere și în producerea e.e din energia solară în aceeași perioadă de la 0% la 1% [21].

Creșterea capacităților de generare a centralelor eoliene în SUA a început în anul 2008 și până în anul 2014 a atins 31% din totalul surselor de energie instalate. În 39 de state ale Americii în anul 2014 s-au instalat 65.000 de MW de energie eoliană, care este suficientă pentru a putea asigura cca.16 mln. de gospodării. Tot în anul 2014 erau proiectate instalații eoliene cu capacitatea de generare de 13.600 MW care erau preconizate pentru instalare în anul 2015 [23].

Vântul în anul 2015 a oferit apx. 4,4% din producția totală din energia electrică din SUA. În unele state ale Americii cota de generare din surse eoliene reprezintă cca. 10%. Acest fapt reduce emisiile de dioxid de carbon în anul 2013, cu 115 mln. t.e.p, iar consumul de apă s-a redus cu 137 mln. tone, astfel oferind noi locuri de muncă [22].

Creșterea rapidă a puterii instalate din sursele de generare eoliene a condus la micșorarea prețurilor la e.e, spre exemplu, în anul 2008 un kWh costa 7 cenți, iar în anul 2009 prețul s-a micșorat până la 2,4 cenți/kWh și a condus la construirea unor linii electrice de interconexiune cu sistemul electroenergetic cu insuficiență de generare (linia electrică din Texas) [22].

În anul 2008 se manifestă o sporire a generării e.e din centrale fotovoltaice în SUA. În anul 2014 creșterea capacității de generare atinge indicele de 99% în comparație cu anul 2009 și reprezintă 9,7 GW. Această tendință se extinde și în anul 2015, unde capacitatea de generare prezintă o creștere de 15% față de anul precedent. Creșterea se datorează căderii prețului pentru instalațiile PV, de la 3,57 \$/W instalat până la 0,71 \$/W [24, 29].

În anul 2011 China a aprobat planul cincinal (2011-2015) în care se prevede reducerea emisiilor de CO₂. În perioada anilor 2010-2015 capacitatea de generare din surse eoliene crește de la 42 GW la 113 GW, iar capacitatea de generare din surse de energie solară de la 1 GW în anul 2010 la 43 GW în anul 2015. Investițiile financiare în această perioadă în producerea energiei verzi cresc cu 120%. Pentru prima dată în acest secol, în anul 2014, scade cu cca. 2,9% consumul de cărbune pentru producerea energiei electrice, iar în continuare se observă o descreștere de cca.3,7% în anul 2015. Rata de creștere a capacității de generare din SER în China în această perioadă este de cca. 20%. China la momentul actual are cinci companii din topul de zece companii din lume în producerea turbinelor eoliene și trei companii din topul celor zece în producerea panourilor PV [23].

La finele anul 2015, Regatul Unit al Marii Britanii obține o capacitate totală de generare a energiei din SER de 30,0 GW, iar cea mai mare pondere o deține generarea eoliană și cea solară.

Reducerea emisiilor de CO₂, în perioada anilor 2013-2014 se datorează implementării SER care micșorează emisiile cu 7% [24]. Producerea e.e. de către Regatul Unit al Marii Britanii constituie cca. 6,8% din energia totală produsă de toată Comunitatea Europeană.

Creșterea producției de e.e din SER, în cadrul Uniunii Europene s-a intensificat odată cu adoptarea directivelor europene din anul 2009 privind energia regenerabilă. Aceasta este confirmată și de analiza efectuată de către ENTSO-E care arată o creștere totală de producere a energiei din SRE, pe parcursul anilor 2001-2015, cu 28,8%. Acest factor reduce producerea energiei electrice nucleare în această perioadă cu cca. 9%. Producția lunară de e.e. integral constituie 12 % din producerea totală a energiei consumate de UE, astfel, contribuind la micșorarea emisiilor de CO₂ [25].

Sursele de generare a e.e din SER în România în perioada anilor 1990-2021 reprezintă 17,7-44,4 GWh/an, ceea ce avut un impact asupra micșorării în ansamblu a emisiile de CO₂ de la 162 (MtCO₂) în anul 1990, la 69 în anul 2021. Spre exemplu, dependența energetică de import al României în anul 2013 este de cca.18,6 % deci, cu diminuare de la 30,3% în anul 1995 [26].

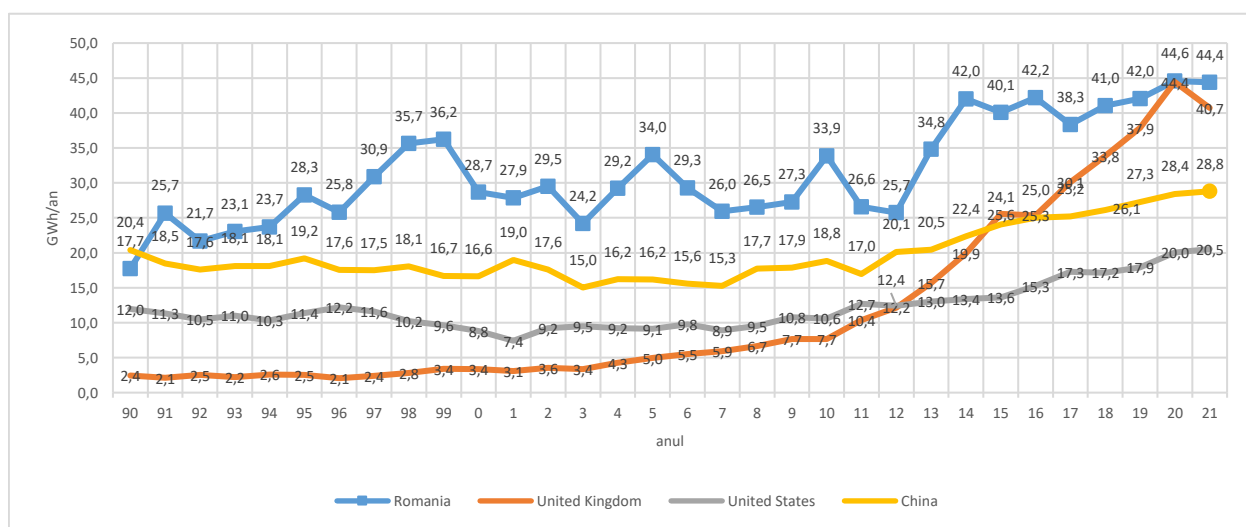


Fig.1.2. Generarea din SER în SUA, România, Regatul Unit al Marii Britanii, China (1990-2021),[27]

Tot aici stabilim că în perioada anilor 2020-2021, avem o creștere a producerii e.e din SER cu +15,7 puncte (România), +37,4 puncte (Regatul Unit al Marii Britaniei), +11,7 puncte (USA) și +12,2 puncte (China).

Conform analizei mondiale a consumului brut de energiei în perioada anilor 1990 - 2021 se constată creșterea consumului de energie. Acest fenomen se datorează creșterii numărului de locuitori pe glob (2010-). Din perioada de 2000-2021 se atestă o creștere de 1,8% per an [27].

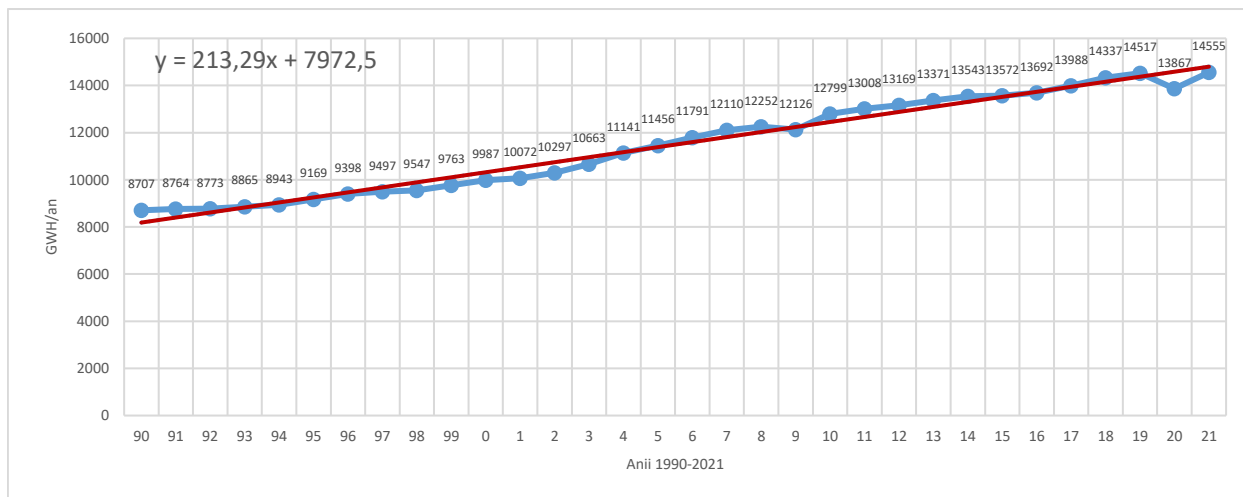


Fig. 1.3. Consumul mondial brut de e.e în perioada 1990-2021 [27]

Analiza datelor statistice indică, că țările cu o economie dezvoltată în perioada anilor 2010-2021, își majorează volumul economiei, iar ca rezultat se manifestă tendința de creștere a consumului de e.e. În medie, se atestă o creștere a PIB-ului mondial de circa 3,2% în anul 2014 și 3,4% în anul 2015. Principalii producători de emisii de CO₂ în această perioadă sunt considerați SUA și China, dar care în urma implementării SER au micșorat emisiile de CO₂ [27]. În perioada anilor 2000-2021, se atestă o creștere de +1,8 % a emisiilor.

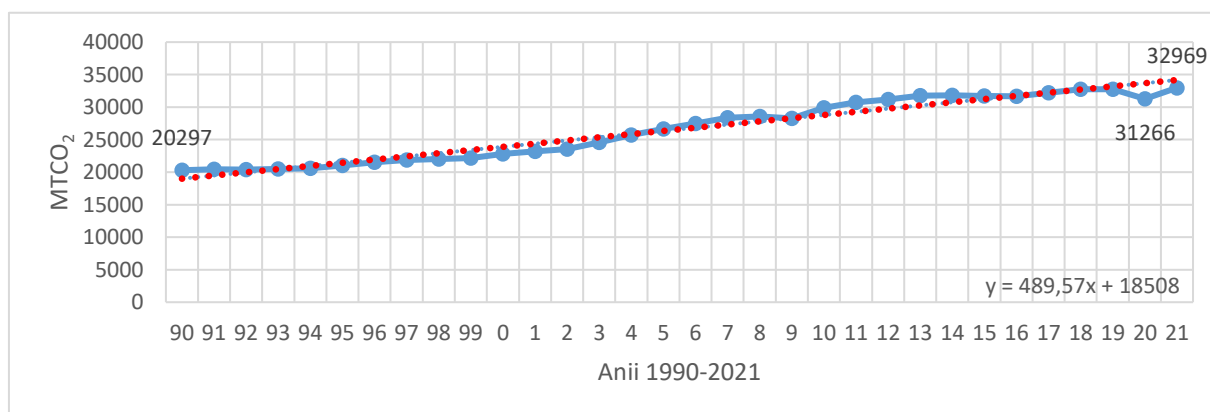


Fig. 1.4. Diagrama emisiilor de CO₂ în perioada anilor 1990-2021 [27]

Astfel se poate constata, că GD este caracterizată prin implementarea tehnologiilor noi care conduc la efecte pozitive, cum sunt modernizarea sistemelor electroenergetice și sporirea eficienței acestora, inclusiv, urmare a creșterii utilizării resurselor regenerabile. Conform datelor statistice, la implementarea acestor surse se atestă o micșorare sau stabilizare a creșterii emisiilor de CO₂ în perioada anilor 2014-2016. În anul 2020 (datorită COVID-19) se atestă o scădere semnificativă a emisiilor de CO₂.

În lucrările [28-33] sunt analizate puterile instalate din SGD din cadrul Federației Ruse și analizate perspectivele de dezvoltare a acestei ramuri. Stabilim un interes al cercetătorilor asupra prognozelor și posibilităților de instalare a surselor de putere mică, cadrul normativ, indici și date statistice cu justificarea importanței GD în caz de descentralizare a sistemelor electroenergetice. Aspectul principal de cercetare este trasat pe analiza surselor principale de energie regenerabilă, impactul economic și financiar precum și tendința de a dezvolta energia regenerabilă pe teritoriul Federației Ruse în diferite ramuri ale economiei. Analizele comparative în lucrări sunt de ordinul puterilor instalate, iar tendințele de cercetare sunt în justificarea utilizării GD fără a indica impactul calitativ a energiei.

În lucrările [33-35] stabilim cercetări în domeniul conectării surselor distribuite utilizând pachete de modelare dinamică bazate pe cercetarea: regimurilor de funcționare, dirijarea cu instalațiile de la distanță, utilizarea programelor necesare modelării. Un interes sporit în domeniul modelării GD o are și programa MATLAB care permite modelarea REJT cu GD.

Totodată, stabilirea unei programe ce ar permite modelarea consumului și GD concomitent este o problemă care necesită a fi analizată și studiată.

Spre exemplu, pe teritoriul Republicii Moldova, conceptul de GD a fost propus la începutul anului 2000 și prevedea instalarea la centralele termice din cadrul autorităților administrației publice locale de nivelul întâi, montarea generatoarelor electrice și generarea e.e în SEE. La acel moment centralele termice raionale dispuneau numai de posibilități de producere a apei menajere. Conceptul propus în [36, 37] nu se integrează în starea actuală a lucrurilor în domeniul de cercetare a GD și în acest sens este necesar de examinat posibilitățile actuale.

Conform rapoartelor anuale ale Agenției Naționale de Reglementare în Energetică, analiza GD din SER în Republica Moldova în perioada dintre anii 2013-2023 are un conținut nestandardizat dar în continuă creștere conform profilurilor de producere a e.e:

Puterea instalată a energiei solară este în creștere, spre exemplu după implementarea contorizării nete se stabilește o producere distribuită de la 57 de producători de energie distribuiți în perioada de până în anul 2018, la peste 5000 de producători, iar capacitatea a crescut de la 0,5 MW la 115 MW în anul 2023.

Energia eoliană atestă provocări majore în instalare deoarece, pe teritoriul Republica Moldova puterile de instalare sunt relativ mari, iar capacitatea de transport este una limitată. Cu toate acestea, puterea instalată se estimează de cca. 21 MW, către anul 2023.

Așadar, în anul 2024 au fost operate modificări de legislație care prevăd trecerea de la facturarea netă la mecanismul de contorizare netă ceea ce deschide oportunități de implementare a energiei solare pe o scara largă.

Concomitent de către, anul 2023, puterea instalată din SER se estimează de 343 MW. Cele mai multe centrale solare sunt instalate în raioanele Cahul, Cimișlia și Cantemir cu o putere de peste 40 MW.

Puterile generate diferă de cele instalate și corespund datelor din tabelul nr.1.

Tabelul.nr. 1.1. Energia generată din SER conform datelor ANRE

Anul	Energia generată, kW							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Energie solară	1311	1509	1457	1437	3275	7764	30297	77748
Energie eoliană	2477	7065	21968	36915	50138	76310	142373	191290
Total	3788	8574	23425	38352	53413	84074	172670	269038

Spre exemplu, în municipiul Bălți puterea instalată este de 4 MW, iar în raionul Orhei puterea instalată este de cca. 10 MW, raioanele Nisporeni și Strășeni de 3-5 MW, iar raioanele Nisporeni și Ungheni de cca. 7 MW.

Potențialul eolian către anul 2023 este de (67,6 %), energia solară este de (27,5 %), energia produsă din biogaz (4,9 %). Statistica indicată reprezintă datele oficiale ale Agenției Naționale de Reglementare în Energetică și corespund datelor oferite de către operatori.

Așadar, în baza analizei efectuate se stabilește că problema impactului GD asupra calității e.e se poate examina prin prisma profilului de tensiune din nodurile rețelei, iar analiza calității unor parametrii cantitativi se poate cerceta în orice nod a rețelei electrice.

Regimurile de funcționare ale rețelelor electrice pot avea multe particularități în funcție de destinația lor, topologia circuitului rețelei, distribuția sarcinilor și ale surselor de generare, care pot avea diferite caracteristici. În scopul determinării parametrilor regimului rețelei se utilizează diverse metode de calcul și instrumente soft. Pentru a obține rezultate corecte și veridice este necesar de selectat și adaptat metodele și softurile de calcul la topologia și particularitățile concrete de funcționare ale rețelei. Se prezintă rezonabil, că la prima fază de selectare a metodelor, modelelor și softurilor de calcul, preconizate spre aplicare, să se examineze cele mai simple și frecvent utilizate instrumente, iar în caz de obținere a unor rezultate nesatisfăcătoare sau imposibilitatea de a aplica la direct metodele cunoscute de elaborat versiuni modificate sau noi metode de calcul și analiză a impactului GD asupra calității e.e. Aplicarea unui model simplist de calcul poate avea avantaje, doar în cazul, că rezultatele obținute vor avea precizia necesară și vor conduce la rezolvarea problemei științifice formulate.

Calcularea rețelelor are ca scop dimensionarea lor și determinarea regimurile, care pot afecta continuitatea alimentării și calitatea energiei furnizate consumatorilor, precum și elaborarea măsurilor de depășire sau excludere a situațiilor de risc sau de afectare a calității energiei electrice

în aceste rețele. Utilizarea unor metode și modele relativ simple de calcul sunt competitive în cazul calculelor și analizei regimurilor permanente. Problema devine mult mai dificilă în cazul necesității calculării regimurilor tranzitorii (nestaționare, inclusiv, de avarie), care pot prezenta cel mai ridicat risc pentru continuitatea alimentării și asigurării calității e.e furnizate. Determinarea ariilor de utilizare a diferitor metode de calcul și analiză a regimurilor în REJT cu topologie complexă prezintă interes științific privind asigurarea indicilor de calitate a e.e, fie că energia se furnizează din rețelele electrice centralizate, fie că din sisteme autonome (locale) de alimentare, sau se operează cu o rețea complexă ce include rețeaua centralizată și rețeaua electrică locală, care are posibilități de funcționare în regim autonom.

Complexitatea calculului și analizei regimului în REJT este determinată și de faptul că, topologia sistemului de alimentare include un număr mare de receptori, care pot fi receptori cu caracteristici liniare și neliniare. Totodată, receptorii moderni de energie au o distribuție spațială cu tendința de creștere a cotei receptorilor cu caracteristici neliniare. Creșterea cotei receptorilor cu caracteristici neliniare, care injectează în circuitul rețelei de alimentare un spectru larg de armonici superioare de curent, nu numai că conduce la creșterea pierderilor în rețea și la apariția curenților de dezechilibru de frecvență înaltă (crește valoarea curentului prin conductorul nul al REJT), dar creează dificultăți la calcularea chiar a regimului permanent în această rețea de alimentare [38]. Urmare a acestora, precum și creșterii complexității rețelelor de alimentare de joasă tensiune în caz de conectare la aceste rețele a SGD, preponderent în baza energiei regenerabile, apare necesitatea efectuării unei analize a metodelor existente de calcul a impactului utilizând metode clasice ce va permite estimarea nivelului de satisfacere a noilor provocări menționate, inclusiv, și a impactului noilor provocări asupra indicilor de calitate a energiei electrice.

Arhitectura arborescentă a REJT, diferită de arhitectura arborescentă a rețelelor electrice de medie și înaltă tensiune, impune necesitatea aplicarea unor procedee de calcul și analiză, care pot asigura corectitudinea, veridicitatea și nivelul preciziei rezultatelor calculelor regimurilor permanente și tranzitorii în aceste rețele. Metodele simplificate nu permit analiza acestor regimuri, fapt ce poate conduce la subdimensionarea instalațiilor, estimarea incorectă a indicilor de calitate a energiei electrice prin calcule, cu impact negativ asupra fiabilității și eficienței de funcționare a receptorilor finali de e.e, precum și micșorarea duratei de viață a echipamentelor din rețelele electrice cu posibile refuzuri și accidente periculoase atât pentru integritatea fizică a receptorilor, cât și pentru rețeaua de alimentare.

Neliniaritatea consumatorilor și amplasarea lor distribuită, caracterul intermitent al generării în baza SER, abaterile între curbele de consum și de generare sunt factorii, care determină

necesitatea unor noi abordări a analizei regimurilor de funcționare a REJT, iar diagnosticarea poate începe din studierea profilului din nodurile acestor rețele.

Aplicarea unei singure metode sau a unui procedeu devine imposibilă odată cu dezvoltarea segmentului de generare distribuită cu caracter intermitent, care sunt conectate în multe noduri ale REJT, inclusiv, celor cu topologie arborescentă. Modificarea topologiei rețelelor, inclusiv, a numărului de SGD în baza valorificării energiei regenerabile, care este un proces în dinamică, conduce la necesitatea aplicării mai extinse a metodelor de calcul și a simulărilor matematice ale regimurilor de funcționare a rețelelor în baza schemelor echivalente și a modelelor matematice, care sunt mult apropiate de particularitățile și proprietățile rețelelor electrice examinate. În acest context, rezultatele calculelor și simulărilor matematice prezintă interes nu numai la faza de proiectare, dar și la faza de exploatare activă a rețelelor, urmare a caracterului volatil în timp a topologiei lor (schimbarea caracteristicilor de consum și generare, inclusiv, creșterea sarcinilor cu caracter neliniar, a capacităților de generare racordate la rețeaua de alimentare). Aceste observații constituie o argumentare a necesității elaborării a unor noi viziuni și abordări privind selectarea și utilizarea metodelor de calcul și analiză REJT la modificările topologiei lor, care poate avea și un caracter neprogramat, dar cu impact asupra indicilor de calitate a e.e, care sunt prescriși de standardele în vigoare.

REJT au o structură extinsă și alimentează un număr mare de consumatori. Urmare, a acestei particularități problema selectării și utilizării unui procedeu de calcul, care ar îndeplini toate condițiile privind derularea proceselor fizice în aceste structuri în consecutivitatea lor naturală de derulare. Pentru o simplificare a procedurii de elaborare a modelului matematic de calcul a parametrilor de funcționare a REJT se prezintă rezonabil de analizat metodele cunoscute de calcul al circuitelor electrice, începând cu metodele elaborate pentru analiza circuitelor de curent continuu.

Rezolvarea problemei de studiere a impactului SGD, se propune prin identificarea unor metode de calcul a profilului tensiunii din nodurile rețelelor care prin operarea modificărilor va acorda suport în stabilirea măsurilor tehnice de diminuare a impactului.

Bazele Teoretice al Electrotehnice ne pot prezenta un ansamblu de metode de calcul a circuitelor electrice, preponderent, care sunt prezentate de scheme echivalente cu parametri concentrați:

1. Legea lui Ohm.
2. Teoremele Kirchhoff .
3. Metoda curenților de contur (de buclă);
4. Metoda potențialelor nodale;

5. Metoda cu două noduri;
6. Metoda superpoziției;
7. Metoda generatorului echivalent de tensiune (GET);
8. Metoda generatorului echivalent de curent (GEI) etc. [39]

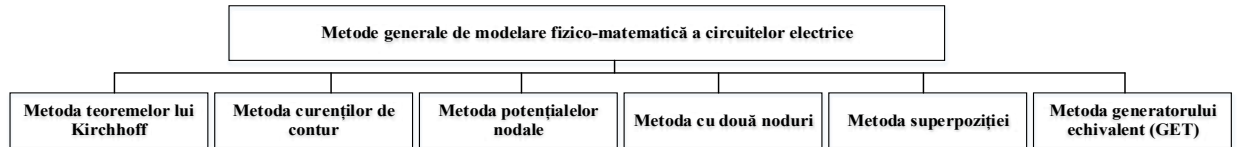


Fig.1.5. Metode de calcul a circuitelor electrice

Teoremele Kirchhoff. În baza unui circuit existent arbitrar se aleg sensurile de curgere a curenților în ramurile circuitului. Un circuit cu n noduri și r ramuri, formează un număr de ecuații egal cu r . Ecuațiile întocmite pentru prima teoremă a lui Kirchhoff trebuie să fie la număr de $(n-1)$ și numărul de ecuații întocmite conform prevederilor teoremei a doua Kirchhoff trebuie să corespundă numărului determinat de relația $(r-n+1)$. În cazul circuitelor de curent alternativ sinusoidal sistemul de ecuații obținut permite determinarea valorilor eficace complexe ale curenților $(\underline{I}_1, \underline{I}_2, \dots, \underline{I}_n)$. Valorile instantanee ale acestor curenți se pot determina prin utilizarea

relației $(i_k = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin(\omega t + \varphi_k))$, unde $\varphi_k = \arctan \frac{I_{k,r}}{I_{k,a}}$, unde $I_{k,r}; I_{k,a}$ componenta reactivă și activă a curentului I_k [39-45].

Metoda curenților de contururi (de bucle). Metoda examinată este realizată în baza teoremelor Kirchhoff și diferă de metoda clasică Kirchhoff doar cu un număr mai mic de variabile independente și ecuații în sistemul de ecuații, care prezintă echilibrul tensiunilor în circuitele selectate, care sau definita ca contururi sau bucle de curent. Curenții în porțiunile de circuit ale buclei, care sunt parte a altor bucle, se calculează cu utilizarea primei teoreme Kirchhoff [39-45].

Metoda potențialelor nodale. Această metodă se aplică în circuitele complexe în care numărul de noduri este mai mic ca numărul de contururi (bucle) independente. Se alege un nod n (nod de referință). Acestui nod i se definește potențialul egal cu zero $\varphi = 0$. Nodurile independente $(n-1)$ se notează ca $1, 2, 3, \dots, n-1$. La primul pas se construiește un sistem de ecuații pentru potențialele nodale $(n-1)$. Se rezolvă sistemul de ecuații obținut cu determinarea valorilor potențialelor nodurilor selectate în formă de mărimi complexe efective. La aplicarea Legii lui Ohm pentru o porțiune de circuit se calculează valorile eficace complexe al curentului în ramurile circuitului, iar verificarea metodei constă în aplicarea primei teoreme ale lui Kirchhoff [39-45].

Metoda cu două noduri. Metodă cu două noduri reprezintă o metodă particulară și se desprinde din metoda potențialelor nodale. La prima etapă se determină valorile eficace complexe între două noduri (a și b), iar apoi se determină valorilor efective complexe a curenților în ramurile circuitului prin aplicarea legii lui Ohm pentru o porțiune de circuit [39-45].

Metoda superpoziției (suprapunerii). La baza metodei este aplicată teorema suprapunerii efectelor în care intensitatea valorii efective a curentului, ca mărime complexă dintr-o ramură este prezentată ca suma curenților prin această ramură, care se scurg sub acțiunea tensiunii electromotoare a fiecărei surse a circuitului examinat, la atribuirea tensiunilor electromotoare a celorlalte surse valori egale cu zero.

Prima etapă de calcul constă în formarea schemei echivalente a circuitului, care include numai o singură sursă de tensiune cu atribuirea celorlalte surse existente în circuit valori zero pentru tensiunile lor electromotoare. Circuitul include toate valorile impedențelor circuitului real. Astfel, calculele repetate se repetă de atâtea ori, câte surse de energie sunt în circuitul examinat. La faza finală se sumează cu semnele obținute în calcul toți curenții (egali cu numărul de surse independente de tensiune din circuitul analizat) cu determinarea valorii curentului prin ramura respectivă. Această metodă este funcțională în cazul examinării circuitelor liniare [39-45]

Metoda generatorului echivalent de tensiune (GET). Se aplică în caz că este necesar de determinat curentul sau tensiunea într-o singură ramură. Metoda constă în separarea elementului pentru care se determină curentul. Hotarele de delimitare a circuitului se determină de două terminale pe care le notăm ca 1 și 2. Utilizând topologia pentru o schemă echivalente se determină impedența echivalentă (Z_e). În dependență de locul unde este necesar de calculat curenții se substituie porțiunea selectată cu impedența Z_e [39-45].

Metodele examinate sunt metode clasice de calcul a parametrilor regimului circuitelor electrice, inclusiv, utilizate la calculul REJT. O problemă separată o prezintă calcularea regimului în REJT în cazul funcționării cu sarcini neliniare, care au un impact semnificativ asupra indicilor de calitate a e.e furnizate consumatorilor, chiar dacă unii din acești receptori nu au semne de neliniaritate, deci au caracteristicile de sarcină liniară.

Combinarea metodelor clasice permite elaborarea unor procedee, care va permite stabilirea impactului GD și consumului concomitent asupra profilului de tensiune în nodurile REJT, inclusiv examinarea influenței neliniarităților surselor conectate.

În așa mod, profilul tensiunii din noduri se consideră parametru de bază care stabilește impactul surselor și sarcinile distribuite.

1.2. Aspecte generale privind generarea distribuită

GD sau generarea locală se referă la generatoare de putere mică, conectate la rețeaua de distribuție. GD în tratarea actuală include: sisteme și echipamente de conversie a energiei surselor regenerabile în e.e.

Conform [46], conceptul actual al GD este diferit de cel anterior, deoarece include tehnologii moderne și reprezintă o direcție nouă de producere a e.e, deci, și de cercetare a problemelor de valorificare eficientă a SER. Această sugestie reiese din analiza a mai multor surse bibliografice, din care reiese, că chiar definiția de GD în diferite regiuni poate să difere, deci să aibă sens diferit. Astfel, în țările Anglo-americe termenul de GD îl găsim sub forma de „*embedded generation*” și se traduce „*generare încorporată*”, în țările Americii de Nord, GD are denumirea „*dispersed generation*” și se traduce „*generare dispersată*”, iar în Europa și Asia poartă denumirea de „*decentralised generation*” cu traducerea de „*generare desconcentrată*” [47-49].

GD din engleză „*distributed power generation*” are la bază conceptul de producere a e.e pentru consumul local de energie, iar surplusul este transmis sistemului electroenergetic [47-49].

În baza acestei înțelegeri a sensului noțiunii, GD poate include o așezare rurală, o zonă urbană mică sau o gospodărie țărănească de mic consum. Structura GD asigură continuitatea alimentării cu e.e a sarcinilor prin separarea acestora de sistemul de distribuție centralizat pe perioada funcționării perturbate a acestuia, fără a afecta integritatea structurală și funcțională. Această modalitate de aplicare a GD asigură o creștere a siguranței alimentării cu e.e, deoarece problema alimentării este tratată complex, în ansamblu [47-49].

GD reprezintă un concept bazat pe producerea de energie distribuită și de stocare a energiei în echipamente specializate conectate în rețea și dotate cu senzori inteligenți pentru efectuarea controlului permanent a funcționării. Sursele de alimentare cu energie pot fi conectate la infrastructura existentă a rețelelor electrice centralizate, și, astfel să genereze e.e distribuită în rețeaua de alimentare în dependență de necesitățile curente ale consumatorului local sau particular. Instalațiile de stocare a energiei pot interveni în cazuri de necesitate [47-49].

Piața energetică impune dezvoltarea noilor concepte de dezvoltare a arhitecturii rețelelor electrice. Cerințele pieței sunt bine determinate în [50,51] și au următorul conținut:

- reducerea emisiilor de CO₂ prin implementarea SER;
- stabilirea unor zone comune ale pieței electroenergetice prin globalizarea acesteia;
- implementarea tehnologiilor moderne;
- calitatea și fiabilitatea înaltă a furnizării e.e;

- investiții mici prin utilizarea rețelelor electrice existente;
- creșterea duratei de viață a echipamentelor rețelei electrice;
- raționalizarea managementului rețelei electrice pe termen lung și scurt;
- micșorarea riscului de apariție a unor avarii în lanț în rețelele complexe.

În tabelul 1.2 este prezentată clasificarea GD după puterea de generare a sistemului electroenergetic [46-49].

Tabelul 1.2. Clasificarea GD după puterea de generare [47]

Nr/or d	Denumirea GD	Puterea GD
1.	Generarea distribuită micro (Micro)	1 Watt < P_{GD} < 5 kW
2.	Generarea distribuită mică (Small)	5 kW < P_{GD} < 5 MW
3.	Generarea distribuită medie (Medium)	5 MW < P_{GD} < 50 MW
4.	Generarea distribuită mare (Large)	50 MW < P_{GD} < 300 MW

În tabelul 1.3 sunt prezentate sursele de generare a e.e în rețelele electrice cu GD și puterile recomandate [47].

Tabelul 1.3. Clasificarea surselor de generare în rețelele electrice cu GD [47]

Nr./ord	Tehnologiile actuale	Puterea
1.	Turbine cu ciclu combinat pe combustibil gazos	35 - 400 MW
2.	Generatoare cu ardere internă	5 kW- 10 MW
3.	Turbine eoliene	200 W- 3 MW
4.	Centrale fotovoltaice	20 W- 200 kW
5.	Pile electrochimice	200 kW- 2 MW
6.	Baterie de stocare (Acumulatoare de energie)	500 kW-5 MW

Topologia rețelelor electrice a GD poate fi de 3 tipuri: magistrale, simple buclate și complex buclate (figura 1.6). Cea mai simplă este rețeaua electrică magistrală și se aplică cel mai frecvent în rețelele electrice de joasă tensiune cu gradul de fiabilitatea III (trei). Rețeaua electrică buclată conectează participanții la piața energetică într-un circuit închis cu posibilitatea deconectării acestora pe anumite laturi, cu gradul de fiabilitatea II (doi) [46-49].

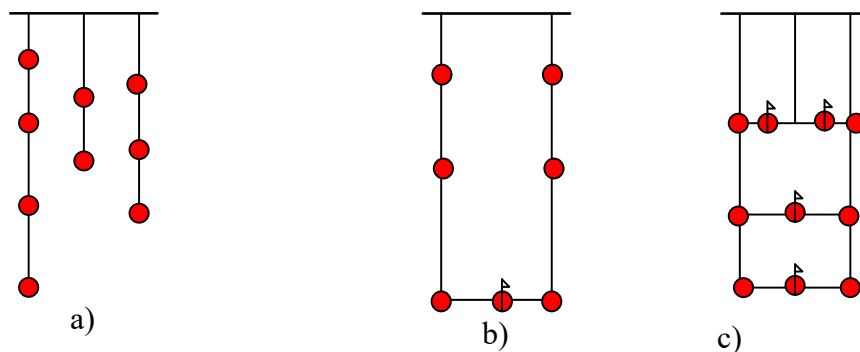


Fig.1.6. Tipurile de rețele electrice cu GD (a- rețeaua electrică magistrală, b - rețeaua electrică buclată, c - rețeaua electrică complex buclată) [47]

Acest tip de rețea se folosește în rețelele electrice de medie tensiune. Rețeaua electrică complex buclată plasă oferă posibilități de efectuare a manevrelor pe anumite sectoare fără a pune în pericol alți consumatori și furnizori de energie și se aplică în rețelele de înaltă tensiune având gradul de fiabilitate I (unu) [46-49].

Centralele fotovoltaice și turbinele eoliene la momentul actual dețin o cotă importantă în GD. Conectarea acestor surse de generare poate fi efectuată în toate rețelele electrice existente. Clasificarea arhitecturii rețelelor electrice conform [46-49] este prezentată mai jos.

Arhitectura rețelelor On – Grid. Tendințele de dezvoltare ale sistemului electroenergetic în ansamblu, inclusiv, rețelelor de transport și de distribuție cu diferite surse de generare devin o realitate conștientizată la nivel național și internațional (fig. 1.7).

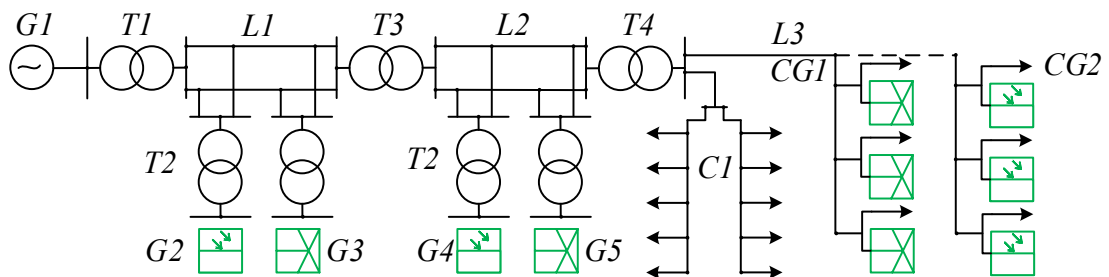


Fig.1.7. Schema electrică al GD de tip „On – Grid”

Conform figurii 1.7, $G1$ - reprezintă generatorul sistemului electroenergetic existent. Transformatorul $T1$ este destinat ridicării tensiunii pentru transportul e.e la distanțe mari cu conectarea acestuia la linia electrică de transport $L1$ (tensiune înaltă). În linia electrică $L1$ transformatorul $T2$ conectează centralele fotovoltaice $G2$ sau centralele eoliene $G3$ (tensiune medie). $T3$ prezintă transformatorul destinat coborârii tensiunii și conectării în linia electrică de medie tensiune $L2$. Centralele de generare $G4$ și $G5$ prin transformatoarele $T2$ (joasă tensiune) sunt conectate la linia electrică $L2$. $T2$ și $T4$ reprezintă transformatorul de putere din REJT ($L3$). Diferența dintre $G4, G5$ și $CG1, CG2$ este prin faptul că $G4$ și $G5$ sunt centrale electrice de puteri mari, iar $CG1, CG2$ sunt generatoare distribuite de puteri mici. Consumatorii de e.e $C1$ sunt conectați la $L3$, tot aici (în $L3$) sunt conectați și consumatorii cu posibilități de generare $CG1$ și $CG2$ din SER, spre exemplu, $CG1$ generează e.e în sistemul de alimentare de la centralele eoliene mici, iar $CG2$ generează e.e în sistem de la centrale fotovoltaice.

Arhitectura rețelelor Off - Grid systems (0 - sub MW). Toate rețelele de distribuție, care sunt izolate de rețeaua principală, conectate la surse independente de putere, și administrate de diferiți operatori.

Conform figurii 1.8, $G1$ - reprezintă generatorul clasic al sistemul electroenergetic existent. Transformatorul de putere $T1$ este destinat ridicării tensiunii pentru transportul a e.e la distanțe

mari cu conectarea acestuia la linia electrică de transport $L1$. Transformatorul $T2$ este deconectat prin întrerupătorul $Q1$ de sistemul electroenergetic central. Centralele de generare $G2$ și $G3$ prin transformatoarele de putere $T3$ sunt conectate la linia electrică de medie tensiune $L2$, iar $C1$ sunt consumatorii din rețeaua de medie tensiune. $T4$ este transformatorul de putere ce face legătura dintre rețeaua de medie tensiune și linia electrică de joasă tensiune $L3$. Consumatorii de e.e $C2$ sunt conectați la $L3$, tot aici (în $L3$) sunt conectați și consumatorii cu posibilități de generare $CG1$ și $CG2$ din SER spre exemplu $CG1$ generează e.e sistemului de la centrale eoliene mici, iar $CG2$ generează e.e sistemului de la centrale fotovoltaice. Avantajul schemei este faptul că, în caz de imposibilitate de livrare a e.e de la sistemul electroenergetic centralizat, generarea de energii poate fi la diferite trepte.

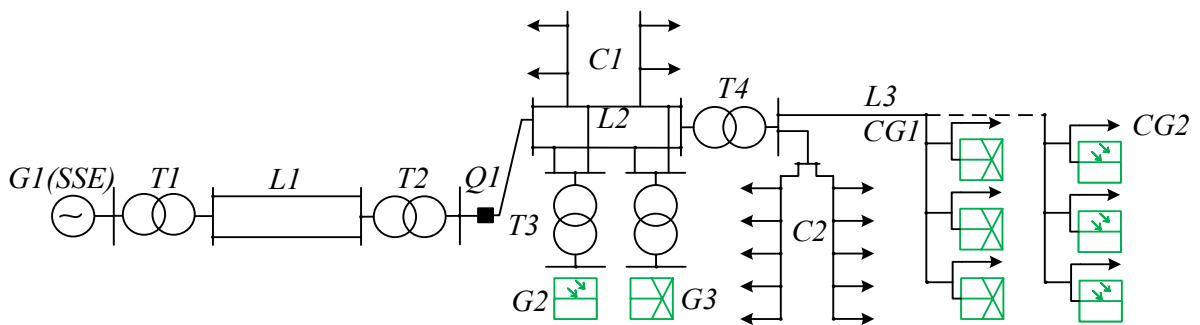


Fig.1.8. Schema electrică al GD de tip „Of – Grid ”

Arhitectura rețelelor Mini-grid systems - sistem în care toată sau o parte din e.e. produsă (din orice sursă) este injectată într-o rețea mică de distribuție.

În figura 1.9 $G1$ reprezintă generatorul pe bază de combustibili fosili conectat la rețeaua electrică de joasă tensiune $L1$. În $L1$ sunt conectați consumatorii de e.e $C1$ și centralele de generare din SER $G2$ (centrala eoliană) și $G3$ (centrala fotovoltaică). Aceste rețele funcționează independent de sistemul electroenergetic și sunt caracterizate zonelor fără rețele de medie tensiune.

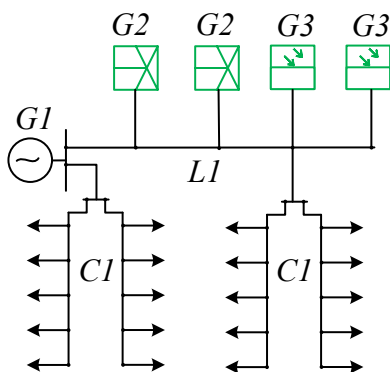


Fig.1.9. Schema electrică al GD de tip „Of – Grid ”

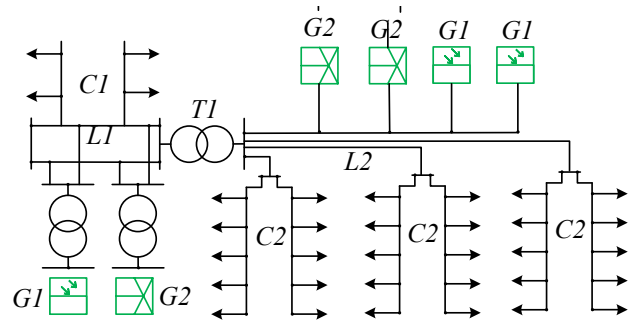


Fig.1.10. Schema electrică al GD de tip „ Green mini-grid”

Arhitectura rețelelor Green mini-grid (10 kW- sub MW). Green mini-grid este o rețea de distribuție în care sursele de energie sunt generatoare de energie regenerabilă cu puteri de generare de cel puțin 10 kW (fig.1.10). Această schemă diferă de fig.1.9 prin faptul de lipsei generatorului pe combustibil fosil.

În figura 1.10, *T1* este transformatorul de putere iar rețeaua de medie tensiune *L1* și de joasă tensiune *L2* este conectată cu centralele fotovoltaice *G1*, centralele eoliene *G2* și cu consumatorii *C1* și *C2*. Rețelele sunt independente de sistemul electroenergetic centralizat, centralele generează puteri mai mari de 10 kW.

Arhitectura rețelelor Micro - grid system (1-10 kW). Rețeaua electrică este alimentată de la mai multe generatoare fiecare dintre ele fiind conectate în rețeaua de distribuție cu puteri de generare de până la 10 kW, și asigură cu e.e. mai mulți consumatori.

În figura 1.10, *G1* reprezintă centrala eoliană, iar *G2* centrala fotovoltaică conectate în rețeaua electrică de joasă tensiune *L1*. În *L1* sunt conectați consumatorii *C1* și consumatorii cu posibilități de generare *CG1* și *CG2* din SER spre exemplu *CG1* generează e.e în sistem de la centrale eoliene mici, iar *CG2* generează e.e în sistem de la centrale fotovoltaice. Puterea de generare a acestor centrale nu depășește 10 kW. Schema electrică oferă posibilitatea de generare în rețeaua de joasă tensiune e.e de la surse cu puterea instalată egală cu puterea consumată. Dimensionarea sistemului se efectuează în baza curbei de sarcină.

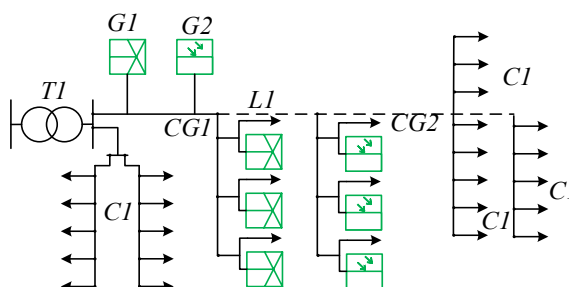


Fig.1.11. Schema electrică al GD de tip „Micro-grid system”

Arhitectura rețelelor hibride. Rețelele hibride au la bază generatoare de energie regenerabile conectate în comun cu generatoare de energie pe combustibili fosili cu posibilitatea interconectării acestora în sistemele electroenergetice existente.

Conform figurii 1.12 în rețeaua electrică de joasă tensiune *L1* sunt conectate centralele de generare a e.e *G1* (eoliene), *G2* (fotovoltaice), *G3* (combustibili fosili) și *G4* (hidrogeneratoarele). *T1* este transformatorul de putere care conectează sistemul electroenergetic centralizat. Consumatorii *C1* sunt alimentați de la rețeaua electrică de joasă tensiune. Consumatorii cu surse de generare *CG1* (eoliene), *CG2* (fotovoltaice), *CG3* (combustibili fosili) sunt conectați în rețeaua electrică de joasă tensiune.

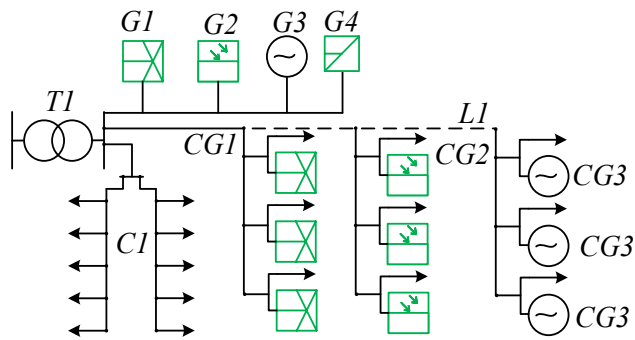


Fig.1.12. Conectarea hibridă a generatoarelor de e.e

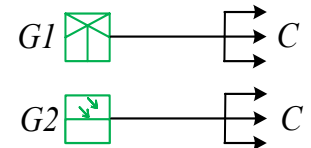


Fig. 1.13. Alimentare autonomă a receptorilor

Arhitectura rețelelor autonome (0-5 kW). Consumatorii de e.e alimentați dintr-o singură sursă de e.e conform figurii. 1.13.

Figura 1.14 ilustrează consumatorii C conectați la surse autonome de energie G1 (eoliene) și G2 (fotovoltaice). Aceste surse reprezintă centrale independente de generare a e.e. de puteri mici ce alimentează consumatorii casnici, obiectele mici industriale, gospodării agricole etc.

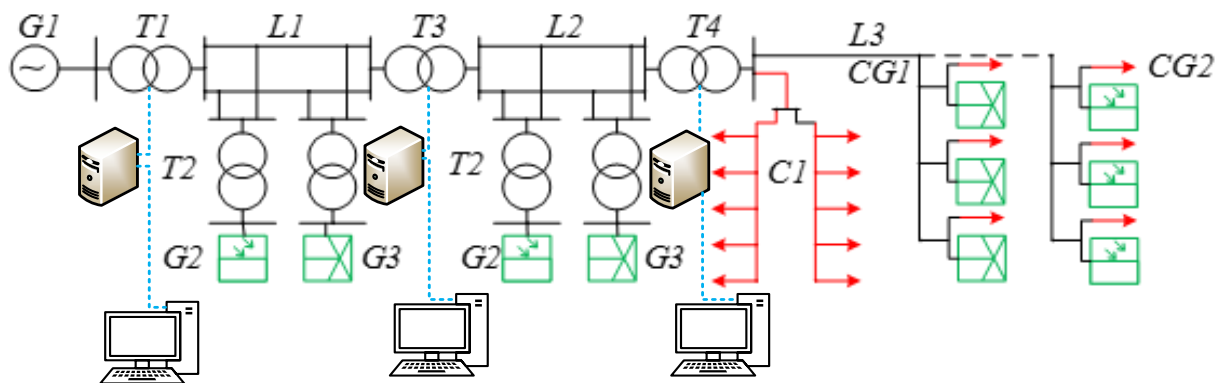


Fig. 1.14. Schema electrică al GD de tip „Smart grid”

Arhitectura rețelelor Smart-grids. Sistemele electroenergetice dirijate și automatizate prin intermediul tehnologiilor informaționale (INTERNET, INTRANET) cu scopul creșterii calității e.e.

La diferite trepte de tensiune a sistemului electroenergetic se conectează servere de procesare a informației care transmit datele la dispecerat prin intermediul rețelei Internet. Datele primite sunt procesate în regim real de timp cu ajutorul calculatorului cu efectuarea manevrelor de asigurarea a calității e.e pe anumite porțiuni ale sistemului electroenergetic (figura 1.14).

Analiza topologiilor rețelelor electrice cu conectarea simultană a diferitor surse de generare elucidează faptul, că SGD se pot racorda la sistemele electroenergetice moderne la toate nivelele

de tensiune, deoarece nu există restricții privind locul racordării surselor GD. Astfel, există un grad ridicat de flexibilitate privind implementarea surselor GD în topologia modernă a sistemelor electroenergetice tradiționale, care conduce la schimbări esențiale nu numai a topologiei, dar și a regimurilor în aceste sisteme electroenergetice. Urmare a acestei constatări, reiese, că apar noi provocări în aplicarea metodelor tradiționale de calcul, deoarece este necesar de adaptat aceste modele la noile realități.

Scheme de conectare a SGD în REJT. Conform analizei problemei se poate constata, că ponderea cea mai mare a cotei surselor de GD de putere mică revine SER:

- surse solare (module/panourile solare);
- surse de eoliene (generatoarele eoliene).

Scheme de conectare a panourilor solare și a turbinelor eoliene în REJT. Centralele fotovoltaice și turbinele eoliene pot fi conectate la rețeaua de alimentare a consumatorilor în două variante: alimentare independentă și alimentarea receptoarelor prin conectarea la REJT.

Conectarea modulului PV/turbinei eoliene este executată prin intermediul unui controler care are destinația de a stabili regimul de alimentare a sarcinii. Controlerul este conectat în paralel la acumulatorul care stochează energia suplimentară și inverterul ce are destinația de a transforma curentul continuu în curent alternativ. Controlerul bidirecțional contorizează surplusul de e.e de la modulul PV și monitorizează consumul sarcinii, conform figurii 1.15.

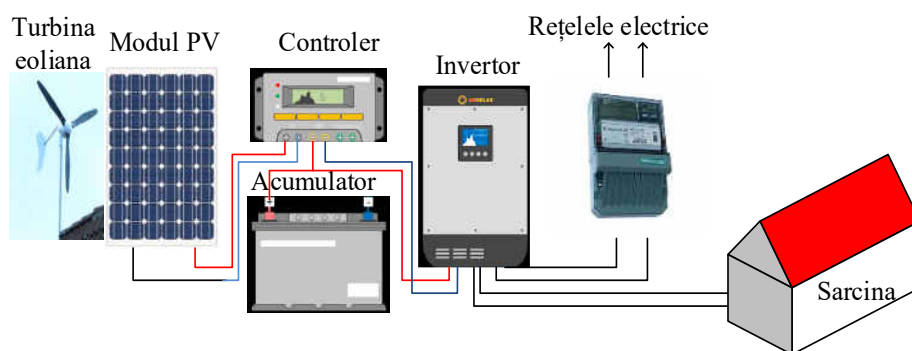


Fig. 1.15. Schema electrică de conectare a modulului PV/turbina eoliana conectată la REJT

În figura 1.16 este indicată schema clasică de conectare a unui consumator la modulele PV/turbine eoliene fără posibilitățile de generare în REJT.

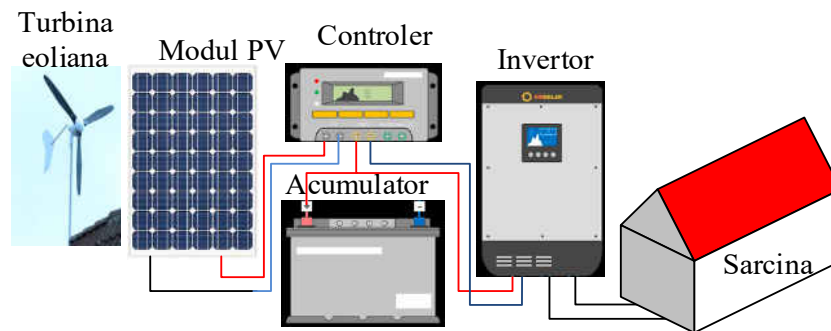


Fig. 1.16. Schema electrică de conectare a modului PV/turbina eoliana (instalații autonome)

1.3. Noțiuni generale privind calitatea energiei electrice în contextul generării distribuite

Termenul de „*qualitas*” se traduce din limba latină ca „*fel de a fi*”. Conform ISO 8402-1986 (EN-28402-1991) calitatea reprezintă ansamblul caracteristicilor unei entități materiale care îi conferă aptitudini de a face față necesităților exprimate. Entitatea reprezintă valoarea sau conținutul, iar necesitățile exprimate corespund unor exigențe ce fac obiectul unui contract [52].

Calitatea se definește și ca ansamblul de proprietăți ale unui produs sau serviciu care conferă aptitudinea de a satisface necesitățile exprimate sau implicite [52].

Reieșind din faptul că e.e reprezintă un produs, iar transportul și distribuția acestui produs reprezintă serviciul de care beneficiază consumatorul final, calitatea e.e va reprezenta un ansamblu de proprietăți cu impact tehnic și economic ce au scop satisfacerea cerințelor consumatorului final [53].

REJT sunt caracterizate de un număr mare de consumatori conectați la rețea ce au un impact negativ asupra calității e.e. Calitatea e.e garantează un regim normal de funcționare a echipamentului electric, instalațiilor și rețelelor electrice la parametri nominali, iar abaterile de la valorile stabilite conduc la instabilitatea funcționării.

Asigurarea calității e.e conduce la creșterea eficacității funcționării a întregului sistem electroenergetic și reprezintă indicatorii de fezabilitate luați în calcul la proiectarea unui sistem electroenergetic la diferite etape. Divizarea pierderilor economice și tehnice se poate face după criteriile următoare:

- pierderi tehnologice;
- pierderi economice;

- pierderi electromagnetice ale e.e transformate în procese tranzitorii cu deteriorarea utilajului electroenergetic (pierderi în electroenergetică) [54].

Calitatea e.e depinde de regimurile de funcționare a rețelelor electrice. Se cunosc patru regimuri de funcționare în REJT:

1. regimul permanent normal și simetric;
2. regimul nestaționar (tranzitoriu) normal
3. regimul nestaționar (tranzitoriu);
4. regimul permanent de avarie
5. regimul permanent post avarie [55].

Regimul permanent normal și simetric – reprezintă un regim a rețelei electrice caracterizat de o modificare lentă a parametrilor rețelei fără abateri de la indicatorii de calitate [56-59].

Regimul nestaționar (tranzitoriu normal) – se caracterizează prin modificări bruște ale parametrilor rețelei (conectări/deconectări a sarcinilor electrice, vârfurile de sarcină) și este determinat de creșteri sistematice ale curenților sau a tensiunilor de comutație ce nu influențează asupra indicatorilor de calitate [56-59].

Regimul nestaționar (tranzitoriu) – apare în urma unui regim tranzitoriu (scurtcircuit, punere la pământ, dispariția fazelor) indiferent de viteza de apariție (lent sau rapid). Acest regim de funcționare conduce la micșorarea tensiunii în nodurile rețelei sau apariția unor supratensiuni în aceste noduri afectând indicii de calitate a e.e distribuite [56-59].

Regimul permanent de avarie – în unele surse se mai numește „*regim post-avarie*” care apare în urma unui proces tranzitoriu și durează de la câteva minute până la câteva ore. Este caracteristic autopornirii motoarelor de puteri mari, sau a unui grup de consumatori mari, care sunt limitați după putere cu modificarea indicilor de calitate a e.e [56-59].

Conform [57] perturbațiile de tensiune pot fi: de timp (durata, amplitudine, repetitivitate) și de frecvență. După durată perturbațiile pot fi: tranzitorii, de scurtă durată și de lungă durată.

Perturbațiile tranzitorii conform [56-59].sunt unidirecționale (impulsuri tranzitorii, oscilații tranzitorii) și sunt cauzate de defecte ale cablurilor electrice, trăsnete, conectarea sau deconectarea unor sarcini, funcționarea releelor, conectarea instalațiilor de corecție a factorului de putere.

Perturbațiile de scurtă durată sunt golurile de tensiune cauzate de defecte în rețelele de distribuție caracteristice unor puneri la pământ a unui conductor sau conectarea și deconectarea unor motoare electrice [56-59].

Perturbațiile de lungă durată variații de tensiune cu valori de peste un minut și se clasifică: supratensiuni, subtensiuni și întreruperi ale tensiunii. Supratensiunile sunt creșteri ale valorii

eficace ale tensiunii peste $1,1 U_{nom}$. Cauzele frecvente ale acestor perturbații sunt deconectarea unor sarcini mari, producerea unui scurt circuit. Subtensiunile sunt scăderi ale tensiunii nominale de la valoarea eficace nominală a tensiunii și sunt cauzate de supraîncărcarea liniei electrice. Întreruperile de tensiune sunt cauzate de accidente ale liniilor electrice sau a transformatoarelor [56-59].

Nesimetriile de tensiune sunt caracteristice rețelelor electrice trifazate și sunt generate de conectarea nesimetrică a sarcinilor, sau de pierderi excesive în rețeaua electrică de joasă tensiune [56-59].

Distorsiunile neliniare sunt abateri de la forma ideală a sinusoidei și se caracterizează de poluarea acesteia cu alte forme spectrale ale acestor distorsiuni (componenta continuă, distorsiunile armonice, vârfurile de tensiune, zgomotul) [56-59].

Distorsiunile armonice reprezintă perturbații sinusoidale cu frecvențe multiple provocate de elementele neliniare conectate în rețea. Conectarea elementelor liniare în rețelele electrice de joasă tensiune generează armonici pare. Tot aici putem descrie și subarmonicile care sunt generate de convertizoarele de frecvență [56-59].

Vârfurile de tensiune reprezintă distorsiuni ale sinusoidei generate de dispozitive la comutarea acestora de la o fază la alta [56-59].

Zgomotul reprezintă distorsiuni ale tensiunii generate de consumatori cu arc electric sau dispozitive de comutare. Aceste distorsiuni ale tensiunii au semnale cu frecvențe sub 200 kHz suprapuse pe sinusoida curentului sau a tensiunii de alimentare cu frecvență industrială [56-59].

Fluctuațiile de tensiune (flicker) reprezintă schimbări aleatoare ale tensiunii cu o magnitudine ce depășește valorile de 105 % din valoarea nominală a rețelei și este generată de descărcări electrice ale lămpilor fluorescente [56-59].

Variațiile de frecvență sunt în dependență directă de schimbările rotative ale surselor de generare a e.e și se datorează dezechilibrului dintre puterea consumată și puterea generată în rețele. [56-59].

Nivelul maxim al perturbațiilor electromagnetice la care se poate supune REJT cu parametrii distribuiți, pentru a asigura compatibilitatea electromagnetică în ansamblul în sistemul de alimentare, care include rețeaua și instalațiile racordate la aceasta rețea pentru încadrarea în abaterea de 5%.

Analiza unor parametri de calitate a e.e conform standardului SM EN 50160 (valabil și pe teritoriul Republicii Moldova obligatoriu prin normativul în construcții NCM G. 01.01:2016 „Instalații electrice. Proiectarea alimentării cu e.e întreprinderilor industriale. Norme de proiectare tehnologică), este indicată în tabelul 1.4.

Tabelul 1.4. Parametrii tensiunii și banda de abatere admisă conform SM EN 50160

Denumirea parametrului tensiunii	Caracteristicile tensiunii de alimentare (banda de abatere admisibilă)					
Variațiile frecvenței, Hz	JT, MT: valoarea medie a fundamentalei măsurată pe 10 s \pm 1 % (49,5 - 50,5 Hz) pentru 99,5% din săptămână; - 6 % / + 4% (47 - 52 Hz) pentru 100% din săptămână.					
Variațiile amplitudinii tensiunii	JT, MT: \pm 10 % pentru 95% din săptămână, media pe 10 min a valorilor efective					
Variațiile rapide ale tensiunii	JT: 5 % normal; 10 % nefrecvent Plt < 1 pentru 95 % din săptămână.					
Goluri ale tensiunii de alimentare	În majoritate: durata < 1s , adâncimea < 60%. Goluri limitate local datorate cuplării unei sarcini: JT: 10-50 %, MT: 10-15 %					
Întreruperi de scurtă durată ale tensiunii de alimentare	JT, MT: (până la 3 min) câteva zeci - câteva sute/an Durata pentru 70 % din ele < 1s					
Întreruperi de lungă durată ale tensiunii de alimentare	JT, MT: (până la 3 min) < 10- 50 / an					
Supratensiuni temporare de frecvență industrială	JT < 1,5 kV valoarea efectivă MT: 1,7 Uc (în rețele cu neutru legat direct la pământ sau printr-o impedanță) 2 Uc (în rețele cu neutru izolat sau legat printr-o bobină de rezonanță)					
Supratensiuni tranzitorii	JT: în general < 6 kV ocazional mai mari; durata ms - 1 s MT: nedefinite					
Nesimetria tensiunii de alimentare	JT, MT: până la 2 % pentru 95 % din săptămână, media valorilor efective pe 10 minute. până la 3 % în unele puncte.					
Tensiuni armonice	Armonici impare				Armonici pare	
	Nemultiplul la 3		Multiplul de 3			
	<i>Ordinul h</i>	<i>Tensiunea relativă (%)</i>	<i>Ordinul h</i>	<i>Tensiunea relativă (%)</i>	<i>Ordinul h</i>	<i>Tensiunea relativă (%)</i>
	5	6	3	5	2	2
	7	5	9	1,5	4	1
	11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
	13	3	21	0,5		
	17	2				
	19	1,5				
23	1,5					
25	1,5					
Tensiuni interarmonice	JT: în studiu					

Standarde privind proiectarea și mentenanța REJT cu GD. Pentru prima dată în anul 2003 a fost publicat standardul de calitate din seria IEEE 1547 (Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems), care indică despre apariția unui nou domeniu de aplicare a tehnologiilor electrotehnice. Acest standard conține termeni și definiții generale despre securitate, conține unii indicii de exploatare și în linii generale, descriu indicatorii de bază utilizați la estimarea calității e.e.

În tabelul 1.5 sunt indicați o serie de standarde care asigură funcționalitatea GD.

Tabelul 1.5. Lista standardelor privind GD

Nr.ord	Denumirea Standardului	Anul adoptării	Descrierea succintă
1.	IEE Std P1547	2003 cu modificări în anul 2014	Proiect de standard pentru interconectare și interoperabilitate a resurselor de energie distribuite cu interfețe de sisteme electrice distribuite
2.	IEE Std P1547 a		Standard pentru interconectarea resurselor distribuite cu sisteme de alimentare cu e.e - Amendamentul 1
3.	IEE Std P1547.1	2005	Proiectarea procedurilor de testare a conformității standard pentru echipamentele de interconectare a resurselor de energie distribuite cu sistemele de electricitate și interfețele asociate
4.	IEE Std P1547.1a	2008 (15)	Standard pentru procedurile de testare a conformității pentru echipamentele de interconectare a resurselor distribuite cu sistemele electrice de putere - Amendamentul 1
5.	IEE Std P1547.2	2008	Ghid de utilizare pentru standardul IEEE 1547 pentru interconectare resurse distribuite cu sisteme de alimentare electrică
6.	IEE Std P1547.3	2011	Ghid de proiect pentru Monitorizare, schimb de informații și Controlul resurselor distribuite interconectate cu e.e sisteme
7.	IEE Std P1547.4	2011	Ghid pentru proiectarea, operarea și integrarea sistemelor de distribuție a resurselor distribuite cu sisteme electrice de putere
8.	IEE Std P1547.5	retras 12/2011	Proiect de orientări tehnice pentru interconectarea surselor de e.e Mai mare de 10MVA la rețeaua de transmisie de putere
9.	IEE Std P1547.6		Proiect de practică recomandată pentru interconectarea resurselor distribuite cu rețelele secundare de distribuție a energiei electrice
10.	IEE Std P1547.7	2013	Ghid de efectuare a studiilor de impact asupra distribuției pentru Interconectarea resurselor distribuite
11.	IEE Std P1547.8		Practica recomandată pentru stabilirea metodelor și procedurilor care oferă suport suplimentar pentru strategiile de implementare pentru utilizarea extinsă a standardului IEEE 1547

Clasificarea consumatorilor de e.e. În conformitate cu [60] consumatorul este orice persoană fizică sau juridică care utilizează resurse energetice.

Reieșind din cele expuse, consumatorii de e.e sunt persoane fizice sau juridice ce utilizează un ansamblu de receptoare electrice destinate transformării e.e în alte forme de energie (mecanică, luminoasă, infraroșie, termică etc.).

Consumatorii de e.e conectați la rețeaua electrică se clasifică în două grupe: consumatori casnici și non-casnici.

Consumatorii casnici de e.e. (fig.1.17) - se împart în trei grupe. La prima grupă se atribuie instalațiile de iluminat a apartamentelor, caselor cu scări, coridoarelor, vestibulelor și holurilor. A doua grupă include aparatură electrocasnică cum ar fi: aparatele video-audio, calculatoarele personale, mașinile de spălat, aspiratoarele, cuptoarele cu microunde, roboții de bucătărie. Din a treia grupă fac parte instalațiile de pază și securitate, ascensoarele, pompele de apă [62,63].

Consumatorii non-casnici de e.e. (fig.1.18)- pot fi divizați în consumatori cu poluare redusă a calității e.e (grădinițele, școlile, hotelurile, depozitele), cu poluare medie a e.e (centrele comerciale, stațiile PECO, clădirile administrative) și cu poluarea sporită (secțiunile de producere, uzinele și fabricile).



Fig. 1.17. Consumatori casnici

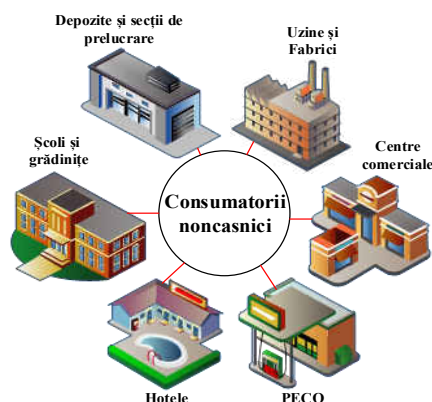


Fig. 1.18. Consumatori non-casnici

Influența indicatorilor de calitate a e.e conform [62,63] poate fi clasificată în nouă grupe după cum urmează:

1-a grupa. Influența acestor receptoare asupra calității e.e în rețeaua electrică este nesemnificativă.

2, 3 și a 4-a grupa. Este caracterizată de un consum de energie activ – inductivă cu porniri frecvente, versuri prin ce sporește consumul de puteri reactive și apariției devierilor de tensiune. Acestea influențează asupra instalațiilor de iluminare. Motoarele electrice ale ascensoarelor din cauza momentelor de pornire ridicate și frecvente conduc la distorsiuni ale tensiunii. Receptorii de energie identificați ca grupa a 4-a generează armonici de ordin inferior și superior din cauza

reacției rotorului și a pulsației și a *t.e.m.* Apariția între perii și colector a scânteii conduce la apariția zgomotului electromagnetic.

5-a grupă. Coeficientul de putere a acestor receptoare este mic, se caracterizează prin consum ridicat de putere reactivă ceea ce conduce la oscilații ale tensiunii și ale armonicilor de ordin superiori din amplitudinea curentului.

6-a grupă. Receptoarele acestei grupe sunt consumatori de energie reactivă și generatoare de armonici superioare în rețeaua electrică, și influențează negativ asupra receptorilor conectate în această rețea.

7-a grupă. Din această grupă fac parte receptorii de consum mic de e.e care generează armonici de ordin superior și consumă energie reactivă. Diferențierea acestora de alte grupe este caracteristică magnetizării ale unor elemente electrotehnice ale acestor receptoare.

8-a grupă. Receptoarele electrice care funcționează la o frecvență înaltă cu inducerea unui câmp electromagnetic în exterior. Conectarea lor la rețea induce armonici de ordin superior și conduce la creșterea câmpului electromagnetic din preajmă.

9-a grupă. Instalațiile de iluminat dotate cu lămpi fluorescente cu elemente neliniare (bobine, startere), consumatoare de energie reactivă. Instalațiile de iluminat cu lămpi fluorescente generează zgomot și armonici de ordin superior în rețelele electrice. Micșorarea tensiunii cu 5% a tensiunii din cadrul rețelei electrice conduce la micșorarea termenului de viață a lămpii și a micșorării nivelului de iluminare.

Cele mai răspândite receptoare electrice în sectorul non-casnic (uzine și fabrici) sunt instalațiile de iluminat, motoarele sincrone și asincrone, instalațiile electrotermice, instalațiile de redresare, instalațiile de sudare.

În urma analizei literaturii de specialitate, receptoarele electrice se clasifică conform tabelului 1.6, care indică particularitățile minime de influență asupra unei rețele electrice cu GD.

Tabelul 1.6. Particularităților receptoarelor electrice [62,63]

Nr /gr .	Denumirea receptoarelor (casnici /non-casnici)	Particularitățile receptoarelor electrice
1.	Bec incandescent, fier de călcat, boiler / cupatoare industriale rezistive, instalații de iluminat cu becuri incandescente.	Degajări de căldură, consum mare de energie activă.
2.	Hota, ventilatorul, condiționerul, pompa de apă / motoare asincrone monofazate	Consumul de putere activ-inductiv, porniri frecvente, reversuri, deconectări.
3.	Mașina de spălat, frigiderul / motoare asincrone trifazate	Consumul de putere activa -inductiv, porniri frecvente, reversuri, deconectări, încărcarea rețelei cu putere reactivă.

4.	Ascensor, aspirator / liftul industrial	Armonici de ordin inferior și superior, distorsiuni de tensiune cu poluarea rețelei cu zgomot.
5.	Aparat de sudat	Sunt reprezentați de un coeficient mic de putere și sunt frecvente variații de tensiune.
6.	Încărcător la telefon / instalații de redresare	Sunt consumatori de energie reactivă și generatori de armonici de ordin superior în rețea.
7.	Calculator personal, televizor / Instalații electronice de dirijare și comandă, instalații de legătură, instalații de înregistrare.	Inducerea unui câmp electromagnetic care influențează negativ asupra receptorului și elementelor acestuia (monitor, banda electromagnetică) în limita normelor sanitare.
8.	Cuptor cu microunde / Instalație de încălzit dielectricul, instalație de încălzit metalul, cuptor industrial de topit metalul.	Inducerea unui câmp electromagnetic în exterior, care depășește normele sanitare de cca. 10-30 ori și induce armonici de ordin superior în rețeaua electrică.
9.	Lămpile CFL, LED / instalațiile de iluminat cu lămpi fluorescente	Consumatori de energie reactivă, poluanți de armonici superioare (150-550 Hz) și (550-1650) cu influențe asupra acusticii încăperii.

1.4. Studiul elementelor neliniare în rețelele electrice de joasă tensiune cu surse și sarcini distribuite

Calitatea e.e este influențată de către receptorii de e.e. O cauză de perturbare a calității e.e. se consideră creșterea consumului de energie prin intermediul receptorilor neliniari. Astfel de receptoare se considera convertizoarele de frecvență în instalațiile de acționari electrice, calculatoarele personale, inclusiv, receptoarele casnice. Receptoarele menționate sunt caracterizate de un consum ale curenților de impuls ne-sinusoidal din rețeaua electrică de alimentare, cu un conținut sporit de armonici [62,63].

Întru identificarea particularităților semnificative a regimului rețelei este rezonabil de analizat formele curbelor curentului/tensiunii electrice absorbite din rețeaua de joasă tensiune de către receptoarele electrice.

Spre exemplu formele ne-sinusoidale ale redresorului, condensatorului de filtrare și a convertorului cu semi punte comandat are un factor de distorsiune tipic și este de 80% (rangul 3 ridicat), iar factorul de ponderare este de 2,5. Convertorul semi punte comandat are valori ridicate ale armonicilor de ordinul 2, 3 și 4 pentru sarcini parțiale, iar factorul de pondere atinge valoarea de 2,5 [64].

Factorul de distorsiune tipic ale convertorului cu 6 pulsuri, filtru pur capacitiv este de 80%, iar factorul de pondere este de 2,0. Convertorul cu 6 pulsuri, filtru capacitiv și inductivitate în serie are un factor de distorsiune de 40%, iar factorul de pondere este de 1,0 [64].

Factorul de distorsiune tipic ale convertorului cu 6 pulsuri, filtru pur capacitiv este de 28%, iar factorul de pondere este de 0,8. Convertorul cu 6 pulsuri are un factor de distorsiune de 15%, iar factorul de pondere este de 0,5 [64].

Factorul de distorsiune ale variatorului de tensiune alternativă variază în funcție de unghiul de intrare în conducție, iar factorul de pondere este de 0,7 [64].

Structura consumului de e.e. ale consumatorilor casnici în perioada anilor 1990-2012 este prezentată în tabelul 1.7. În tabel se indică utilizarea în sectorul casnic a tipului de receptoare, ceea ce indică sporirea poluării REJT cu consumatori neliniari.

Tabelul 1.7. Numărul de consumatori neliniari în cadrul consumului casnic [62]

Denumirea receptoarelor	1990	1995	2000	2005	2009	2012
Televizor	113	134	124	138	160	174
DVD-playier	-	-	-	8	44	59
Centru muzical	-	2	12	34	39	38
Calculator	-	-	6	26	55	69
Cuptor cu microunde	-	-	-	25	51	69
Climatizator	-	-	-	3	8	12

În contextul dezvoltării rapide a tehnologiilor și în scopul îmbunătățirii condițiilor de trai a omenirii se atestă o creștere consumului în sectorul casnic prin conectarea receptoarelor cu elemente neliniare (televizoare, DVD playere, centre muzicale, calculatoare, cuptoare cu microunde, condiționarea aerului). Conform tabelului 1.6, în anul 2012 se atestă o integrare totală a receptorilor neliniari în rețelele electrice de joasă tensiune [62].

Specificul funcționării receptoarelor casnice este consumul econom de energie care se datorează absorbției din rețeaua de alimentare cu e.e (rețeaua de joasă tensiune) a curenților de impuls, distorsionați și poluați cu armonici de ordin superior.

Aceste surse de armonici în rețelele electrice de joasă tensiune sunt consumatorii neliniari de exemplu diferite tipuri de redresoare. Nivelul ridicat al armonicilor superioare de curent se datorează redresării din *c.a* în curent *c.c* în regimul în care curentului condensatorului filtrului depășește de 5-10 ori valoarea curentului nominal [62,63]. Din această observație reiese, că receptoarele neliniare poluează puternic rețeaua de alimentare cu armonici superioare de curent [62,63], dar în mod diferit (tabelul 1.6).

Receptorii neliniari conduc la:

- suprasolicitarea termică a cablurilor electrice;
- sporirea erorii măsurătorii consumului de energie de către contoare urmare a distorsionării curbelor de curent și tensiune;

- suprasolicitarea termică în regim de rezonanță cu tensiune și a transformatoarelor de putere, care la proiectare au fost calculate pentru funcționare cu semnale de formă sinusoidală;
- distorsiunea curbei de tensiune ale rețelei de alimentare cu e.e.

Iluminatul electric are un impact deosebit asupra calității e.e, care este prezent în toate tipurile de instalații (casnice și non-casnice). La momentul actual cca. 5% din consumul de e.e global îi revine iluminatului artificial.

Lămpile incandescente, generează lumină datorită trecerii curentului electric prin filamentul acestuia cu degajare de căldură.

La moment aceste lămpi sunt folosite cel mai des în instalațiile de iluminat din sectorul casnic datorită simplității acestora și a prețului redus. În sectorul non-casnic sunt utilizate în anumite domenii de producere unde sunt necesare anumite lungimi de undă care sunt emise în exclusivitate de aceste tipuri de lămpi [65, 66].

Conform [67] sinusoida curentului absorbit din rețeaua electrică are un grad de distorsiune nesemnificativ cu o prezență a armonicilor de ordinul 1, 3 și 7.

Lămpile fluorescente, generează lumină datorită descărcării dintre electrozii lămpii, iar lungimea de undă a energiei luminoase depinde de vopseaua fluorescentă aplicată pe tubul lămpii. Aceste lămpi au două aspecte exterioare: aspectul compact și aspectul clasic.

În scopul eficientizării consumului de e.e la moment se atestă o creștere a utilizării lămpilor de iluminat fluorescente compacte. Lămpile au o eficiență energetică de cca. 3-5 ori mai mare decât cele incandescente. Conform studiului [67] s-a stabilit că consumul curentului este caracterizat de o gama de armonici (de ordinul 3-15), iar micșorarea amplitudinii armonicii la creșterea ordinului se petrece foarte lent.

Lămpile LED, sunt compuse din diode semiconductoare ce emit lumină și sunt conectate într-un circuit electric. Tendințele actuale ale instalațiilor de iluminat sunt înlocuirea lămpilor incandescente și fluorescente cu lămpi de tip LED. Datorită prezenței elementelor neliniare, în circuitul lămpii, se induce în rețea armonici superioare. În [65-67] sunt prezentate caracteristicile armonicilor de ordin superior pentru lămpile LED ale diferitor producători. Conform cercetărilor efectuate în lucrarea [67], curba curentului absorbit din rețea este modificată, iar histograma armonicilor cuprinde ordinele 1-31.

Lămpile cu arc cu descărcare în gaz (mercur, halogeni metalici), generează lumină prin intermediul descărcării electrice dintre electrozii electrici amplasați la distanță cu apariția arcului electric. Aceste lămpi sunt folosite pentru iluminarea stradală, săli de producere, stadioane, depozite, sere etc. În sectorul casnic acestea nu sunt folosite din cauza luminii reci pe care o

generează. Lămpile cu descărcări în gaze sunt de două tipuri: - cu presiune înaltă (sodiu, mercur) și cu presiune joasă (sodiu, halogeni) [67].

Pentru funcționarea acestor lămpi este caracteristic conectarea în circuitul electric a unui balast care este utilizat în calitate de element de conectare a lămpii. Balasturile se divizează în două tipuri: - balastul clasic (bobină cu miez de fier) care are un consum mare de energie; - balast electronic care lucrează la frecvențe înalte. În ambele cazuri balasturile în comun cu lampa (datorită descărcării electrice dintre electrozi) se consideră drept element neliniar. Spre exemplu, curba de curent absorbită de lampa (ДРЛ) și histograma armonicilor lămpii indică armonici măsurate de ordinul de la 1 la 5, iar a lămpii ДHaT, armonici sunt între ordinele 1-16 [67].

Analizând literatura de specialitate și graficele lămpilor s-a stabilit că lămpile din semiconductoare LED ca receptor de e.e electrice are cea mai mare intensitate de generare a armonicilor superioare la o unitate de putere consumată din rețelele electrice de joasă tensiune. Consumul redus ale acestor lămpi și durata lor de viață îndelungată sporește cererea lor pe piață. Această analiză indică la faptul, că având un consum mic de energie , dar fiind concomitent surse puternice de generare la unitate de putere consumată LED-urile pot genera o nouă problemă nu numai pentru asigurarea calității e.e, dar și pot avea impact asupra eficienței energetice a tehnologiei de distribuție a e.e [67].

Analiza caracteristicilor receptorilor de energie moderni identifică cert la perspectiva creșterii impactului acestor receptori, asupra calității energiei și la necesitate de efectuare a calculului regimului rețelelor de distribuție cu aplicarea metodelor ce pot lua în considerare aceste modificări esențiale ale receptorilor întru obținerea informațiilor veridice la efectuarea proiectării corecte și argumentate a rețelelor electrice de distribuție.

1.5 Concluzii la capitolul I

1. Analiza retrospectivă a dezvoltării sistemelor de alimentare cu e.e indică o evoluție a conceptelor de realizare a arhitecturii acestora în funcție de dezvoltarea tehnologiilor de producere, transmisie și distribuție a e.e. GD a cunoscut perioade de creștere și declin. În prezent se manifestă tendința de creștere a cotei GD, inclusiv, și urmare a promovării conceptului rețelelor inteligente (SMART GRID) cu multiple SGD (micro rețea).

2. În urma examinării metodelor existente de calcul ce pot permite elaborarea unui procedeu/algorithm pentru stabilirea impactului consumului și generării concomitente în rețelele electrice arborescente se stabilește necesitatea aplicării metodei curenților de buclă combinată cu metoda superpoziției.

3. O problemă separată o prezintă calcularea regimului în REJT în cazul funcționării cu sarcini neliniare, care au un impact semnificativ asupra indicilor de calitate a e.e furnizate consumatorilor, chiar dacă unii din acești receptori nu au semne de neliniaritate, deci au caracteristicile de sarcină liniară.

4. Așadar, în cercetare și elaborare a abordărilor noi și metodologii de calculul al REJT cu SGD și sarcini neliniare asupra indicilor de calitate a e.e, este necesar de stabilit acel indice al calității de la care derivă calculul impactului sarcinilor și surselor neliniare.

5. Dezvoltarea segmentului de generare în baza SGD conduce la schimbarea arhitecturii sistemelor electroenergetice și a regimurilor lor de funcționare, care pot afecta atât calitatea e.e, cât și funcționarea sistemelor de protecție, inclusiv, urmare a schimbării direcției fluxurilor de putere în rețelele electrice în comparație cu cele acceptate la proiectarea rețelelor. Sporirea complexității infrastructurii rețelelor electrice și faptul, că schemele echivalente de calcul aplicate în prezent nu corespund topologiei reale ale acestor rețele creează dificultăți la realizare calculelor regimurilor cu metode și tehnici tradiționale de calcul. Pentru sporirea preciziei calculelor, schemele și metodele de calcul este necesar de adaptat la topologia reală flexibilă a rețelelor de alimentare cu e.e.

6. În contextul aspectelor analizate se poate constata, că implementarea conceptului de GD, creșterea cotei sarcinilor neliniare, flexibilitatea topologiei rețelelor electrice prezintă o provocare pentru asigurarea calității e.e furnizate și creează dificultăți privind calculul regimurilor de funcționare ale acestora.

II. ELABORAREA CONCEPTULUI ȘI A METODOLOGIEI DE CALCUL PENTRU CERCETAREA REGIMULUI REȚELEI DE JOASĂ TENSIUNE CU SURSE ȘI SARCINI DISTRIBUITE

În sistemele electroenergetice moderne REJT au lungimi mici în comparație cu lungimea rețelelor de medie și înaltă tensiune, sunt extins ramificate, fapt ce complică examinarea acestora. Spre exemplu, este important ca la etapa de dimensionare a unei rețele electrice, să se stabilească valorile tensiunii la capătul liniei în corespundere cu normele. Totodată, consumatorii distribuți pe toată lungimea, nu permit un calcul exact în baza căruia am putea stabili valorile tensiunii. Pentru a putea elabora un concept de analiză a generării distribuite în REJT este necesar de elaborat o metodologie adaptivă de calcul a rețelelor cu topologie variabilă care includ SGD și sarcini distribuite, inclusiv neliniare.

2.1. Argumentări a posibilității utilizării conceptului de superpoziție la analiza regimului circuitelor multifilare de joasă tensiune cu sarcini distribuite

Metodologia de cercetare este elaborată pentru REJT cu $U=0,38$ kV cu neutrul legat la pământ și conexiunea transformatorului în stea. Aceste rețele includ următoarele elemente: transformator de putere, conductoare/cabluri electrice și receptorii de e.e.

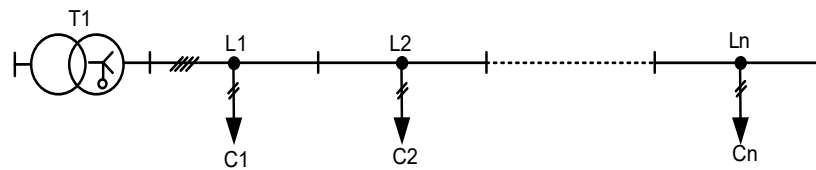


Fig. 2.1. Schema electrică monofilară a unei rețele electrice de joasă tensiune: T1 - transformator de putere, L1 - Linia electrică 0,38 kV și C1(n)-Consumator

Pentru efectuarea analizei regimului este necesar de modificat schema echivalentă monofilară din fig. 2.1, într-o schemă echivalentă multifilară, care este mult mai apropiată de topologia reală a rețelei de distribuție a e.e (fig. 2.2).

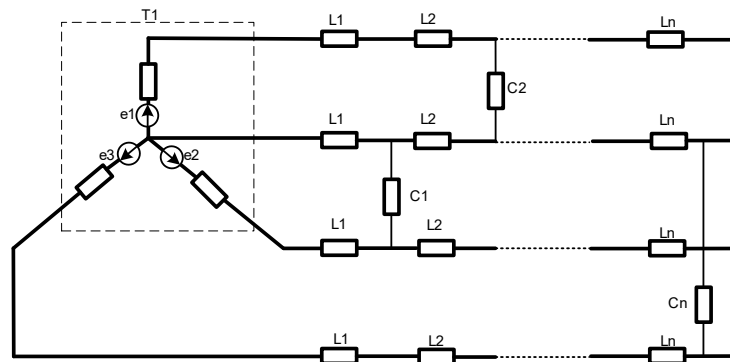


Fig. 2.2. Schema electrică a unei rețele electrice de joasă tensiune: T1-Transformator de putere, L1-Linia electrică 0,38 kV și C1(n)-Consumator electric, e1, e2, e3 – t.e.m

Elementele din figura 2.2: T1 - transformator; L_1, L_2, L_n - Linia electrică și C_n - consumatorii ai e.e sunt prezentate prin impedanțe.

În schema echivalentă multifilară (fig.2.3) se prezintă conceptul de racordare distribuită a sarcinilor și a surselor de generare distribuită la rețeaua trifazată cu neutrul legat la pământ. Aceasta permite de a efectua o dezlegare a circuitelor fazelor, deoarece în procedeul de calcul al regimului operează cu circuite, care includ două conductoare - conductorul direct format de faza respectivă a circuitului trifazat și conductorul neutru, care asigură curgerea retur a curentului de la sarcină spre sursa de tensiune.

Deoarece, considerăm că circuitul trifazat este un circuit liniar pentru care este veridic conceptul de superpoziție, obținem posibilitatea de a suma soluțiile obținute pentru fiecare fază.

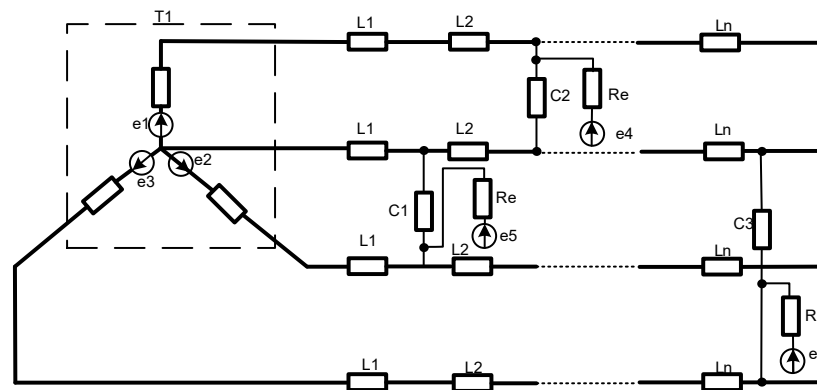


Fig. 2.3. Schema electrică a unei REJT cu GD: T1 - Transformator de putere, L_1 - Linia electrică 0,38 kV și $C_1(n)$ - Consumator electric, e_1, e_2, e_3 - t.e.m, e_4, e_5, e_6 - surse de generare, Re - impedanța blocului de generare

Vom menționa, că sarcinile neliniare se pot substitui cu ansambluri de componente liniare (sarcini și surse de tensiune electromotoare), care satisfac condițiile transformatei Fourier. Și în acest caz, va fi valabil principiul de superpoziție ale soluțiilor obținute, deoarece componentele neliniare au fost substituite cu componentele liniare cu parametri concentrați, fie că numărul lor a crescut. Numărul componentelor suplimentare incluse în circuit depinde doar de precizia dorită de aproximare a elementului neliniar. Substituirea componentelor neliniare cu ansambluri de componente cu parametri concentrați (componente liniare) conduce doar la creșterea numărului de necunoscute, deci, a curenților de buclă care trebuie calculați cu utilizarea schemei liniare echivalente de calcul a circuitului trifazat. Aceste constatări permit formularea ipotezei de prezentare a circuitelor multifazice cu circuite monofilare formate de către un conductor direct și conductor, care asigură întoarcerea curentului la sursa de alimentare indiferent de faptul că în acest circuit sunt ori lipsesc elemente cu caracteristici neliniare. Unica consecință a substituirii componentelor neliniare cu componente (sau termeni) liniare conduce la necesitatea de a opera cu

un număr mai mare de variabile necunoscute ale sistemului de ecuații liniare care descriu echilibrul tensiunii în circuitul examinat.

Întru elucidarea conceptului și tehnicii de calcul adaptată pentru analiza regimului în rețelele de distribuție trifazate, vom considera, că regimul este un regim simetric. Această ipoteză permite simplificarea topologiei circuitului utilizat pentru analiza proceselor în circuitul trifazat, deci, utilizarea schemei echivalente monofilare.

Aplicarea ipotezei privind posibilitatea utilizării conceptului de superpoziție pentru circuitele multifazice de asemenea ne permite simplificarea procedurii de calcul al regimului prin aplicarea unui algoritm similar de calcul indiferent de numărul de sarcini, surse de generare din circuit conectate la un nod al circuitului de alimentare. Vom menționa, că în conceptul propus de aplicare a metodei curenților de buclă, numărul de ecuații care descriu regimul de echilibru al tensiunilor fazei este determinat de ramurile transversale conectate la faza liniei de alimentare și la conductorul de retur a curentului (neutru). Numărul de ecuații și variabile independente se determină din condiția $n-1$, unde n – numărul de laturi (ramuri) transversale ale circuitului. Ca ramură transversală se definește și circuitul sursei de tensiune conectate la intrarea fazei rețelei electrice. Această înțelegere a esenței problemei de calcul a regimului în circuitul cu sarcini și surse de generare distribuite are ca consecință avantajul, că aceste calcule se realizează în baza unui algoritm unic de calcul al curenților și căderilor de tensiune pe impedanțele rețelei electrice.

Modelul de calcul al REJT cu consumatori distribuiți. În fig. 2.4 se prezintă schema echivalentă a circuitului cu sarcini distribuite.

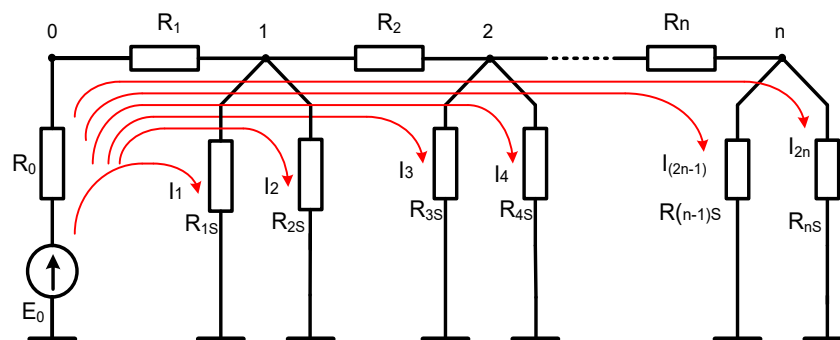


Fig. 2.4. Schema de calcul pentru o REJT cu SD

Schema echivalentă din fig. 2.4 o vom utiliza pentru argumentarea procedurii de calcul al regimului în acest circuit cu metoda curenților de buclă. Este natural, că pentru acest circuit se pot întocmi ecuațiile echilibrului tensiunii, deci, aplicând teorema a doua a lui Kirchhoff. În contextul problemei științifice formulate este important, cum se întocmesc ecuațiile echilibrului tensiunii. Ca o propunere utilă, care va avea impact asupra algoritmului de calcul al curenților în

circuitul examinat, constă în cererea, ca ecuațiile echilibrului tensiunilor trebuie obligatoriu să includă numai un singur element transversal parcurs doar de un singur curent de buclă. Prin aceasta se creează o platforma cu caracter determinist pentru determinarea căderii tensiunii pe fiecare element transversal conform legii lui Ohm. Cunoașterea curenților de buclă permite nu numai determinarea căderii tensiunii pe fiecare element transversal, dar și calculul curenților și în elementele longitudinale ale circuitului în baza primei teoreme Kirchhoff.

Realizarea conceptului expus de evidențiere a buclelor de curenți în circuitul examinat permite argumentarea și elaborarea procedurii de calcul al curenților de buclă, cunoașterea cărora permite calcularea căderii tensiunii pe fiecare element al circuitului și determinarea tuturor parametrilor derivați de la curent și tensiune. Aceasta permite construirea caracteristicilor regimului și determinarea, de exemplu, a profilurilor tensiunii pe traseul liniei electrice, indicatorii de calitate a e.e, inclusiv, a abaterii tensiunii și a coeficienților de distorsiune a tensiunii și curentului.

Pentru circuitul echivalent monofilar cu sarcini și surse de generare distribuite (fig.2.4) se poate întocmi următorul sistem de ecuații liniare, care descriu echilibrul tensiunilor în buclele evidențiate conform [68]:

$$\begin{cases} \dot{I}_1(R_0 + R_1 + R_{1S}) = \dot{E}_0; \\ \dot{I}_2(R_0 + R_1 + R_{2S}) = \dot{E}_0; \\ \dot{I}_3(R_0 + R_1 + R_2 + R_{3S}) = \dot{E}_0; \\ \dot{I}_4(R_0 + R_1 + R_2 + R_{4S}) = \dot{E}_0; \\ \vdots \\ \dot{I}_{2(n-1)}(R_0 + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{(n-1)S}) = \dot{E}_0; \\ \dot{I}_{2n}(R_0 + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{nS}) = \dot{E}_0. \end{cases} \quad (2.1)$$

unde

$\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4, \dots, \dot{I}_{2(n-1)}, \dot{I}_{2n}$ - curenți de buclă; $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ - rezistențele active longitudinale ale porțiunilor fazelor liniei electrice; $R_{1S}, R_{2S}, \dots, R_{(n-1)S}, R_{nS}$ - rezistențele active ale sarcinilor conectate la faza liniei de alimentare electrice trifazate; R_0 - rezistența internă a sursei de tensiune electromotoare racordate la faza liniei; \dot{E}_0 - tensiunea electromotoare a sursei conectate la intrarea liniei electrice.

Parametrii sursele de tensiune sunt reglementate prin actele normative și din această cauză se consideră ca cunoscute. Rezistențele active ale liniilor electrice de asemenea se calculează, de

exemplu, utilizând relația $R = \frac{l \cdot \rho}{S}$. unde l - lungimea liniei, S - aria secțiunii transversale a conductorului, ρ - rezistența specifică a materialului din care este confecționat conductorul. Valoarea echivalentă a rezistenței active care determină puterea P absorbită de receptor din rețeaua de alimentare se determină din relația $R_s = \frac{U^2}{P_s}$, U^2 - tensiunea în rețeaua electrică, P_s - puterea activă absorbită de receptorul racordat la rețea, a cărei valoare limită de sus este determinată la etapa de prefezabilitate, deci, care se poate determina din avizele de racordare, contractele de furnizare sau cu utilizarea curbelor de sarcină. Determinarea echivalentului sarcinii racordate la linie se poate determina prin diferite metode, inclusiv, luând în vedere curba zilnică a sarcinii. Din această constatare reiese caracterul variabil al sarcinii, deci, și a valorilor parametrilor prin care se modelează în schema echivalentă această sarcină.

Un alt parametru important al schemei echivalente din figura 2.4 o constituie elementele notate $R_{2s}, R_{3s}, \dots, R_{ns}$, care se pot considera ca echivalent al pierderilor de energie în izolația liniei electrice. Valorile acestor componente se pot determina cu aplicarea relației $R_{ms} = \frac{U^2}{P_{cgs}}$, unde U - tensiunea de fază în secțiunea respectivă a liniei electrice de alimentare, în nodul m ; P_{cgs} - pierderile de putere în izolația liniei în porțiunea dintre două puncte de racordare ale receptorilor (sarcinilor). Aceste pierderi au două componente: pierderile dielectrice care se pot calcula cu relația $P_d = U^2 \omega C_{sp} l_{k,k+1} \operatorname{tg} \delta_{iz}$ și de scurgere a curentului prin izolație la pământ sau între fazele liniei trifazate, deci, $P_{i.iz} = \frac{U^2}{R_{iz}}$, unde U - tensiunea de fază la determinarea pierderilor în izolația față de pământ sau tensiunea de linie la determinarea pierderilor în izolația dintre faze; ω - frecvența unghiulară; C_{sp} - capacitatea liniară a fazei (față de pământ sau față de celelalte faze); $l_{k,k+1}$ - lungimea conductorului fazei dintre punctul de racord k și punctul de racord al sarcinilor $k+1$; $\operatorname{tg} \delta_{iz}$ - tangenta unghiului de pierderi a izolației liniei, a cărei valoare pentru linii se consideră egală cu $\operatorname{tg} \delta_{iz} = 0.05 - 0.1$; R_{iz} - rezistența izolației curentului de scurgere.

Urmare a topologiei schemei echivalente prezentate în figura 2.4, precum și a explicațiilor sensului atribuit acestor componente, avem posibilitatea de a prezenta în format desfășurat structura termenilor din sistemul de ecuații (2.1), deci:

rezistențele buclelor circuitului $m-1$ și circuitului m $R_{(m-1)m} = R_0 + \sum_{k=1}^m R_k + R_{(m-1)S}$;

$$R_{mm} = R_0 + \sum_{k=1}^m R_k + R_{mS} .$$

valorile rezistențelor porțiunilor longitudinale se determină ca suma componentelor conectate în serie respectiv: $R_{01} = R_1$, $R_{02} = R_1 + R_2$, $R_{0k} = R_1 + R_2 + \dots + R_k$, $R_{0m} = R_1 + R_2 + \dots + R_m$.

Urmare a notărilor aplicate pentru componentele circuitelor buclelor de curent se obține următorul sistem de ecuații liniare :

$$\begin{cases} \dot{I}_1 \cdot R_{11} = \dot{E}_0 ; \\ \dot{I}_2 \cdot R_{22} = \dot{E}_0 ; \\ \dot{I}_3 \cdot R_{33} = \dot{E}_0 ; \\ \dot{I}_4 \cdot R_{44} = \dot{E}_0 ; \\ \vdots \\ \dot{I}_{2(n-1)} \cdot R_{(2n-1)(2n-1)} = \dot{E}_0 ; \\ \dot{I}_{2n} \cdot R_{(2n)(2n)} = \dot{E}_0 . \end{cases} \quad (2.2)$$

În sistemul de ecuații în calitatea de variabile independente se poziționează curenții de buclă $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4, \dots, \dot{I}_{2(n-1)}, \dot{I}_{2n}$, care și sunt mărimile căutate. Sistemul de ecuații (2.2) se poate prezenta în formă matricială:

$$[A]\{X\}=\{B\} \quad (2.3)$$

unde

$$A = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & \dots & R_{1k} & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & \dots & R_{2k} & R_{2m} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} & \dots & R_{3k} & R_{3m} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} & \dots & R_{4k} & R_{4m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{k1} & R_{k2} & R_{k3} & \dots & \dots & R_{kk} & R_{km} \\ R_{n1} & R_{n1} & R_{n3} & \dots & \dots & R_{nk} & R_{nm} \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} \dot{E}_0 \\ \dot{E}_0 \\ \dot{E}_0 \\ \dot{E}_0 \\ \vdots \\ \dot{E}_0 \\ \dot{E}_0 \end{bmatrix} ; \quad I = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \\ \vdots \\ \dot{I}_{2k} \\ \dot{I}_{2n} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Ecuația (2.4) este prezentată în formă generală, care în principiu ia în vedere și legăturile mutuale posibile ale circuitului studiat. În acest caz se examinează un circuit cu o topologie mai

complexă ca schema monofilară. La analiza schemei monofilare la aplicarea metodei curenților de buclă, reiese că matricea A este o matrice diagonală.

Obținerea soluției ecuației (2.2) pentru cazul general se poate efectua prin inversarea matricei coeficienților de pe lângă variabilele necunoscute prin înmulțirea părții din stânga a ecuația matriciale (2.3), prezentată de relația, $[A]\{X\}=\{B\}$ cu matricea inversă $[A^{-1}]$. Astfel obținem relația în formă matricială pentru variabilele necunoscute sub forma (2.5):

$$[A^{-1}] \cdot \{B\} = \{X\}. \quad (2.5)$$

Semnificația matricei din (2.4) constă în faptul, că curenții se determină prin înmulțirea tensiunii la matricea inversată a rezistențelor $[A^{-1}]$ (se poate inversa prin mai multe metode matematice: Gauss - Choleski, Gauss-Jordan, metoda partiționării pentru inversarea matricei; sau prin aplicarea limbajelor de programare matematică: MATHCAD, MATLAB, MAPLE etc. care aplică aceste metode matematice); $\{B\}$ - matricea tensiunilor, $\{X\}$ - matricea curenților necunoscuți (ceea ce corespunde și legii lui Ohm).

Cunoașterea matricei curenților, calculați din relația (2.5), de exemplu, dacă, matricea lor o vom nota ca $[X]$, se pot calcula tensiunile în nodurilor rețelei, în baza cărora se pot construi profilurile tensiunii pe lungimea liniei electrice. Expresia de calcul a tensiunilor nodale se prezintă de următoarea relația:

$$[A^{-1}] \cdot [X] = [A^{-1}] \cdot [A^{-1}] \cdot [B] \neq [B], \quad (2.6)$$

unde $[X]$ - corespunde matricei curenților calculați conform (2.3), $[B]$ - matricea tensiunilor nodale ale rețelei de alimentare.

Dacă sunt cunoscute valorile liniare ale rezistențelor longitudinale active R_0 și inductanța liniară L_0 , mărimile $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ se pot prezenta ca $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$ și se calculează cu relațiile $Z_1 = R_0 l_1 + j\omega L_0 l_1$, $Z_2 = R_0 l_2 + j\omega L_0 l_2$, $Z_3 = R_0 l_3 + j\omega L_0 l_3$, ... , $Z_n = R_0 l_n + j\omega L_0 l_n$, în care $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ - reprezintă lungimea porțiunilor liniei electrice dintre nodurile de racord a sarcinilor la linie. În interpretarea examinată aceasta sunt lungimile porțiunii incluse între nodul notat "0" și nodul "k". Prin substituirea elementelor active (rezistențe active) ale matricei A cu valorile impedanțelor porțiunilor respective și impedanțele circuitelor buclelor de curent se poate obține o prezentare generală pentru ecuația matricială a circuitului:

$$A = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & \cdots & Z_{1k} & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & \cdots & Z_{2k} & Z_{2n} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & \cdots & Z_{4k} & Z_{4n} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & \cdots & Z_{4k} & Z_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{k1} & Z_{k2} & Z_{k3} & \cdots & \cdots & Z_{kk} & Z_{kn} \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & \cdots & \cdots & Z_{nk} & Z_{nn} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \dot{E}_0 \\ \dot{E}_0 \\ \dot{E}_0 \\ \dot{E}_0 \\ \vdots \\ \dot{E}_0 \\ \dot{E}_0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

După calcularea curenților din noduri putem obține pentru fiecare ramură a circuitului valoarea căderii tensiunii prin aplicarea legii lui Ohm. Curentul \dot{I}_{calc} reprezintă valorile obținute cu aplicarea relației (2.5), utilizând parametrii matricei A din (2.7). În așa mod obținem valorile tensiunii, care se utilizează pentru construirea profilurilor tensiunii în linie pentru diferite regimuri de funcționare.

În caz că cunoaștem valorile curenților în sarcinile conectate la linie, avem posibilitatea de a calcula și valorile tensiunilor pe fiecare element a buclei, urmare a scurgerii curentului de buclă, inclusiv, căderea tensiunii pe sarcinile conectate la linie:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_{calc1} Z_{sarcina1}; \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_{calc2} Z_{sarcina2}; \\ \dot{U}_3 = \dot{I}_{calc3} Z_{sarcina3}; \dots; \dot{U}_n = \dot{I}_{calcn} Z_{sarcina n}. \end{cases} \quad (2.8)$$

În baza formulei (2.8) se calculează pentru fiecare buclă valorile complexe ale tensiunii în nodurile de racord ale sarcinilor liniei. Pentru calcularea căderii tensiunii pe fiecare porțiune longitudinală a liniei electrice (porțiunile dintre nodurile megieșe ale liniei), este necesar să aplicăm prima lege a lui Kirchhoff pentru determinarea valorilor curenților în porțiunile respective. Această procedură trebuie să se facă de la dreapta spre stânga, începând cu sumarea curenților de buclă în ramurile transversale din stânga spre dreapta, deci, la primul pas se determină $\dot{I}_n = \dot{I}_{2n} + \dot{I}_{(2n-1)}$, unde $n = 1, 2, 3, \dots$, iar la pasul doi se calculează curentul intrare în punctul $n-1$, deci, $\dot{I}_{n-1} = \dot{I}_{2n} + \dot{I}_{2n-1} + \dot{I}_{2n-2} + \dot{I}_{2n-3}$, pasul trei $\dot{I}_{n-2} = \dot{I}_{2n} + \dot{I}_{2n-1} + \dot{I}_{2n-2} + \dot{I}_{2n-3} + \dot{I}_{2n-4} + \dot{I}_{2n-5}$ sau $\dot{I}_{n-m} = \dot{I}_{2n} + \dot{I}_{2n-1} + \dot{I}_{2n-2} + \dot{I}_{2n-3} + \dots + \dot{I}_{2n-m-1} + \dot{I}_{2n-m}$, unde m - nodul rețelei pentru care se sumează curenții de buclă în stânga de acest nod.

Cunoașterea curenților intrare în punctele nodale ne permite să determinăm căderile de tensiune pe elementele longitudinale ale liniei de alimentare, deci, pe porțiunile plasate între două

puncte megieșe $n - m$ și $n - m - 1$. Căderea tensiunii pe impedanța echivalentă Z_{n-m} în punctul nodal m (a vedea fig. 2.4) se determină din relația $\dot{U}_{n-m} = \dot{I}_{n-m} Z_{n-m}$, unde $m=1, 2, 3, \dots, n$ [69].

Acest procedeu de calcul al curenților și căderii tensiunii poate fi utilizat la calculul REJT: monofazate, trifazate cu sarcini și surse simetrice și nesimetrice, trifazate pentru analiza unei singure faze cu consumatori și SGD în arhitecturi: MICROGRID, autonome etc. Conceptual se prezintă faptul, că aceste circuite se examinează ca circuite independente.

Modelul este elaborat pentru analiza la etapa de preferezabilitate a proiectării, când este necesar de stabilit posibilitatea conectării unor noi consumatori cu SGD în rețea „ON GRID”, sau la elaborarea rapoartelor analitice la etapele de preferezabilitate pentru întocmirea caietelor de sarcină.

Algoritmul de calcul al circuitului cu surse distribuite de energie. Dezvoltarea noilor tehnologii de producere a e.e are impact și asupra tehnologiilor de transport și distribuție a e.e, dezvoltării infrastructurii rețelelor electrice de distribuție de joasă tensiune, modificări a regimurilor de sarcină a rețelelor electrice la creșterea cotei surselor de generare distribuită. Cea mai reală opțiune a sporirii numărului de surse de energie astăzi se prezintă promovarea și implementarea acestor surse de către consumatori, pentru ași acoperi parțial consumul de energie din sursa proprie de generare. Ca cea mai perspectivă tehnologie de dezvoltare a SGD se prezintă instalațiile fotovoltaice cu conectarea lor distribuită la REJT.

Luând în considerare această tendință, schema echivalentă din fig. 2.4 se poate modifica prin suplimentarea sarcinii pe care noi am definit-o ca pierderi în izolație cu o sursă de tensiune electromotoare, generată de exemplu de o instalație fotovoltaică de putere relativ mică.

În figura 2.5 se prezintă schema echivalentă cu surse de generare distribuită, care este o opțiune mai dezvoltată a schemei echivalente din fig. 2.4.

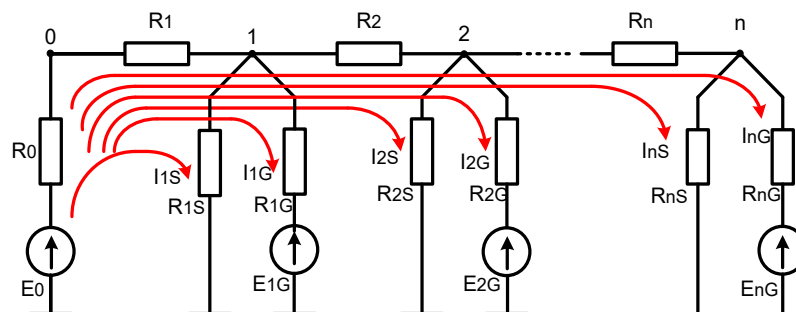


Fig. 2.5. Schema de calcul pentru o REJT cu SD și SDG

Compararea topologiei schemelor echivalente din fig. 2.4 și fig. 2.5 indică la faptul că, o ramură transversală se substituie cu o sursă de tensiune electromotoare $E_{1G}, E_{2G}, \dots, E_{nG}$ cu o

rezistență internă. Această modificare schimbă doar partea dreapta a ecuațiilor echilibrului tensiunii în circuitele definite ca bucle de curent. Aceste ecuații se pot prezenta astfel conform [69-74]:

$$\begin{cases} \dot{I}_{1S} \cdot R_{11} = \dot{E}_0; \\ \dot{I}_{1G} \cdot R_{22} = \dot{E}_0 - \dot{E}_{1G}; \\ \dot{I}_{2S} \cdot R_{33} = \dot{E}_0; \\ \dot{I}_{2G} \cdot R_{44} = \dot{E}_0 - \dot{E}_{2G}; \\ \vdots \\ \dot{I}_{nS} \cdot R_{n-1;n-1} = \dot{E}_0; \\ \dot{I}_{nG} \cdot R_{nn} = \dot{E}_0 - \dot{E}_{nG}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Apelând la analogie și utilizând procedeul de calcul al circuitului cu topologia similară din fig. 2.5 se determină curenții de buclă $\dot{I}_{1S}, \dot{I}_{1G}, \dot{I}_{2S}, \dot{I}_{2G}, \dots, \dot{I}_{nS}, \dot{I}_{nG}$ și a căderii tensiunii pe elementele schemei echivalente R_1, R_2, \dots, R_n prezentate în fig. 2.5. Comunitatea topologiei schemei echivalente determină și similitudinea algoritmului de calcul al regimului în circuit. Pentru schema din fig. 2.4, se modifică doar matricea B în comparație cu matricea din ecuația matriceală (2.7) [75,76].

2.2. Particularitatea calculului rețelelor electrice de joasă tensiune cu sarcini neliniare și generare distribuită

Creșterea cotei sarcinilor neliniare în REJT constituie o realitate sesizată de către specialiștii în domeniul energiei. Acest fapt conduce la modificarea topologiei schemelor echivalente de calcul a regimului și la necesitatea de noi abordări privind dezvoltarea metodelor de calcul. Vom menționa, că efectele de neliniaritate se pot manifesta atât de sarcini, cât și de surse de generare care se conectează la rețeaua centralizată de alimentare cu e.e. Aceste modificări ale topologiei și caracteristicilor componentelor ce formează rețeaua de distribuție au impact asupra calității e.e. În acest context, studierea particularităților regimului în aceste rețele prezintă interes pentru a asigura indicii de calitate a e.e. într-o măsură care să satisfacă prevederile standardelor în vigoare.

Surse de armonici superioare în rețelele electrice. În calitate de generatoare de armonici superioare, preponderent, de armonici superioare în rețelele electrice sunt: convertoarele electrice cu semiconductori (monofazate și trifazate, executate în schema de punte și semipunte), invertoare de tensiune și de curent cu dirijare simetrică și nesimetrică, regulatoare de putere, transformatoarele de putere, cuptoare metalurgice cu arc electric, lămpi cu descărcare electrică în

gaze, reactoare cu tiristoare, motoare electrice, echipamente electrice, convertoare de racordare a surselor de energie regenerabilă la rețelele electrice etc.

În figura 2.6 se prezintă schema redresorului Larionov și diagrama curentului fazei redresorului, care este simetrică față de axa absciselor.

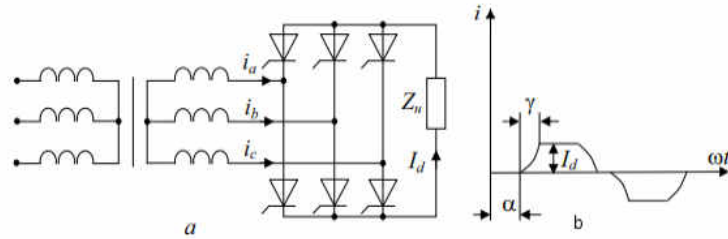


Fig. 2.6. Schema echivalentă a redresorului trifazat și diagrama curentului de fază

Distorsiunea curbelor de tensiune și curent în rețeaua electrică la funcționarea redresorului are o comportare periodică. Aceste distorsiuni sunt determinate de spectrul de armonici superioare de ordinul $n = mk \pm 1$, unde m - numărul de pulsații a tensiunii redresate, care pentru schema Larionov $m = 6$; $k = 1, 2, 3, \dots$. Pentru schema Larionov, amplitudinea I_n a armoniciilor curenturilor se determină de componenta activă I_{na} și componenta reactivă I_{nr} se calculează cu relația [77]:

$$I_n = \sqrt{I_{na}^2 + I_{nr}^2}, \quad (2.10)$$

unde

$$I_{na} = \frac{2\sqrt{3}E_m}{n\pi X_k} \sin \frac{n\pi}{3} \left\{ \frac{1}{n+1} \sin \left[(n+1) \frac{\gamma}{2} \right] \sin [(n+1)\psi] - \frac{1}{n-1} \sin \left[(n-1) \frac{\gamma}{2} \right] \sin [(n-1)\psi] \right\},$$

$$I_{nr} = \frac{2\sqrt{3}E_m}{n\pi X_k} \sin \frac{n\pi}{3} \left\{ \frac{1}{n+1} \sin \left[(n+1) \frac{\gamma}{2} \right] \cos [(n+1)\psi] - \frac{1}{n-1} \sin \left[(n-1) \frac{\gamma}{2} \right] \cos [(n-1)\psi] \right\},$$

E_m - amplitudinea tensiunii electromotoare a rețelei de alimentare, $\psi = \alpha + \frac{\gamma}{2}$ - diferența de fază a tensiunii electromotoare a rețelei și primei armonici a spectrului curenturilor în rețea; X_k - impedanța reactivă a circuitului de comutație, α - unghiul de deschidere comandată a tiristoarelor redresorului, γ - unghiul de comutație a tiristoarelor.

Prima armonică a spectrului de curent se calculează cu relația $I_{1a} = \frac{3E_m}{2\pi X_k} \sin \gamma \sin 2\psi$

Redresoarele sunt cele mai frecvent utilizate ca sarcinile neliniare alimentate de la rețelele electrice de distribuție. În funcție de numărul de pulsații a tensiunii redresate se obțin diferite

spectre ale tensiunii și curentului redresorului. Pentru sesizarea tendinței evoluției magnitudinii armonicilor de curent în spectru, în calitate de exemplu, în figura 2.7 se prezintă spectrele generate de redresoare cu diferite pulsații pe perioada tensiunii redresate [78,79].

Vom menționa, că redresoarele cu sarcini neliniare se pot prezenta ca surse de tensiune cu frecvențe ridicate și ca surse de curent, care au un spectru destul de larg al armonicilor injectate în rețeaua de alimentare.

Conform standardelor internaționale existente, armonicile superioare de ordinul $n < 13$ nu trebuie să depășească 5% din amplitudinea tensiunii de alimentare. Factorul de distorsiune al curbei tensiunii de alimentare nu trebuie să fie mai mic de 0,995. În acest caz, distorsiunea armonică a tensiunii nu trebuie să fie mai mare de 10%. Curba de tensiune a rețelei de alimentare în acest caz este apropiată de o formă sinusoidală. Dacă se depășesc cerințele standardelor existente, trebuie utilizate filtre speciale de armonici superioare. Aceste cerințe se pot utiliza ca criterii pentru determinarea valorii limită de sus a ordinului armonicii superioare pentru care se realizează calculul regimului rețelei cu sarcini neliniare.

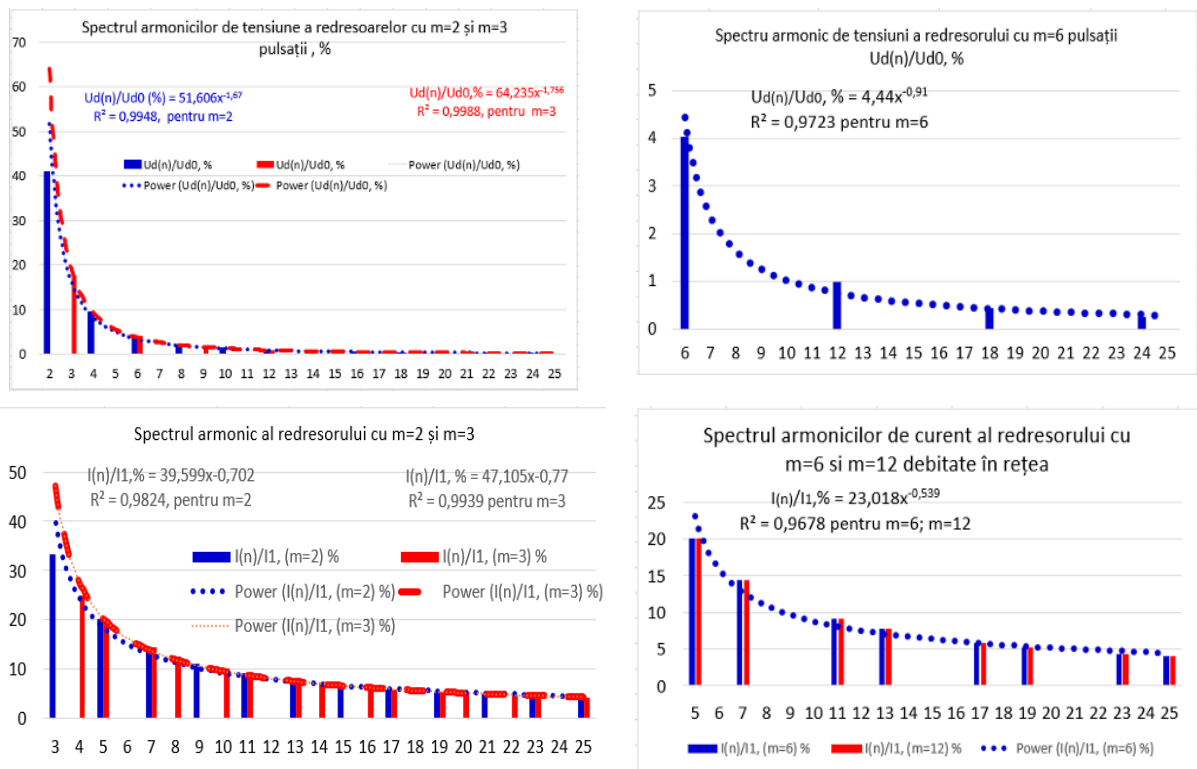


Fig. 2.7. Spectrele de armonici a tensiunii redresate și spectrul curentilor debitați în rețeaua de alimentare de redresoarele cu pulsații m=2, 3, 6 și 12

Acest criteriu, prezentat în formă de relație matematică, se poate formula astfel [79]:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m U_n^2}}{U_1} \leq 0.1 \quad (2.11)$$

unde U_n - armonica superioară a tensiunii pentru $n_u \geq 2$; U_1 - valoarea tensiunii armonicii fundamentale.

Coeficientul de distorsiune a curentului K_I se calculează din relația:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m I_n^2}}{I_1} \leq 0.1 \quad (2.12)$$

unde I_n - armonica superioară a curentului de ordinul $n_i \geq 2$; I_1 - valoarea curentului cu frecvența armonicii fundamentale.

Prin calcul iterativ, cu aplicarea relațiilor (2.11) și (2.12), se poate determina ordinul armonicii superioare generate de sarcina neliniară, care se include în schema echivalentă a circuitului de calcul a regimului rețelei, deci $n = m$, unde m – ordinul armonii definită ca limita de sus a spectrului.

Armonicile de curent generate de instalațiile de sudare se pot calcula în unități relative utilizând relația de aproximație $I_n^* \approx \frac{1}{n^2}$ în cazul instalațiilor trifazate de sudare pentru $n = 5, 7, 11, 13$ și cu relația $I_n^* \approx \frac{0.3}{n^2}$ pentru $n = 3, 5, 7, 9, \dots$. Amplitudinile armonicilor în acest caz se micșorează foarte rapid, ce condiționează un număr mic de ramuri suplimentare utilizate pentru substituirea elementelor neliniare de acest tip.

Transformatoarele de putere sunt surse de armonici superioare de curent impare la funcționarea lor în rețelele electrice (fig. 2.8).

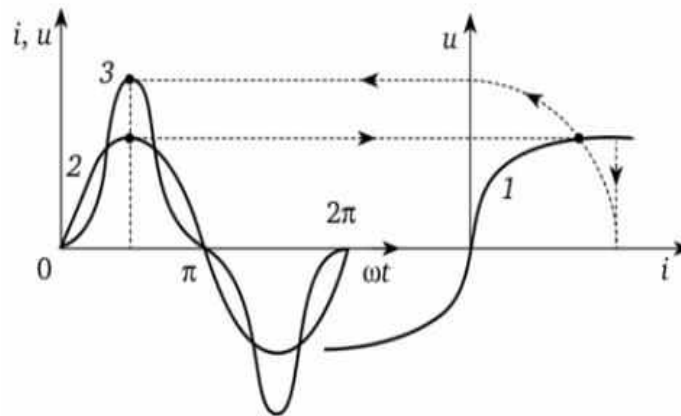


Fig. 2.8. Mecanismul de generare a armonicilor superioare de curent de transformatoarele rețelelor

În fig. 2.9 sunt prezentate spectrele armonice ale curentului pentru cuptoarele cu arc electric, utilizate preponderent pentru topirea metalelor, și a lămpilor utilizate în sistemele de iluminat public, obținute prin procesarea rezultatelor măsurărilor experimentale [79] cu determinarea funcțiilor de aproximație ale acestora.

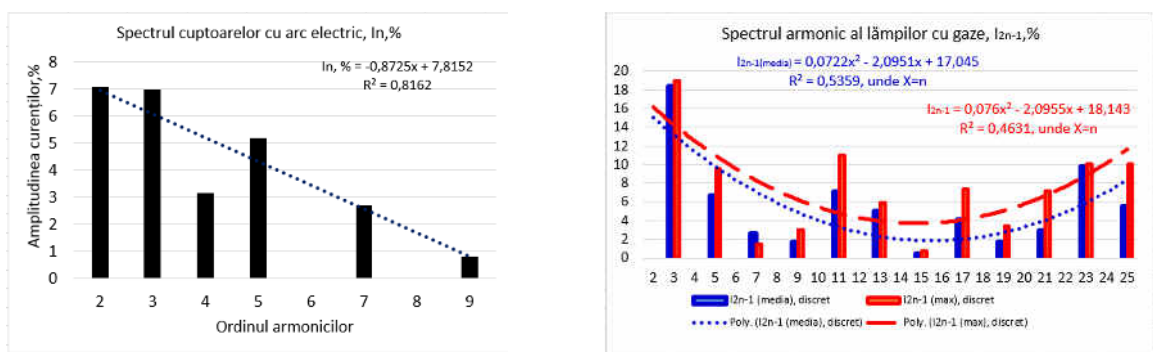


Fig. 2.9. Spectre de armonici ale diferitor consumatori de e.e

Informațiile prezentate în fig. 2.7 și fig. 2.9 se pot utiliza pentru estimarea topologiei schemelor de substituire a elementelor neliniare de diferite tipuri, care frecvent se întâlnesc în rețelele electrice, precum și a parametrilor schemelor echivalente liniare cu parametri concentrați.

Scheme echivalente de substituire ale elementelor neliniare. Substituirea elementelor (sarcinilor și/sau surselor de generare neliniare) cu elemente liniare, simplifică din punct de vedere metodologic efectuarea calculelor circuitelor neliniare. Reacția circuitului la sarcinile neliniare se manifestă prin apariția în acest circuit a armonicilor superioare de tensiune și curent. În acest context, elementele neliniare se pot examina ca surse de energie formate din mai multe surse elementare de generare a e.e, care generează semnale armonice de frecvență diferită, care se injectează în alte elemente ale circuitului.

Schema echivalentă pentru spectrul de armonici superioare de tensiune se poate prezenta ca un circuit format din surse de tensiune în conexiune în serie. Această conexiune asigură echivalarea tensiunii rezultante cu tensiunea aplicată la elementul neliniar. În cazul conexiunii paralele a acestor surse echivalente armonicilor superioare nu se îndeplinește condiția de echivalență a potențialului în nodul comun de conexiune. Aceasta reiese din faptul, că sursele echivalente au tensiuni electromotoare determinate de amplitudinile spectrului armonicilor superioare, deci, este veridică condiția $U_n \neq U_{n+1}$ etc. Această conexiune ar conduce la apariția curenților de echilibrare prin aceste surse echivalente, care nu există în realitate.

În cazul surselor de curent, schema echivalentă de substituție a elementului neliniar trebuie să fie prezentată de conexiunea lor în paralel, deoarece este necesar ca la conexiunea lor în nodul comun să se îndeplinească prima teoremă Kirchhoff.

Luând în vedere sugestiile expuse mai sus, se pot propune două scheme echivalente (în serie sau în paralel de conexiune ale surselor de generare) în dependență de caracteristica fizică a mărimilor, care formează spectrul cunoscut de armonici superioare. În fig. 2.10 se prezintă posibilele topologii ale schemelor echivalente de substituție ale elementelor neliniare.

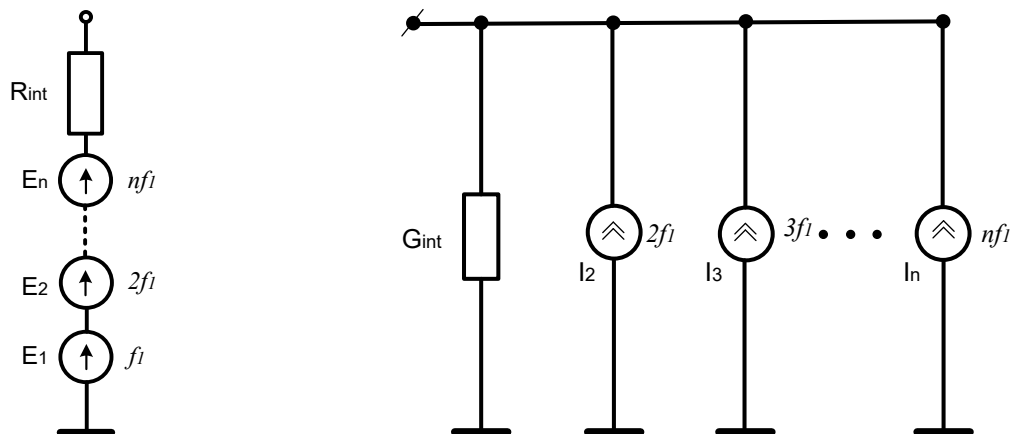


Fig. 2.10. Scheme echivalente a sursei de tensiune și sursei de curent

La elaborarea schemelor echivalente de substituție ale elementelor neliniare cu ansambluri de circuite liniare apare dilemă, ce se referă la dorința de a avea o aproximație cât mai veridică, dar cu o topologie cât se poate de simplificată pentru a optimiza volumul de calcul necesar pentru obținerea soluției finale, care caracterizează regimul rețelei. În acest context se poate apela la relația de calcul a pierderilor de putere de la diferite armonici ale spectrului. În lucrarea [79] se prezintă dependența pierderilor de putere în motorul asincron de la armonicile superioare (fig. 2.11). Ca mărime de bază s-a selectat puterea pierderilor în regim nominal la funcționarea motorului la alimentarea lui de la o sursă de tensiune pur sinusoidală.

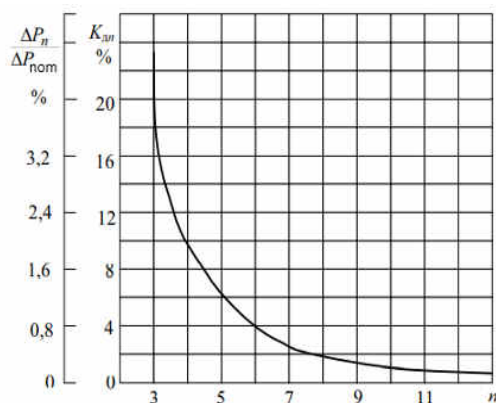


Fig. 2.11. Scheme echivalente a sursei de tensiune și sursei de curent [79]

Din fig. 2.11 reiese, că cu creșterea ordinului armonicilor superioare cota pierderilor se micșorează destul de semnificativ de la o armonică la altă armonică. Această constatare de asemenea se poate utiliza în calitate de argument pentru optimizarea topologiei (micșorarea numărului de elemente în schema echivalentă liniarizată).

Reieșind din fig.2.12 se poate constata, că elementul neliniar după criteriul pierderilor de la armonicilor superioare se poate prezenta cu o schemă echivalentă care include câteva armonici superioare, deoarece impactul celorlalte în pierderile de energie este neglijabil [79].

Schema echivalentă a elementului neliniar. Analiza particularităților caracteristicilor neliniare ale diferitor elemente indică la faptul, că aceste caracteristici se pot prezenta în domeniul de frecvență, deci prin trecerea de la domeniul timp cu semnale de a unei singure frecvență în la domeniul de prezentare cu un ansamblu de frecvență. Realizarea acestui tip de transformări constituie o aproximație a sarcinilor neliniare din domeniul timp în domeniul de frecvență. La ideal, orice caracteristică neliniară din domeniul timp se poate prezenta de un spectru infinit de frecvențe și elemente cu parametri concentrați. Ca în orice mediu, apare problema de formulare a criteriului de estimare a gradului de echivalență a substituirii caracteristicilor în domeniul timp cu ansambluri de armonici ale spectrului de frecvențe, care ar asigura o coincidență satisfăcătoare a descrierii derulării proceselor în ambele topologii ale circuitelor transformate - din domeniul timp în domeniul frecvență.

Posibilitatea liniarizării elementelor neliniare în domeniul timp cu ansambluri de elemente cu parametri concentrați în domeniul frecvență are ca urmare modificarea topologiei schemei echivalente cu majorarea numărului de ramuri ale circuitului prezentate de elemente cu parametri concentrați. Aceste modificări se pot prezenta prin scheme echivalente în care circuitul care absoarbe energia la frecvența fundamentală $f_1 = 50 \text{ Hz}$ se suplimentează cu ramuri paralele, în

care sunt surse de curent alternativ cu frecvența multiplă frecvenței fundamentale $f_n = n f_1$, unde $n = 2, 3, 4, \dots$. Echivalentul elementului neliniar în domeniul de frecvență se prezintă în fig. 2.12.

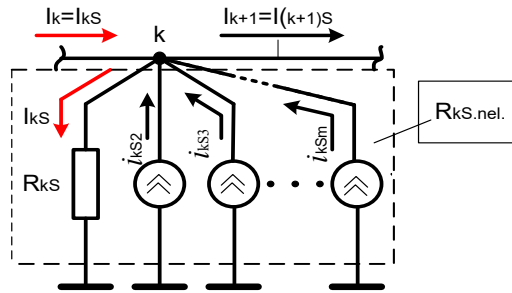


Fig. 2.12. Schema echivalentă a sarcinii neliniare în domeniul de frecvență

Curenții $i_{kS2}, i_{kS3}, \dots, i_{kSm}$ în fig. 2.12 prezintă armonicile superioare începând cu ordinul $n=2$ până la limita de sus, deci, include și armonica de ordinul m , considerată ca armonica de curent cu cea mai ridicată frecvență. Curentul I_{kS} prezintă curentul cu frecvența fundamentală, și, conform notările utilizate pentru metoda curenților de buclă, va prezenta concomitent curentul definit ca curent de buclă. Curentul I_{kS} este o funcție armonică, căruia i se poate atribui atât valoarea instantanee cu frecvența unghiulară ω_1 , cât și valoarea efectivă. Curentul instantaneu se prezintă de relația $i_{kS} = I_{m kS} \sin(\omega_1 t + \varphi_{i kS})$ și este curentul care se scurge prin circuit sub acțiunea surselor de tensiune ale circuitului care are frecvența fundamentală. În particular, acest curent apare la conectarea circuitului la surse de alimentare de la intrarea în linia electrică. În caz, că avem în circuit și SGD, acest curent va prezenta suma tuturor curenților cu frecvența fundamentală generate de sursele de tensiune distribuite ale circuitului examinat, care se scurge prin elementul rezistiv R_{kS} . Urmare a acestei sugestii, se poate considera, că spectrul de armonici superioare generat de un element al circuitului, care are o caracteristică curent-tensiune neliniară $I(U) = f(U)$, iar celelalte parte a circuitului nu va sesiza substituirea elementului neliniar cu componente cu parametri concentrați și surse de tensiune, a căror valori se determină în corespondere cu spectrul de armonici de curent generat de elementul neliniar.

Vom menționa, că analiza influenței armonicilor superioare generate de alte elemente neliniare ale circuitului asupra spectrului de armonici, care se generează în neliniaritatea examinată sub acțiunea curentului sumar, care deja din definiție este o funcție neliniară, se prezintă ca o problemă complexă pentru cercetarea regimului rețelei electrice. La etapa curentă, în lucrare nu se preconizează studierea impactului mutual al armonicilor superioare generate de diferite surse de

armonici superioare de curent asupra spectrului generat de elementele concrete neliniare la regimuri variabile de sarcină.

Vom considera, că pentru armonicile superioare de curent nu se manifestă efectul de neliniaritate în elementele considerate neliniare. Această ipoteză se poate argumenta prin faptul, că armonicile superioare de curent au valoarea magnitudinii mult mai mică ca magnitudinea armonicii fundamentale, și, urmare a acestui fapt, curenții armonicilor superioare parvenite de la alte neliniarități ale circuitului se vor plasa în zona liniară a caracteristicii curent-tensiune a elementului neliniar analizat. Pentru armonicile superioare elementul neliniar se comportă ca un element liniar. Adoptarea acestei ipoteze ne permite aplicarea conceptului de suprapunere (superpoziție) ale soluțiilor particulare obținute pentru semnalele cu frecvență multiplă frecvenței fundamentale la calcularea regimului în circuitul cu elemente neliniare.

Curenții, care constituie componente superioare ale spectrului generat de elementele neliniare, de exemplu, de rezistența neliniară $R_{kS, nel}$, se pot identifica ca semnale armonice de curent alternativ a căror frecvențe sunt multiple frecvenței fundamentale. Acești curenți se prezintă de următoare funcții armonice: $i_{kS2} = I_{mkS2} \sin(2\omega_1 t + \varphi_{ikS2})$, $i_{kS3} = I_{mkS3} \sin(3\omega_1 t + \varphi_{ikS3})$, ..., $i_{kSm} = I_{mkSm} \sin(m\omega_1 t + \varphi_{ikSm})$.

Armonicile superioare $i_{kS2}, i_{kS3}, \dots, i_{kSm}$ sunt generate de curentul de buclă I_{kS} , deci, la prima aproximare se poate considera, că armonicile superioare din spectru sunt produse secundare ale curentului de buclă, care formează un dezechilibru de putere în circuit. Acest dezechilibru se percepe, ca generat de către surse separate de curent, care circulă prin laturile și elementele circuitului analizat.

Deoarece componentele din schema echivalentă fig. 2.13 sunt componente liniare, la calcularea regimului se poate aplica conceptul de superpoziție ale soluțiilor particulare obținute atât pentru cazul calculării regimului, luând în considerare sursele liniare de generare cu frecvența fundamentală, cât și sursele fictive, care sunt un echivalent al impactului armonicilor superioare de curent asupra regimului circuitului.

Urmare a acceptării acestei ipoteze, reiese, că se poate propune un algoritm similar de obținere a soluțiilor particulare pentru toate armonicile fie de tensiune, fie de curent, care au frecvențe diferite de frecvența fundamentală, deci, aplicarea unei platforme comune de realizare a calculului regimului rețelei cu sarcini sau elemente neliniare.

În calitate de platformă comună pentru realizarea calculului regimului circuitului cu elemente neliniare se poate identifica frecvența semnalelor surselor de tensiune și curent.

Aplicarea acestui concept ne permite formularea algoritmului de realizare al calculului regimului, care constă în obținerea soluțiilor particulare în circuitul liniarizat pentru fiecare armonică. Aceasta se face prin identificarea și gruparea surselor de generare și a sarcinilor parcurse de curenții cu aceeași frecvență în ansambluri, care sunt prezentate de surse cu semnale fie tensiune, fie curent cu aceeași frecvență a armonicilor. Elementele care descriu surse sau sarcini a căror frecvențe f_i nu coincid cu frecvența f_k a ansamblului selectat după valoarea frecvenței ($f_i \neq f_k$), se exclud din schema curentă de calcul. Aplicarea a acestui concept, conduce la descompunerea problemei de calcul într-un ansamblu de probleme parțiale liniare, care se grupează după frecvența semnalelor din circuit, care se poate considera că semnalele care pot iniția scurgeri de curent, sau apariția curenților în componentele circuitului ce au frecvența semnalului care le-a generat. Astfel, la calcularea regimului se vor utiliza mai multe topologii ale schemei echivalente, care vor lua în considerare mecanismul apariției armonicilor de curent cu frecvențele respective, care diferă de valoarea frecvenței fundamentale. Soluția finală se obține prin sumarea soluțiilor particulare.

Liniarizarea elementelor neliniare. Valorile parametrilor echivalenți La întocmirea schemei echivalente a rețelei, fie și considerată liniară pentru cazul armonicilor superioare, pot să apară unele dificultăți, ca: cum de prezentat sarcina și cum de prezentat celelalte armonici din spectru; cum de racordat echivalentul ce prezintă armonica de curent cu frecvența f_k la schema echivalentă a circuitului etc., pentru a nu modifica reacția circuitului real la scurgerile curenților cu frecvențe diferite de frecvența fundamentală.

Deja, anterior am formulat conceptul unificării schemelor de calcul după frecvență pentru obținerea soluțiilor particulare. Este necesar de argumentat topologia schemei echivalente la etapa de realizare a calculelor pentru care $f_k \neq f_1$. Pentru acest caz se prezintă faptul, că din schema echivalentă pentru condiția $f_k \neq f_1$ este necesar de exclus toate elementele și ramurile ce au surse de energie (fie curent sau tensiune) a căror frecvențe diferă de frecvența selectată pentru obținerea soluției particulare. Concomitent, este necesar de modificat și topologia elementului neliniar în schema echivalentă de calcul. Această modificare constă în transformarea sursei de curent, care fizic prezintă armonica superioară cu frecvența f_k în sursă de tensiune, care reiese din teorema Thevenin, care indică că orice sursă de curent poate fi înlocuită în mod echivalent cu o sursă de tensiune ideală conectată în serie cu o rezistență sau impedanță, care se definește ca impedanță (rezistență) internă a sursei de tensiune.

Pentru a face această transformare este necesar să cunoaștem rezistența R_{nSk} (G_{nSk}) sau impedanța Z_{nSk} (Y_{nSk}) care este conectată paralel cu sursa de curent, de exemplu, reprezentată de valoarea parametrului determinat pentru armonica superioară cu frecvența f_k . În fig. 2.13 se prezintă convențional această procedură de transformare.

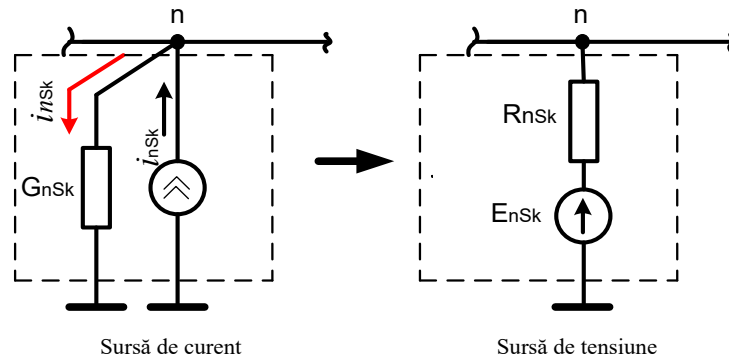


Fig. 2.13. Transformarea sursei de curent cu frecvența f_k în sursă de tensiune

Conform teoremelor Thevenin și Norton rezistența (impedanța) echivalentă internă R_{nSk} a sursei de tensiune este determinată de conductanța activă sau complexă a sursei de curent

$$R_{nSk} = \frac{1}{G_{nSk}}, \text{ deci, în cazul examinat, sursa de curent prezintă curentul cu frecvența } f_k \text{ a spectrului}$$

generat de neliniaritatea conectată la rețeaua de alimentare în nodul n , unde $k = 2, 3, 4, \dots$ - numărul de ordine a frecvenței armonicii superioare de curent în nodul n .

Pentru a avea o informație completă în cazul substituirii sursei de curent cu sursa de tensiune este necesar de cunoscut conductanța laturii paralele G_{nSk} a circuitului. Valoarea acestei conductanțe se determină din parametrii rețelei, deci, urmare a cunoașterii tensiunii fazei și a puterii active sau a puterii aparente a sarcinii conectate la rețea în nodul n :

$$G_{nS1} = \frac{P_{nS1}}{U_{nS1}^2}, \tag{2.13}$$

unde

U_{nS1} - valoarea tensiunii de fază considerată echivalentă cu tensiunea armonicii fundamentale;

P_{nS1} - puterea activă absorbită de sarcina neliniară din rețeaua electrică la frecvența fundamentală.

Vom menționa, că relația (2.13) se poate prezenta și pentru sarcina complexă a căruia echivalent este impedanța Z_{nS} . Pentru sarcina complexă Z_{nS} schema echivalentă a sursei de curent va avea o topologie diferită de schema echivalentă a sarcinii pur active. De obicei, orice sarcină, pentru care nu se prevede compensarea puterii reactive, se caracterizează de factorul de putere $\cos \varphi_{nS}$. Deoarece, în rețelele reale, chiar și sarcinile liniare la frecvența fundamentală au caracterul activ - inductiv, deci, aceste sarcini prezintă o conexiune în serie a rezistenței active și inductivității L_{nSk} . Acest circuit se poate prezenta și de schema echivalentă cu conexiune în paralel a conductanței active G_{nSk} și a inductivității L_{nSk} .

Indiferent de schema echivalentă, puterea aparentă S_{nS} absorbită din rețea va avea două componente: - componenta activă P_{nS} și puterea reactivă Q_{nSL} , deci, $S_{nS} = P_{nS} + jQ_{nSL}$, unde $P_{nS} = S_{nS} \cos \varphi_{nS}$ și $Q_{nSL} = S_{nS} \sin \varphi_{nS}$. Modulul puterii aparente S_{nS} pentru frecvența fundamentală în punctul nodal n se poate determina cu relația similară expresiei (2.13), deci $\dot{S}_{nS} = \frac{\dot{U}_{nS}^2}{Z_{nS}}$.

Cunoașterea valorii factorului de putere $\cos \varphi_{nS}$, a componentei reale a impedanței Z_{nS} se calculează cu relația $R_{nS} = Z_{nS} \cos \varphi_{nS} = \frac{\dot{U}_{nS}^2}{S_{nS}} \cos \varphi_{nS}$, iar inductanța acestei impedanțe L_{nS} se determină cu relația $L_{nS} = \frac{X_{nS}}{\omega_1} = \frac{Z_{nS}}{\omega_1} \sin \varphi_{nS} = \frac{\dot{U}_{nS}^2}{S_{nS} \omega_1} \sin \varphi_{nS}$, unde \dot{U}_{nS} - valoarea complexă a modulului tensiunii de fază în nodul n de racord, S_{nS} - puterea aparentă absorbită de sarcină neliniară la frecvența armonicilor fundamentale, $\cos \varphi_{nS}$ - factorul de putere a sarcinii liniare la frecvența armonicilor fundamentale, $\omega_1 = 2\pi f_1$ - frecvența unghiulară a armonicilor fundamentale.

Cunoașterea parametrilor echivalenței R_{nS} și L_{nS} a sarcinii conectate în punctul nodal n al rețelei ne permite să prezentăm schema echivalentă pentru armonicile superioare de curent, generate de această sarcină neliniară, ca o sursă de tensiune cu impedanța internă Z_{nSk} prezentată de un circuit în serie RL cu parametri concentrați. Pașii de transformare a circuitului real în schemă echivalentă ca sursă de tensiune a armonicilor superioare de curent de ordinul k sunt prezentați în fig. 2.14.

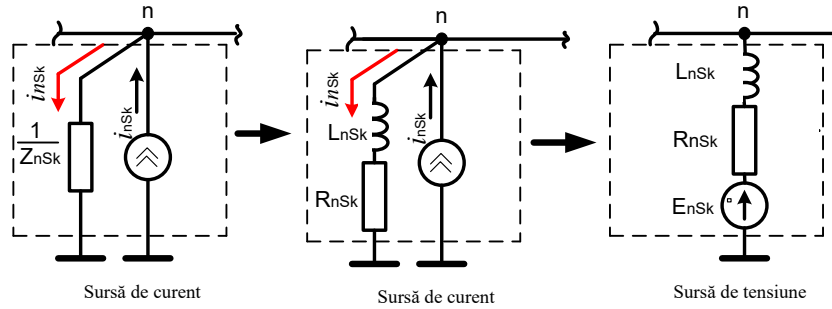


Fig. 2.14. Transformarea sursei de curent cu frecvența f_k în sursă de tensiune impedanță internă

Cunoașterea valorilor parametrilor R_{nS} și/sau a impedanței Z_{nS} , calculate după valorile tensiunii de fază și puterii absorbite la frecvența armonicii fundamentale ne permite să determinăm tensiunea electromotoare a sursei de tensiune ideale ca:

$$E_{nSk} = |I_{nSk}| \cdot |Z_{nSk}|, \quad (2.14)$$

unde $|I_{nSk}|$ – modulul curentului cu frecvența f_{nSk} , deci de ordinul k , care este generat de sarcina neliniară conectată în nodul n a rețelei, $Z_{nSk} = R_{nSk} + jk\omega_1 L_{nSk}$ – impedanța sursei de curent sau sursei de tensiune la frecvența armonicii de curent $\omega_k = k\omega_1$. Modulul impedanței Z_{nSk} se calculează cu relația $Z_{nSk} = \sqrt{R_{nSk}^2 + (k\omega_1 L_{nSk})^2}$.

Această modalitate de substituire a componentelor neliniare cu echivalentul lor prezentat la frecvența armonicilor de curent și apoi transformate în surse de tensiune permite păstrarea topologiei schemei echivalente de calcul și a conceptului algoritmului pentru a obține mai multe soluții particulare pentru fiecare nod al rețelei și calcularea indicilor de calitate a e.e în fiecare nod, deoarece, se cunosc valorile curenților și tensiunilor în aceste noduri pentru fiecare armonică superioară.

Topologia schemelor echivalente la determinarea soluțiilor particulare ale regimului rețelei. În cazul includerii în circuitul rețelei a surselor sau sarcinilor neliniare, schema echivalentă de calcul devine o structură cu topologie variabilă, care este determină de caracterul neliniarității, de numărul de elemente neliniare, precum și de numărul de armonici, preponderent de armonici superioare de curent, care se vor lua în calcul.

În fig. 2.15 se prezintă pașii de transformare a rețelei electrice cu o sarcină neliniară pentru a obține schema echivalentă pentru a calcula regimul în rețeaua electrică la frecvența fundamentală cu care funcționează și sursele de generare distribuită (fig. 2.15a).

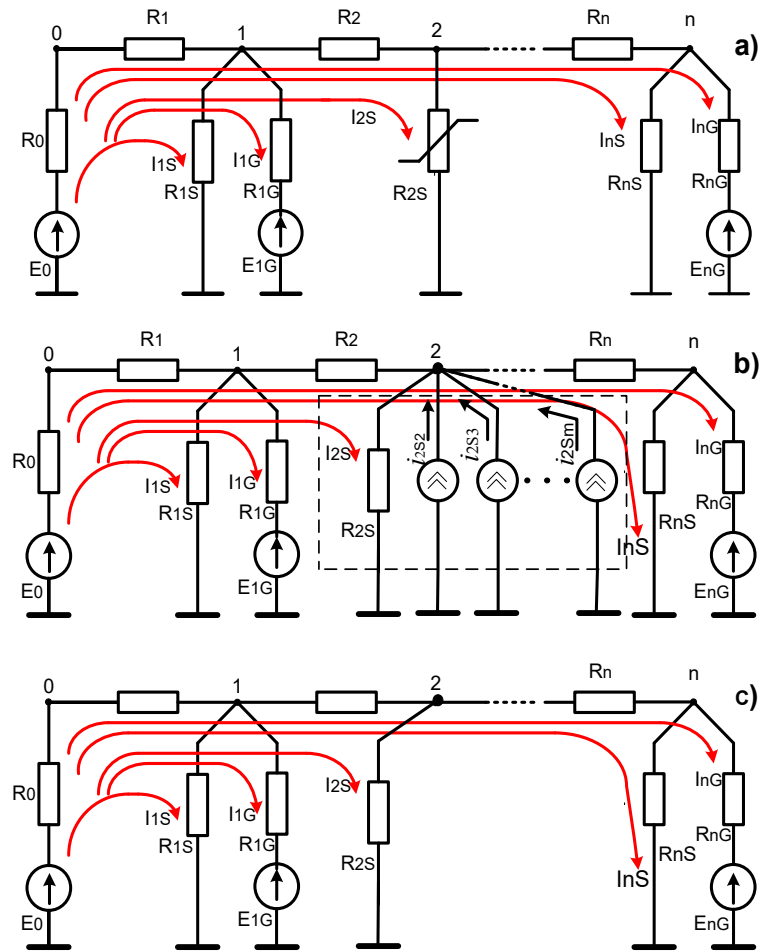


Fig. 2.15. Transformarea schemei echivalente pentru obținerea soluțiilor particulare la frecvența fundamentală în rețeaua cu neliniarități

Valoarea rezistenței $R_{nS} = \frac{1}{G_{nS}}$ se determină în baza relației (2.13) pentru armonica cu

frecvența fundamentală. În calitate de schemă de calcul a soluțiilor particulare se utilizează schema echivalentă a circuitului prezentată în fig. 2.15 c.

Pasul următor constă în întocmirea schemei echivalente de calcul pentru armonica de curent de ordinul k generată de sarcina neliniară conectată în nodul doi ($n = 2$) al rețelei. Deoarece s-a formulat condiția, că soluțiile particulare se obțin pentru fiecare frecvență separată, se prezintă argumentată întocmirea a mai multor scheme echivalente de calcul pentru calcularea curenților de aceeași frecvență.

La întocmirea schemelor echivalente de calcul pentru armonicile superioare există o incertitudine privind determinarea valorilor parametrilor schemei echivalente pentru semnalele cu frecvență ridicată în comparație cu semnalele cu frecvența fundamentală. Problema constă în aceea, că este necesar de determinat doi parametri ai sursei echivalente de tensiune a schemei echivalente, dar pentru aceasta avem doar o singură ecuație, care determină regulile de transformare a sursei

de curent în sursă de tensiune (teorema Thevenin). Pentru a depăși această dificultate se propune de utilizat în calitate de condiție suplimentară echivalarea valorii parametrului (rezistenței active sau componentelor respective a impedanței, preponderent a inductivității L_{nS} la frecvența fundamentală) sarcinii determinată pentru frecvența fundamentală, deci $R_{2S1}(f_1)$ și $L_{2S1}(f_1)$ pentru cazul frecvenței $f_k \neq f_1$. Considerând, că aceste valori se atribuie circuitelor cu frecvențele $f_k \neq f_1$ problema transformării echivalente a sursei de curent în sursă de tensiune se rezolvă cert.

Impedanța conectată paralel cu sursa de curent prezentată de curentul I_{2Sk} cu frecvența f_k se determină din relația $Z_{2Sk}(f_k) = R_{2S1} + j\omega_k L_{kS1}$, care și se utilizează la calcularea parametrilor sursei de tensiune conform teoremei Thevenin. În formularea prezentată, problema se reduce la determinarea valorii tensiunii electromotoare a sursei $\dot{E}_{2Sk} = \dot{I}_{2Sk} Z_{2Sk}(f_k)$, deci \dot{I}_{2Sk} - valoare cunoscută din spectrul armonic, $R_{2Sk} = R_{2S1}$; $L_{2Sk} = L_{2S1}$ - parametrii determinați din valoarea sarcinii conectate la rețea în punctul nodal la frecvența fundamentală $n = 2$. Concomitent, valorile tensiunilor surselor distribuite la frecvența fundamentală li se atribuie valori de zero $E_0 = E_{1G} = E_{2G} = \dots = E_{nG} = 0$. În schemele echivalente, conform metodei de calcul prin suprapunere a soluțiilor (conceptul de superpoziție) este necesar de scurtcircuitat sursele de tensiune electromotoare $E_0, E_{1G}, E_{2G}, \dots, E_{nG}$. În acest caz, curentul prin ramura ce prezintă sursa de generare distribuită se determină de rezistența internă a acestei surse, deci de R_{nG} .

În fig. 2.16 se prezintă schema echivalentă de calcul a regimului particular condiționat de către curentul I_{2Sk} cu frecvență f_k ,

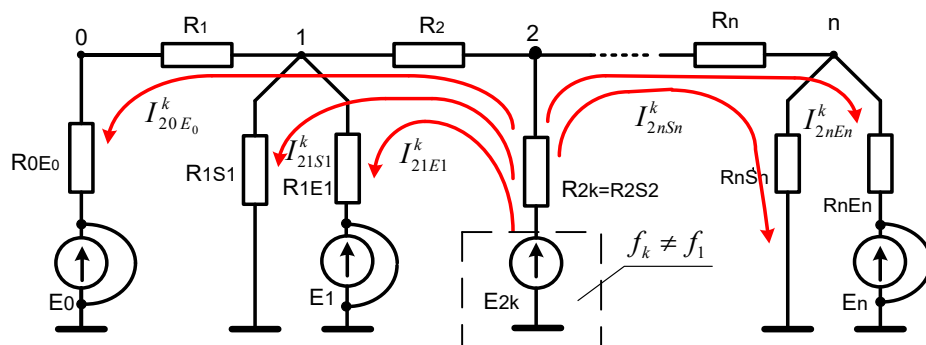


Fig. 2.16. Schema echivalentă de calcul al regimului rețelei la frecvența $f_k \neq f_1$

Pentru a introduce o claritate în prezentarea rezultatelor calculelor soluțiilor particulare privind calcularea curenților provocați de sursa echivalentă de tensiune cu frecvența $f_k \neq f_1$ se propune de utilizat următoarea notare a curenților de buclă generați de armonicile superioare. Ca elemente de bază se propune de utilizat ordinul armonicii superioare pe care îl vom nota prin indicele de sus k . Indicele de jos a curențului de buclă include un ansamblu de elemente care definește topologia circuitului buclei cu indicarea amplasării sursei de energie și scurgerea curențului de buclă prin ramurile transversale. Acest indice generalizat include numărul nodului de conexiune n a sursei de tensiune cu frecvența $f_k \neq f_1$ la rețeaua de alimentare (nodul de injectare a curențului în rețea), numerotarea nodului p prin care curențul de buclă se scurge în ramura transversală conectată la punctul de racord $p \neq n$, indicele caracteristicii ramurii transversale (consum sau generare). În cazul sarcinii vom utiliza notarea prin S , iar cu indicele E_k vom identifica faptul, că aceasta este ramura transversală a circuitului cu sursă de generare la frecvența de ordinul $k=1,2,3, \dots$

Urmare a realizării acestui concept de identificare a curenților de buclă, acești curenți se prezintă de notația următoare: I_{npS}^k – curențul de buclă cu frecvența f_k , unde $k=1, 2, 3$, generat de sursa de tensiune E_{nk} cu frecvența f_k , unde $k=1, 2,3, \dots$, racordată la nodul n . Acest curenț se scurge prin sarcina S_p racordată la nodul p . Similar se notează curențul de buclă I_{npEp}^k , care se închide prin circuitul sursei de tensiune distribuită cu rezistență internă $R_p E_p$ racordată la punctul nodal p .

Curenții de la sursa de tensiune din nodul n se distribuie în stânga și în dreapta de la acest nod de racord al sursei echivalente de tensiune E_{nk} . În fig. 2.16 se prezintă cazul, pentru nodul de racord $n=2$. Astfel, indicele de sus k identifică frecvența semnalului armonic, iar indicii de jos n - identifică punctul de racord al sursei echivalente de tensiune cu frecvența f_k , p – nodul de închidere (scurgere) a curențului din rețea în ramura transversală, S_p – sarcina care absoarbe curențul definit ca curenț de buclă sau circuitul de închidere a curențului de buclă prin sursa de tensiune de la intrarea rețelei sau a sursei distribuite de tensiune, care au frecvența fundamentală.

Utilizând schema echivalentă din fig. 2.16 se pot întocmi ecuațiile echilibrului tensiunii pentru cazul calculării regimului generat de curențul cu frecvența f_k a spectrului armonicilor superioare:

$$\begin{cases} \dot{I}_{20E0}^k \cdot R_{11E0}^k = \dot{E}_{2k}; \\ \dot{I}_{21S1}^k \cdot R_{22S1}^k = \dot{E}_{2k}; \\ \dot{I}_{21E1}^k \cdot R_{22E1}^k = \dot{E}_{2k}; \\ \vdots \\ \dot{I}_{2nSn}^k \cdot R_{nnSn}^k = \dot{E}_{2k}; \\ \dot{I}_{2nEn}^k \cdot R_{nnEn}^k = \dot{E}_{2k}, \end{cases} \quad (2.15)$$

unde

$\dot{I}_{20E0}^k, \dot{I}_{21S1}^k, \dot{I}_{21E1}^k, \dots, \dot{I}_{2nEn}^k$ - curenții de buclă generați de sursa echivalentă de tensiune E_{2k}

cu frecvența f_k ;

$R_{11E0}^k = R_{2k} + R_2 + R_1 + R_{0E0}$ - rezistența (impedanța) circuitului la frecvența f_k prin care

curge curențul de buclă I_{20E0}^k ;

$R_{22S1}^k = R_{2k} + R_2 + R_{1S1}$ - rezistența (impedanța) circuitului la frecvența f_k prin care curge

curențul de buclă I_{21S1}^k ;

$R_{22E1}^k = R_{2k} + R_2 + R_{1E1}$ - rezistența (impedanța) circuitului la frecvența f_k prin care curge

curențul de buclă I_{21E1}^k ;

\vdots

$R_{nnEn}^k = R_{2k} + R_3 + R_4 + \dots + R_{n-1} + R_n + R_{nEn}$ - rezistența (impedanța) circuitului la

frecvența f_k prin care curge curențul de buclă I_{2nEn}^k ;

\dot{E}_{2k} -tensiunea electromotoare echivalentă impactului armonicii superioare de curent cu frecvența f_k asupra celorlalte componente ale circuitului analizat \dot{I}_{1G} .

Deoarece ecuațiile sistemului (2.15) sunt ecuații liniare și independente, valorile curenților de buclă se vor calcula cu utilizarea legii lui Ohm:

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{20E0}^k &= \frac{\dot{E}_k}{R_{11E0}^k}; \\
\dot{I}_{21S1}^k &= \frac{\dot{E}_k}{R_{22S1}^k}; \\
\dot{I}_{21E1}^k &= \frac{\dot{E}_k}{R_{22E1}^k}; \\
&\vdots \\
\dot{I}_{nnEn}^k &= \frac{\dot{E}_k}{R_{nnEn}^k}.
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Căderea tensiunii de la curentul cu frecvența f_k în ramurile transversale parcurse doar de curentul respectiv de buclă se calculează cu relațiile: $U_{pS}^k = \dot{I}_{npSp}^k R_{pSp}$ sau $\dot{U}_{pS}^k = \dot{I}_{npSp}^k R_{pEp}$.

Cunoașterea valorilor parametrilor circuitului echivalent la diferite frecvențe (scenariul, că inductivitățile sarcinilor nu se pot neglija, deci $L_{p-1,p} \neq 0$ și $L_{pS} \neq 0$) nu modifică conceptul propus de calcul al regimului circuitului în comparare scenariul, că operăm cu parametri pur activi. Aceasta doar conduce la o sporire a efortului de realizare a calculului, deoarece se operează cu mărimi complexe. Alte dificultăți nu se prognozează la utilizarea a acestui procedeu de calcul propus.

Utilizând prima teoremă al lui Kirchhoff și valorile cunoscute ale curenților de buclă se pot determina valorile curenților în porțiunile longitudinale ale circuitului prezentate de componentele R_p , unde $p=1,2,3,\dots,n$. De exemplu, curentul de intrare în nodul n prezintă suma a curenților de ieșire din acest nod, deci $\dot{I}_n^k = \dot{I}_{pnEn}^k + \dot{I}_{pnSn}^k$, iar curentul de intrare în nodul $n-1$ se determină din relația $\dot{I}_{n-1}^k = \dot{I}_{p(n-1)S_{n-1}}^k + \dot{I}_{p(n-1)E_{n-1}}^k + \dot{I}_n^k$ etc. După analogie, se determină valorile curentului în porțiunea din stânga a nodului p , începând cu cea mai îndepărtată latură (ramură) transversală de la nodul p , deci $\dot{I}_0^k = \dot{I}_{p0E0}^k$, curentul de intrare în nodul 1 se determina ca $\dot{I}_1^k = \dot{I}_{p0E0}^k + \dot{I}_{p1S1}^k + \dot{I}_{p1E1}^k$ etc.

Cunoașterea valorilor curenților în porțiunile longitudinale ne permite calcularea căderii tensiunii pe aceste porțiuni, deci, căderea de tensiune pe porțiunea dintre nodul $n-1$ și nodul n se calculează cu relația $\dot{U}_{n-1,n}^k = \dot{I}_n^k R_n$, iar în porțiunea $(n-2)$, $(n-1)$ cu relația $\dot{U}_{n-2,n-1}^k = \dot{I}_{n-1}^k R_{n-1}$, etc. Pentru porțiunea din stânga nodului căderile de tensiune se vor calcula după același concept, dar se ia în vedere acea particularitate, că la începutul linii se conectează sursa de alimentare cu

frecvența f_1 . Pentru semnalele cu frecvența f_k , căderea de tensiune pe porțiunea 0 - 1 cu rezistența R_1 și această tensiune se determină din relația $\dot{U}_{0,1}^k = \dot{I}_0^k R_1$, pentru porțiunea dintre nodurile 1 și 2 cu formula $\dot{U}_{1,2}^k = \dot{I}_1^k R_2$ etc.

Deoarece, am acceptat ipoteza de liniaritate a schemei echivalente, reiese veridicitatea aplicării conceptului de superpoziție pentru circuitul liniarizat. Cunoașterea spectrului curenților și a tensiunilor valorilor obținute prin calcul ne permite estimarea valorilor indicilor de calitate a e.e în nodurile schemei echivalente a circuitului, calcularea valorile coeficienților de distorsiune a curentului și tensiunii, inclusiv, și profilul tensiunii în circuit, care se prezintă de asemenea ca un indicator al calității e.e.

2.3. Aplicarea procedurii pentru calculul regimului circuitului cu parametri complecși

Calculul regimului circuitului de curent alternativ se confruntă cu faptul, că parametrii lui echivalenți sunt prezentați de mărimi complexe. Vom examina aplicabilitate metodei curentului de buclă cu utilizarea algoritmului propus la calcularea regimului circuitului cu mărimi complexe.

Fie că, avem un circuit, care include mărimi complexe, inclusiv și rezistențele interne ale surselor de tensiune sunt impedanțe. În fig. 2.17 se prezintă schema echivalentă a unui astfel de circuit.

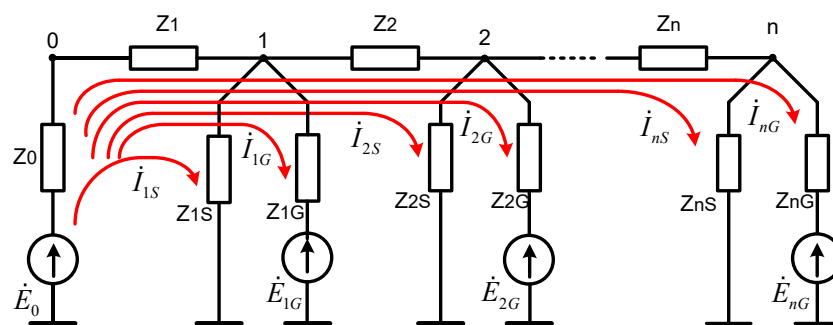


Fig. 2.17. Schema echivalentă a circuitului cu sarcini și surse distribuite de energie prezentate ca mărimi complexe

Impedanțele circuitului de buclă vor fi egale: $Z_{11} = Z_0 + Z_1 + Z_{1S}$; $Z_{22} = Z_0 + Z_1 + Z_{1G}$;

$$Z_{33} = Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_{2S}; \quad Z_{44} = Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_{2G}; \quad Z_{n-1,n-1} = Z_0 + Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n + Z_{nS};$$

$$Z_{nn} = Z_0 + Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n + Z_{nG}.$$

Echilibrul tensiunilor în circuitul fig. 2.17:

$$\begin{cases} \dot{I}_{1S} \cdot Z_{11} = \dot{E}_0; \\ \dot{I}_{1G} \cdot Z_{22} = \dot{E}_0 - \dot{E}_{1G}; \\ \dot{I}_{2S} \cdot Z_{33} = \dot{E}_0; \\ \dot{I}_{2G} \cdot Z_{44} = \dot{E}_0 - \dot{E}_{2G}; \\ \vdots \\ \dot{I}_{nS} \cdot Z_{n-1,n-1} = \dot{E}_0; \\ \dot{I}_{nG} \cdot Z_{nn} = \dot{E}_0 - \dot{E}_{nG}. \end{cases} \quad (2.17)$$

Valorile complexe ale curenților de buclă se calculează utilizând teorema Ohm:

$$\dot{I}_{kS} = \frac{\dot{E}_0}{Z_{k-1,k-1}} \quad \text{și} \quad \dot{I}_{kG} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{E}_{kG}}{Z_{kk}}.$$

Porțiunile longitudinale ale circuitului sunt impedanțe cu caracter activ-inductiv, valorile cărora depind de valorile parametrilor liniari R_0 și L_0 și lungimea porțiunii liniei dintre două puncte nodale ale circuitului. Impedanța internă Z_{E0} a sursei de asemenea este formată din rezistența activă R_{E0} și inductivitatea L_{E0} .

Pentru cazul examinării regimului în circuitul cu parametri complecși ai rețelei impedanțele longitudinale se poate de notat ca $Z_k = R_k + j\omega L_k$, impedanța sarcinilor $Z_{kS} = R_{kS} + j\omega L_{kS}$, impedanța internă a sarcinilor surselor distribuite de energie $Z_{kG} = R_{kG} + j\omega L_{kG}$, tensiunea electromotoare a sursei de la intrare a rețelei se prezintă de funcția $e_0 = E_{m0} \sin(\omega t + \varphi_0)$, tensiunile electromotoare ale surselor de generare distribuită $e_{kG} = E_{mkG} \sin(\omega t + \varphi_{kG})$.

Pentru simplificare vom considera, că fazele inițiale ale tensiunilor surselor de generare sunt nule, deci, pentru toate sursele de tensiune conectate la rețeaua de alimentare se îndeplinește condiția $\varphi_0 = \varphi_{kG} = 0$, $k = 1, 2, 3, \dots, n$. această înseamnă că sursele de tensiune principale și distribuite funcționează în regim sincron.

Luând în considerare notările utilizate pentru parametrii circuitului, impedanțele buclelor se vor calcula ca suma componentelor active și reactive cu conexiune în serie pentru porțiunile circuitului dintre punctele nodale (porțiuni longitudinale) și porțiuni transversale:

$$\begin{aligned}
Z_{11} &= (r_{E0} + R_1 + R_{1S}) + j\omega(L_{E0} + L_1 + L_{1S}) = R_{11} + j\omega L_{11S}; \\
Z_{22} &= (r_{E0} + R_1 + R_{1G}) + j\omega(L_{E0} + L_1 + L_{1G}) = R_{22} + j\omega L_{22G}; \\
Z_{33} &= (r_{E0} + R_1 + R_2 + R_{2S}) + j\omega(L_{E0} + L_1 + L_2 + L_{2S}) = R_{33} + j\omega L_{33S}; \\
Z_{44} &= (r_{E0} + R_1 + R_2 + R_{2G}) + j\omega(L_{E0} + L_1 + L_2 + L_{2G}) = R_{44} + j\omega L_{44S}; \\
Z_{n-1,n-1} &= \left(r_{E0} + \sum_{k=1}^n R_k + R_{nS} \right) + j\omega \left(L_{E0} + \sum_{k=1}^n L_k + L_{nS} \right) = R_{(n-1)(n-1)} + j\omega L_{(n-1)(n-1)S}; \\
Z_{nn} &= \left(r_{E0} + \sum_{k=1}^n R_k + R_{nG} \right) + j\omega \left(L_{E0} + \sum_{k=1}^n L_k + L_{nG} \right) = R_{nn} + j\omega L_{nnG}.
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Relațiile (2.18) se referă la regimul simetric în rețeaua trifazată. În caz că în rețeaua electrică apare un dezechilibru al curenților de fază, ce se manifestă prin apariția curentului în conductorul nul al rețelei este necesar de luat în vedere acest fenomen la calculul regimului cu aplicarea schemelor echivalente monofilare. Pentru aceasta este necesar de luat în vedere impactul scurgerii curentului de dezechilibru prin conductorul nul, care are rezistența activă R_{kN} și inductanța L_{kN} a porțiunii conductorului nul prin care se scurge curentul de dezechilibru.

Vom considera, că apariția curentului de dezechilibru în conductorul nul este urmare a apariției dezechilibrului între valorile sarcinilor conectate la nodul k al rețelei. În caz de circuit trifazat, considerăm că acest dezechilibru este condiționat de o sarcină a fazei. Urmare a acestui fenomen, la întocmirea schemei echivalente monofilare este necesar de luat în vedere această particularitate a regimului circuitului trifazat. Fizic, această particularitate se manifestă prin căderea de tensiune în conductorul de la curentul și pierderile de putere proporționale valorii pătrate ale curentului de dezechilibru. Deoarece dezechilibru este condiționat cel mai frecvent de regimul într-o singură fază, vom atribui aceste pierderi numai fazei în care a apărut regimul nesimetric. În celelalte două faze vom considera, că la aplicarea metodei curenților de buclă nu au pierderi în conductorul nul și schemele lor echivalente vor corespunde regimului simetric, deci fără pierderi în conductorul nul. Pentru aceste scheme monofilare vom considera rezistența activă a conductorului nul este egală cu zero. Aceasta este o urmare a egalității banale $I_N^2 R_N = 0$, deci nu este important pentru această relație care parametru are valoarea zero - curentul $I_N = 0$, sau rezistența $R_N = 0$.

Schema echivalentă de calcul a fazei care este cauza apariției curentului de dezechilibru în conductorul nul este necesar de adaptat la procesul fizic ce are loc în acest circuit monofilar, reieșind din echilibrarea pierderilor de energie. În schemele echivalente monofilare conductorul nul se considera ca parte a fazei respective a liniei trifazate, în care a ap[arut] curentul de dezechilibru. Urmare a acestui fapt, parametrii echivalenți ai conductorului nul trebuie determinați în baza pierderilor de energie care au loc la scurgerea curentului sumar al fazelor A, B, C prin acest conductor, deci, reieșind din prima teoremă a lui Kirchhoff: $\dot{I}_{kN} = \dot{I}_{kA} + \dot{I}_{kB} + \dot{I}_{kC}$.

În caz că în circuit apare un curent de dezechilibru condiționat de sarcinile racordate la rețeaua de alimentare, vom avea că $I_{kN} \neq 0$ și apare necesitatea de a introduce corecții în parametrii schemei monofilare a fazei respective, deci, este necesar să modificăm parametrii buclei nodului k prin introducerea inductivității L_{kN} .

Valoarea acestei inductivități se calculează cu relația $L_{kN} = L_{0N} \cdot l_{0k}$, unde L_{0N} – valoarea inductanței liniare a conductorului nul, l_{0k} – lungimea porțiunii conductorului nulului dintre nodul notat „0” și nodul notat „k”.

Valoarea rezistenței active a porțiunii conductorului nulului se calculează cu relația $R_{kN} = \rho \frac{l_{0k}}{S_N}$, unde ρ – rezistența specifică a materialului conductorului nulului, S_N – aria secțiunii transversale și l_{0k} – lungimea fizică a porțiunii.

În schema echivalentă monofilară este necesar de introdus valori echivalente ale parametrilor condiționați de scurgerea curentului prin nul. Deoarece considerăm, că inductivitatea nulului este prezentată de o inductanță fără pierderi, impactul ei asupra regimului se manifesta prin căderea de tensiune pe acest element reactiv.

Pentru curentul $I_{kN} \neq 0$ în circuitul trifazat vom avea valoarea modului căderii tensiunii pe această inductanță egală cu $|U_{kN}^L| = |I_{kN}| \cdot \omega_1 L_{kN}$. Întru asigurarea similitudinii impactului curentului de dezechilibru în neutrul rețelei trifazate vom formula condiția, că modulul căderii tensiunii în neutru de la scurgerea curentului de buclă $|U_{kN}^L| = |I_k| \cdot \omega_1 L_{kN}^{ech}$, deci $|I_{kN}| \cdot \omega_1 L_{kN} = |I_k| \cdot \omega_1 L_{kN}^{ech}$. Din ultima relație reiese, că valoarea echivalentă a inductivității porțiunii conductorului nulului în schema echivalentă monofilară raportată la o fază se calculează din relația:

$$I_{kN}^{ech} = \frac{1}{3} L_{kN} \frac{|I_{kN}|}{|I_k|}. \quad (2.19)$$

Determinarea echivalentului rezistenței active condiționată de parametrii conductorului nul este necesar de efectuat după criteriul pierderi constante în conductorul nul $P_{IkN} = I_{kN}^2 R_{kN}$ și $P_{Ik} = I_k^2 R_{kN}^{ech}$. Deoarece noi avem trei faze, considerăm că aceste pierderi se distribuie proporțional între fazele circuitului trifazat, iar valoarea echivalentă R_{kN}^{ech} se determină din relația:

$$R_{kN}^{ech} = \frac{1}{3} R_{kN} \frac{I_{kN}^2}{I_k^2} \quad (2.20)$$

Valorile impedanțelor de buclă ale circuitului monofilar în regim dezechilibrat al curenților de fază în circuitul trifazat se vor determina de următoarele relații, care au în vedere impactul scurgerii curentului de dezechilibru prin conductorul nul:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= (r_{E0} + R_1 + R_{1S} + R_{1N}^{ech}) + j\omega(L_{E0} + L_1 + L_{1S} + L_{1N}^{ech}) = R_{11} + j\omega L_{11S}; \\ Z_{22} &= (r_{E0} + R_1 + R_{1G} + R_{1N}^{ech}) + j\omega(L_{E0} + L_1 + L_{1G} + L_{1N}^{ech}) = R_{22} + j\omega L_{22G}; \\ Z_{33} &= (r_{E0} + R_1 + R_2 + R_{2S} + R_{2N}^{ech}) + j\omega(L_{E0} + L_1 + L_2 + L_{2S} + L_{2N}^{ech}) = R_{33} + j\omega L_{33S}; \\ Z_{44} &= (r_{E0} + R_1 + R_2 + R_{2G} + R_{2N}^{ech}) + j\omega(L_{E0} + L_1 + L_2 + L_{2G} + L_{2N}^{ech}) = R_{44} + j\omega L_{44S}; \\ &\dots \\ Z_{n-1,n-1} &= \left(r_{E0} + \sum_{k=1}^n R_k + R_{nS} + R_{nN}^{ech} \right) + j\omega \left(L_{E0} + \sum_{k=1}^n L_k + L_{nS} + L_{nN}^{ech} \right) = R_{(n-1)(n-1)} + j\omega L_{(n-1)(n-1)S}; \\ Z_{nn} &= \left(r_{E0} + \sum_{k=1}^n R_k + R_{nG} + R_{nN}^{ech} \right) + j\omega \left(L_{E0} + \sum_{k=1}^n L_k + L_{nG} + L_{nN}^{ech} \right) = R_{nn} + j\omega L_{nnG}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Metodologia de calculul a regimului tranzitoriu. Procedeu aplicat pentru calcularea regimului permanent este robust și în cazul determinării caracteristicilor regimului tranzitoriu în circuitul rețelei cu sarcini și surse de generare distribuite. Vom menționa, că procedeu de aplicare a metodei curenților de buclă este robust atât pentru cazul examinării regimului rețelele cu topologie arborescentă simplă, cât și pentru rețelele cu topologie arborescentă, indiferent în ce ramificații sunt conectate sursele de generare distribuită. Procedeu elaborat este robust și în cazul examinării proceselor tranzitorii în rețelele electrice cu diferită topologie, inclusiv, cu topologie variabilă.

Calcularea funcțiilor imagine a curenților și tensiunilor rețelei în regim tranzitoriu. Pentru toate scenariile de analiză a regimului rețelei electrice cu sarcini și surse distribuite este necesar de definit valorile complete ale impedanțelor longitudinale și transversale în porțiunile circuitelor dintre punctele nodale megieșe. Vom menționa, că în rețelele de joasă tensiune impedanțele longitudinale au caracter activ-inductiv $R_k L_k$. Sarcinile distribuite Z_{kS} și impedanțele interne Z_{kG} ale surselor de generare de asemenea se pot prezenta cu circuite de tipul $R_{ks} L_{ks}$ (pentru sarcini) și $R_{kG} L_{kG}$ (pentru surse), unde prin k se notează nodul de racord al sarcinilor și surselor la rețea.

Vom indica la următoarea particularitate de întocmire a schemei echivalente de calcul a rețelei de joasă tensiune. În aceste rețele de joasă tensiune capacitățile liniare a rețelelor aeriene influențează slab asupra regimului permanent și ele se neglijează în calculele. Aceste capacități liniare au valori mai mari în liniile în cablu și din aceste considerente, în condiții prestabilite, pot influența asupra regimului permanent.

În cazul regimurilor netaționare aceste capacități influențează asupra derulării proceselor de tranziție și din aceste considerente ele trebuie introduse în schemele de calcul. Capacitățile liniei electrice se pot prezenta ca condensatoare a căror capacitate se determină din relația $C_k = C_0(l_k - l_{k-1})$ cu racordarea lor în nodul k al rețelei electrice ca element cu parametri concentrați. Vom mai menționa și faptul, că capacitățile conectate la linia electrică pot fi instalațiile de compensare a puterii reactive cu valoarea capacității $C_{k.comp}$, de exemplu, conectate în paralel cu sarcina Z_{kS} pentru a majora factorul de putere a acestei sarcini.

Pentru acest caz schema echivalentă se poate prezenta astfel (fig. 2. 18):

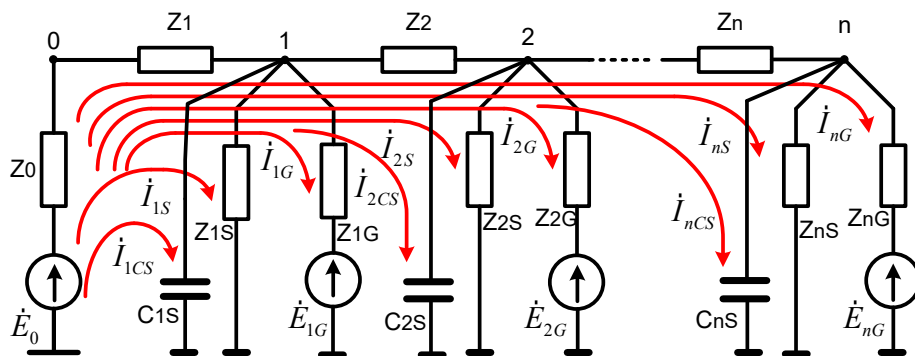


Fig. 2.18. Schema echivalentă a circuitului cu sarcini, surse și capacități distribuite

Suplimentarea circuitului cu laturi ce prezintă capacitățile liniei sau a instalațiilor de compensare a factorului de putere a sarcinilor, conduce doar la majorarea respectivă a numărului de bucle de curent. Pentru cazul cercetării proceselor rapide în circuit este necesar de prezentat echilibrul tensiunilor instantanee în circuit. Urmare a acestui fapt, este necesar de prezentat acest echilibru prin ecuații integro-diferențiale (2.22), ce reiese din schema echivalentă a circuitului (fig. 2.19). Pentru aceasta, vom utiliza notările impedanțelor porțiunilor de circuit prin componente RLC: impedanțele longitudinale notate ca $Z_k = f(R_k, L_k)$, $Z_{kS} = f(R_{kS}, L_{kS})$, $Z_{kG} = f(R_{kG}, L_{kG})$, $Z_{kS} = f(C_{kS})$. Impedanța elementelor capacitive este determinată de capacități ideale, deoarece pierderile dielectrice în aceste elemente în comparație cu pierderile în rețele, transformatoare, surse sunt extrem de mici. Tensiunea electromotoare a sursei la intrarea rețelei se prezintă de funcția $e_0 = E_{m0} \sin(\omega t + \varphi_0)$ – tensiunile electromotoare ale surselor de generare distribuită $e_{kG} = E_{mkG} \sin(\omega t + \varphi_{kG})$. Vom considera pentru simplitate că se îndeplinește condiția $\varphi_0 = \varphi_{kG} = 0$, $k = 1, 2, 3, \dots, n$.

Luând în considerare aceste notări ale elementelor circuitului rețelei se obține sistemul de ecuații integro-diferențiale pentru buclele evidențiate ale circuitului:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 (R_0 + R_1)i_{1CS} + \frac{1}{C_{1S}} \int_0^t i_{1CS} d\tau = e_0(t) \\
 (R_0 + R_1 + R_{1S})i_{1S} + (L_0 + L_1 + L_{1S}) \frac{di_{1S}}{dt} = e_0(t); \\
 (R_0 + R_1 + R_{1G})i_{1G} + (L_0 + L_1 + L_{1G}) \frac{di_{1G}}{dt} = e_0(t) - e_{1G}(t); \\
 (R_0 + R_1 + R_2)i_{2S} + \frac{1}{C_{2S}} \int_0^t i_{2CS} d\tau = e_0(t); \\
 (R_0 + R_1 + R_2 + R_{2S})i_{2S} + (L_0 + L_1 + L_2 + L_{2S}) \frac{di_{2S}}{dt} = e_0(t); \\
 (R_0 + R_1 + R_2 + R_{2G})i_{2G} + (L_0 + L_1 + L_2 + L_{2G}) \frac{di_{2G}}{dt} = e_0(t) - e_{2G}(t); \\
 \vdots \\
 (R_0 + \sum_{k=1}^n R_k)i_{nCS} + \frac{1}{C_{nS}} \int_0^t i_{nCS} d\tau = e_0(t); \\
 (R_0 + \sum_{k=1}^n R_k + R_{nS})i_{nS} + (L_0 + \sum_{k=1}^n L_k + L_{nS}) \frac{di_{nS}}{dt} = e_0(t); \\
 (R_0 + \sum_{k=1}^n R_k + R_{nG})i_{nG} + (L_0 + \sum_{k=1}^n L_k + L_{nG}) \frac{di_{nG}}{dt} = e_0(t) - e_{nG}(t).
 \end{array} \right. \quad (2.22)$$

Utilizând noțiunea de funcție original și funcție imagine obținem:

$i_{kCS}(t) \mapsto I_{kCS}(p)$; $i_{kS}(t) \mapsto I_{kS}(p)$; $i_{kG}(t) \mapsto I_{kG}(p)$; $e_0(t) \mapsto E_0(p)$; $e_{kG}(t) \mapsto E_{kG}(p)$, unde

$k = 1, 2, \dots, n$, iar $\frac{1}{C_{kS}} \int_0^t i_{kCS} d\tau \mapsto \frac{1}{pC_{kS}} I_{kCS}(p)$, $(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mS}) \frac{di_{mS}}{dt} \mapsto p(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mS}) I_{mS}(p)$,

$(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mG}) \frac{di_{mG}}{dt} \mapsto p(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mG}) I_{mG}(p)$, unde $1 \leq m \leq n$.

Pentru funcția original a tensiunii electromotoare instantanee $e(t)$ prezentată de funcția armonică are imaginea următoare: $e(t) \mapsto E_m \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$.

În caz că funcția tensiunii electromotoare este prezentată de o funcție sinusoidală $e(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi_0)$, pentru $\varphi_0 \neq 0$ se prezintă de următoare funcție imagine:

$e(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi_0) \mapsto E_m \frac{p \sin \varphi_0 + \omega \cos \varphi_0}{p^2 + \omega^2}$. După analogie, funcția de timp prezentată de

funcția armonică cosinus are funcția imagine $e(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi_0) \mapsto E_m \frac{p \cos \varphi_0 - \omega \sin \varphi_0}{p^2 + \omega^2}$.

La aplicarea altor funcții de timp la intrarea în rețea este necesară transformarea lor în funcție imagine cu aplicarea transformatei Laplace pentru transformarea ecuațiilor diferențiale a echilibrului tensiunilor instantanee în funcții imagine, deci $U(p) = \int_0^{\infty} u(t) \cdot e^{-pt} dt$, unde

$$p = s + j\omega.$$

Astfel am definit forma prezentării ca funcții imagine a principalelor funcții a ecuațiilor diferențiale care descriu echilibrul tensiunilor în termeni de semnale instantanee- tensiune și curent.

Substituind variabilele original cu funcțiile imagine în ecuația (2.23) obținem sistemul de ecuații algebrice:

$$\left\{ \begin{array}{l}
I_{1CS}(p) \left[(R_0 + R_1) + \frac{1}{pC_{1S}} \right] = E_0(p); \\
I_{1S}(p) [(R_0 + R_1 + R_{1S}) + p(L_0 + L_1 + L_{1S})] = E_0(p); \\
I_{1G}(p) [(R_0 + R_1 + R_{1G}) + p(L_0 + L_1 + L_{1G})] = E_0(p) - E_{1G}(p); \\
I_{2CS}(p) \left[(R_0 + R_1 + R_2) + \frac{1}{pC_{2S}} \right] = E_0(p); \\
I_{2S}(p) [(R_0 + R_1 + R_2 + R_{2S}) + p(L_0 + L_1 + L_2 + L_{2S})] = E_0(p); \\
I_{2G}(p) [(R_0 + R_1 + R_2 + R_{2G}) + p(L_0 + L_1 + L_2 + L_{2G})] = E_0(p) - E_{2G}(p); \\
\vdots \\
I_{nCS}(p) \left[(R_0 + \sum_{k=1}^n R_k) + \frac{1}{pC_{nS}} \right] = E_0(p); \\
I_{nS}(p) \left[(R_0 + \sum_{k=1}^n R_k + R_{nS}) + p(L_0 + \sum_{k=1}^n L_k + L_{nS}) \right] = E_0(p); \\
I_{nG}(p) \left[(R_0 + \sum_{k=1}^n R_k + R_{nG}) + p(L_0 + \sum_{k=1}^n L_k + L_{nG}) \right] = E_0(p) - E_{nG}(p).
\end{array} \right. \quad (2.23)$$

Din sistemul de ecuații se pot calcula valorile curentului prezentat de funcții imagine. Se pot desemna trei tipuri de ecuații de calcul a funcției imagine a curenților pentru circuitul examinat:

$$\left\{ \begin{array}{l}
I_{mCS}(p) = \frac{E_0(p)}{\left[(R_0 + \sum_{k=1}^m R_k) + \frac{1}{pC_{mS}} \right]} = \frac{Q_{ImCS}(p)}{D_{ImCS}(p)}; \\
I_{mS}(p) = \frac{E_0(p)}{\left[(R_0 + \sum_{k=1}^m R_k + R_{mS}) + p(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mS}) \right]} = \frac{Q_{ImS}(p)}{D_{ImS}(p)}; \\
I_{mG}(p) = \frac{E_0(p) - E_{1G}(p)}{\left[(R_0 + \sum_{k=1}^m R_k + R_{mG}) + p(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mG}) \right]} = \frac{Q_{ImG}(p)}{D_{ImG}(p)}.
\end{array} \right. \quad (2.24)$$

La cunoașterea funcției imagine a curenților de buclă se pot calcula funcțiile imagine a căderii tensiunii pe laturile transversale pasive și active. Valorile operaționale ale parametrilor laturilor transversale se determină de relațiile:

$$Z_{mCS}(p) = \frac{1}{pC_{mCS}}; \quad Z_{mS}(p) = R_{mS} + pL_{mS}; \quad Z_{mG}(p) = R_{mG} + pL_{mG}.$$

Impedanțele operaționale ale porțiunilor longitudinale plasate între două noduri $m-1$, m se determină cu relația: $Z_{m-1,m}(p) = R_{m-1,m} + pL_{m-1,m}$.

Valorile căderii tensiunii operaționale pe porțiunile transversale ale rețelei se calculează cu utilizarea valorilor operaționale (imagine) ale curenților de buclă. Ecuațiile de calcul ale valorilor operaționale a funcției imagine a căderii tensiunii pe laturile transversale au următoarea structură:

$$\begin{aligned}
 U_{mCS}(p) &= I_{mCS}(p) \cdot Z_{mCS}(p) = \frac{E_0(p) \cdot Z_{mCS}(p)}{\left[(R_0 + \sum_{k=1}^m R_k) + p(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k) + \frac{1}{pC_{mS}} \right]}; \\
 U_{mS}(p) &= I_{mS}(p) \cdot Z_{mS}(p) = \frac{E_0(p) \cdot Z_{mS}}{\left[(R_0 + \sum_{k=1}^m R_k + R_{mS}) + p(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mS}) \right]}; \\
 U_{mG}(p) &= I_{mG}(p) \cdot Z_{mG}(p) + E_{mG}(p) = \frac{[E_0(p) - E_{mG}(p)] \cdot Z_{mG}(p)}{\left[(R_0 + \sum_{k=1}^m R_k + R_{mG}) + p(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mG}) \right]} + E_{mG}(p).
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Ecuațiile (2.25) se pot prezenta ca raportul a două polinoame. Vom menționa, că aceste polinoame vor avea o structură mai complexă ca cele din sistemul de ecuații (2.22). Primele două ecuații ale sistemului (2.25) sunt similare cu structura ecuațiilor din (2.22), iar în ecuația a treia raportul polinoamelor are o structură mult mai complexă ca polinoamele din sistemul de ecuații (2.24):

$$\begin{aligned}
 U_{mCS}(p) &= \frac{E_0(p) \cdot Z_{mCS}(p)}{R_0 + \sum_{k=1}^m R_k + p(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k) + \frac{1}{pC_{mS}}} = \frac{Q_{UmCS}(p)}{D_{UmCS}(p)}; \\
 U_{mS}(p) &= \frac{E_0(p) \cdot Z_{mS}(p)}{R_0(p) + \sum_{k=1}^m R_k(p) + R_{mS}(p) + p\left(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mS}\right)} = \frac{Q_{UmS}(p)}{D_{UmS}(p)}; \\
 U_{mG}(p) &= \frac{[E_0(p) \cdot Z_{mG}(p)] + E_{mG}(p) \left\{ \left[(R_0 + \sum_{k=1}^m R_k + R_{mG}) + p(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mG}) \right] - Z_{mG}(p) \right\}}{\left[(R_0 + \sum_{k=1}^m R_k + R_{mG}) + p(L_0 + \sum_{k=1}^m L_k + L_{mG}) \right]} = \frac{Q_{UmG}(p)}{D_{UmG}(p)}.
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Pe baza valorilor operaționale ale tensiunii în punctele nodale, calculate cu relațiile (2.26), se pot construi profilurile tensiunii pe lungimea rețelei electrice.

Pentru a calcula valorile operaționale ale căderii tensiunii pe porțiunile longitudinale dintre două puncte nodale la care se racordează sarcinile și SGD este necesar de determinat valorile operaționale ale curenților de buclă prin această porțiune longitudinală. Pentru aceste porțiuni este necesar de apelat la prima teoremă a lui Kirchhoff. Procedura de sumare a curenților începe de la nodul n . Curentul în porțiunea dintre nodul $n-1$ și n se prezintă ca suma

$I_{n-1,n}(p) = I_{nCS}(p) + I_{nS}(p) + I_{nG}(p)$. Curentul operațional în porțiunea dintre nodurile $n-2$ și $n-1$

se calculează ca suma $I_{n-2,n-1}(p) = I_{nCS}(p) + I_{(n-1)CS}(p) + I_{nS}(p) + I_{(n-1)S}(p) + I_{nG}(p) + I_{(n-1)G}(p)$.

Astfel se calculează curentul în celelalte porțiuni transversale. Din ultima relație reiese algoritmul de calcul a funcției imagine a curentului prin porțiunea longitudinală ca suma a trei grupe de funcții imagine ce prezintă circuitul cu capacitatea C , circuitul transversal RL a sarcinii și circuitului cu sursa de generare distribuită E_G .

Prima grupă este formată din funcțiile imagine a curenților care se scurg prin capacitățile conectate la nodul rețelei, a doua grupă este prezentată de curenții care se scurg prin sarcini și grupa a treia este prezentată de curenții ramurilor transversale cu surse de generare prezentate în schema echivalentă de surse de tensiune cu impedanță internă. De exemplu, curentul prezentat de funcția imagine $I_{(m-1)m}(p)$ în porțiunea longitudinală dintre nodurile rețelei $m-1$ și m se calculează

cu relația $I_{(m-1)m}(p) = \sum_{k=m}^n I_{kCS}(p) + \sum_{k=m}^n I_{kS}(p) + \sum_{k=m}^n I_{kG}(p)$, unde $\sum_{k=m}^n I_{kCS}(p)$ – componenta imagine

capacitivă a curentului în porțiunea din dreapta a nodului m , $\sum_{k=m}^n I_{kCS}(p)$ – componenta

operațională (funcția imagine) a curentului prin sarcinile RL din porțiunea de circuit din dreapta

nodului m , $\sum_{k=m}^n I_{kG}(p)$ – componenta operațională (funcția imagine) a curentului prin ramurile

transversale formate de sursele de generare distribuită amplasate în dreapta de nodul m .

Cunoașterea valorilor operaționale (funcțiile imagine) ale curenților în porțiunile dintre două noduri notate ca $m-1$ și m în porțiunile transversale permite determinarea valorilor operaționale (imagine) ale căderii tensiunii pe porțiunile transversale plasate între nodurile nominalizate, utilizând relația:

$$U_{k-1,k}(p) = I_{k-1,k}(p) \cdot Z_{k-1,k}(p). \quad (2.27)$$

Determinarea funcțiilor original a soluției pentru regimul tranzitoriu. Esența procedurii de transformare a funcțiilor imagine cunoscute $U(p)$ și $I(p)$ în funcții original $[u(t); i(t)]$ se bazează pe descompunerea raportului a două polinoame $Q(p)$ și $D(p)$. Această tehnică de descompunere a raportului a două polinoame presupune cunoașterea rădăcinilor

polinomului $D(p)$ de ordinul n , reieșind din condiția $D(p) = 0$. Polinomul $D(p)$ prezintă ecuația caracteristică a ecuației diferențiale. Pentru ecuațiile diferențiale de ordin superior problema determinării rădăcinilor ecuației caracteristice nu este o problemă banală.

Fie că este cunoscut raportul polinoamelor $Q(x) / D(x)$. Acest raport se poate prezenta ca suma a n componente în care x_k sunt rădăcinile ecuației caracteristice, unde $k=1,2,3,\dots, n$, deci

$$\frac{Q(x)}{D(x)} = A_1 \frac{1}{x-x_1} + A_2 \frac{1}{x-x_2} + \dots + A_n \frac{1}{x-x_n}.$$

În termeni funcției imagine pentru ecuația algebrică raportul polinoamelor se prezintă astfel: $\frac{Q(p)}{D(p)} = A_1 \frac{1}{p-p_1} + A_2 \frac{1}{p-p_2} + \dots + A_n \frac{1}{p-p_n}$, unde p_1, p_2, \dots, p_n - rădăcinile

polinomului $D(p) = 0$.

Funcțiile imagine ale variabilelor necunoscute, care sunt determinate cu metoda curenților de buclă, au o topologie simplă. Aceasta este o urmare, că ecuațiile diferențiale care descriu procesele în dinamică au ecuațiile caracteristice de ordinul doi și ordinul unu. Ecuația caracteristică de ordinul doi apare la calcularea curentului de buclă care include rezistențe active R , inductivității L și capacități C . Ecuația caracteristică de ordinul unu include doar rezistența activă R și inductivitatea buclei circuitului L .

Impedanța operațională a buclelor circuitelor formate din RLC componente se descrie de următoarea ecuație tipică:

$$D(p) = R + pL + \frac{1}{pC} = 0. \tag{2.28}$$

Impedanța operațională a buclelor circuitelor formate din RL componente se prezintă de următoarea ecuație tipică:

$$D(p) = R + pL = 0. \tag{2.29}$$

Deoarece ecuația (2.29) caracterizează componenta liberă a ecuației diferențiale a buclei cu componente RLC și prezintă ecuația caracteristică a ecuației diferențiale omogene. Ecuația (2.28) se poate prezent astfel $p^2 LC + pRC + 1 = 0$, iar relația (2.29) prezintă o ecuație de ordinul unu $pL + R = 0$.

Rădăcinile ecuațiilor (2.29) și (2.30) se determină ca:

$$p_{C(1,2)} = \frac{-R \pm \sqrt{R^2 - 4 \frac{L}{C}}}{2L}, \text{ pentru bucla cu componente } RLC; \quad (2.30)$$

$$p_{L(3)} = -\frac{R}{L}, \text{ pentru bucla cu componente } RL.$$

Vom menționa, că raportul $\frac{L}{C} = Z_C^2$ – impedanța caracteristică a buclei cu elemente inductive și capacitive, care pentru inductivitățile și capacitățile ideale (fără pierderi) are caracter rezistiv.

2.4. Calcularea regimului rețelei cu trei faze de joasă tensiune

Conceptul procedurii de calcul elucidat pentru cazul schemei echivalente monofilare este robust pentru calcularea regimului rețelei trifazate de joasă tensiune. Și în acest caz, se consideră, că problema calculului regimului constă în obținerea soluțiilor parțiale pentru fiecare fază prezentată separat. Pentru a efectua acest calcul, rețeaua cu trei faze se prezintă de trei scheme echivalente separate, în care, ca componentă funcțională se include conductorul nul cu parametri concentrați R_N și L_N .

În fig. 2.19 se prezintă schema echivalentă a liniei electrice de joasă tensiune cu sarcini și surse de generare distribuite.

După analogie cu scheme echivalentă monofazată se pot întocmi trei grupe de ecuații a echilibrului tensiunii pentru fiecare fază cu sarcini distribuite. Vom menționa că algoritmul rămâne neschimbat și pentru cazul, că în punctele nodale evidențiate se conectează nu numai sarcini, dar și surse de generare distribuite prezentate de tensiunea electromotoare \dot{E}_{kG} și impedanța internă a acestor surse Z_{kG} .

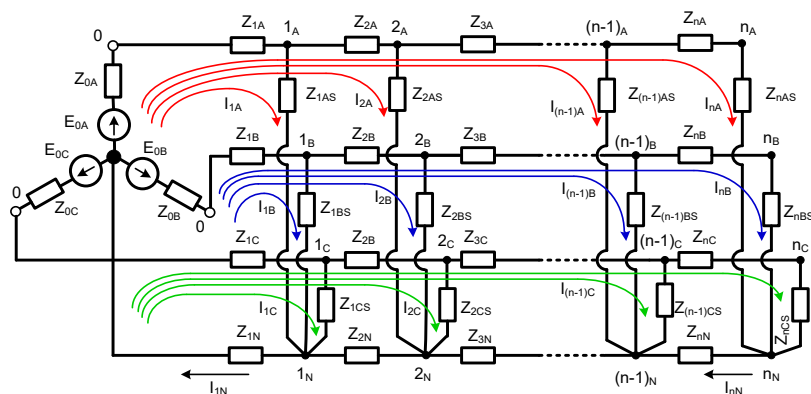


Fig. 2.19. Schema echivalentă a circuitului trifazat cu sarcini distribuite

Pentru elucidarea aplicării algoritmului calculului curenților de buclă vom întocmi ecuațiile echilibrului tensiunilor în bucele evidențiate formate din sarcini distribuite Z_{kS} .

Pentru faza A se obține:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{1A}(Z_{0A} + Z_{1A} + Z_{1AS} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0A}; \\
 \dot{I}_{2A}(Z_{0A} + Z_{1A} + Z_{2A} + Z_{2AS} + Z_{2N} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0A}; \\
 &\vdots \\
 \dot{I}_{(n-1)A}(Z_{0A} + Z_{1A} + Z_{2A} + \dots + Z_{(n-1)A} + Z_{(n-1)AS} + Z_{(n-1)N} + \dots + Z_{2N} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0A}; \\
 \dot{I}_{nA}(Z_{0A} + Z_{1A} + Z_{2A} + \dots + Z_{(n-1)A} + Z_{nA} + Z_{nAS} + Z_{nN} + Z_{(n-1)N} + \dots + Z_{2N} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0A}.
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

Pentru faza B se obține:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{1B}(Z_{0B} + Z_{1B} + Z_{1BS} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0B}; \\
 \dot{I}_{2B}(Z_{0B} + Z_{1B} + Z_{2B} + Z_{2BS} + Z_{2N} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0B}; \\
 &\vdots \\
 \dot{I}_{(n-1)B}(Z_{0B} + Z_{1B} + Z_{2B} + \dots + Z_{(n-1)B} + Z_{(n-1)BS} + Z_{(n-1)N} + \dots + Z_{2N} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0B}; \\
 \dot{I}_{nB}(Z_{0B} + Z_{1B} + Z_{2B} + \dots + Z_{(n-1)B} + Z_{nB} + Z_{nBS} + Z_{nN} + Z_{(n-1)N} + \dots + Z_{2N} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0B}.
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

Pentru faza C se obține:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{1C}(Z_{0C} + Z_{1C} + Z_{1CS} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0C}; \\
 \dot{I}_{2C}(Z_{0C} + Z_{1C} + Z_{2C} + Z_{2CS} + Z_{2N} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0C}; \\
 &\vdots \\
 \dot{I}_{(n-1)C}(Z_{0C} + Z_{1C} + Z_{2C} + \dots + Z_{(n-1)C} + Z_{(n-1)CS} + Z_{(n-1)N} + \dots + Z_{2N} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0C}; \\
 \dot{I}_{nC}(Z_{0C} + Z_{1C} + Z_{2C} + \dots + Z_{(n-1)C} + Z_{nC} + Z_{nCS} + Z_{nN} + Z_{(n-1)N} + \dots + Z_{2N} + Z_{1N}) &= \dot{E}_{0C}.
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

Din sistemele de ecuațiile (2.31), (2.32) și (2.33) se calculează valorile curenților de buclă, utilizând legea lui Ohm $\dot{I}_{kA} = \frac{\dot{E}_{0A}}{Z_{kA}}$; $\dot{I}_{kB} = \frac{\dot{E}_{0B}}{Z_{kB}}$; $\dot{I}_{kC} = \frac{\dot{E}_{0C}}{Z_{kC}}$.

Cunoașterea curenților de buclă permite determinarea căderii tensiunilor \dot{U}_{kSA} , \dot{U}_{kSB} , \dot{U}_{kSC} pe sarcinile Z_{kSA} , Z_{kSB} , Z_{kSC} de la curentul de buclă conectate în nodul k al rețelei trifazate:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{kAS} &= \dot{E}_{0A} \frac{Z_{kAS}}{(Z_{0A} + Z_{1A} + Z_{2A} + \dots + Z_{kA} + Z_{kAS} + Z_{kN} + \dots + Z_{2N} + Z_{1N})} = \dot{E}_{0A} \frac{Q_{kA}}{D_{kA}}; \\
\dot{U}_{kBS} &= \dot{E}_{0B} \frac{Z_{kBS}}{(Z_{0B} + Z_{1B} + Z_{2B} + \dots + Z_{kB} + Z_{kBS} + Z_{kN} + \dots + Z_{2N} + Z_{1N})} = \dot{E}_{0B} \frac{Q_{kB}}{D_{kB}}; \\
\dot{U}_{kCS} &= \dot{E}_{0C} \frac{Z_{kCS}}{(Z_{0C} + Z_{1C} + Z_{2C} + \dots + Z_{kC} + Z_{kCS} + Z_{kN} + \dots + Z_{2N} + Z_{1N})} = \dot{E}_{0C} \frac{Q_{kC}}{D_{kC}}.
\end{aligned} \tag{2.34}$$

Din relațiile (2.34) reiese că tensiunile nodale sunt proporționale tensiunii electromotoare a fazei sursei și raportului a două polinoame Q_k și D_k , care la general se prezintă de numere complexe cu partea reală și partea imaginară. Cunoașterea parametrilor buclei de curent permite determinarea nu numai a curentului de buclă, dar și a căderii tensiunii pe sarcinile conectate la rețeaua de alimentare, dar această cădere de tensiune pe sarcină este doar proporțională curentului de buclă prin sarcină.

Profilul tensiunii de-a lungul liniei se poate determina cu o precizie mai ridicată, dacă vom lua în vedere căderea tensiunii pe componentele longitudinale de la curentul sumar, care se scurge prin aceste elemente longitudinale. Pentru a soluționa corect această problemă este necesar de aplicat în acest scop prima teoremă Kirchhoff pentru sumarea curenților de buclă în nodurile rețelei în direcția de la dreapta spre stânga. Aceasta permite determinarea valorilor curenților în toate componentele longitudinale ale circuitului prezentată de schema echivalentă în topologia trifazată.

Cădere tensiunii în conductorul nul se face după același algoritm. Aplicând prima teoremă Kirchhoff se calculează curenții în porțiunile conductorului nul prin sumarea vectorială a curenților tuturor fazelor care au conectate sarcinile la conductorul nul. Cunoașterea curentului rezultat în aceste porțiuni permite calcularea căderii tensiunii pe impedențele conductorului nul și astfel se poate determina profilul tensiunii și în conductorul nul, care este influențat de toți curenții care circulă prin rețeaua trifazată.

La apariția regimului nesimetric, parametrii conductorului nulului vor influența asupra curentului de buclă. În acest context este necesar de luat în vedere acest efect prin introducerea în schemele echivalente a componentelor care iau în vedere acest fenomen. În calitate de criteriu de echivalare se propune de utilizat pierderile de energie din conductorul nul, care apar la scurgerea curentului de dezechilibru al curenților de fază a circuitului trifazat. Aplicarea criteriului valorii constante a pierderilor în conductorul nul, condiționat de dezechilibrul curenților de fază și repartiția uniformă a acestor pierderi din nul în circuitele de fază pentru nodul m în schema echivalentă a circuitul trifazat se formulează astfel: $\Delta P_{mA(B,C)} = I_{mN}^2 R_{mN} = 3I_m^2 R_{mN}^{ech} = const.$ Din

acest criteriu reiese, că valoarea efectivă (echivalentă) a rezistenței conductorului, care trebuie introdusă în schema echivalentă de calcul a curenților de buclă a fazelor circuitului trifazat se

determină conform relației: $R_{mN}^{ech} = \frac{1}{3} \frac{I_{mN}^2}{I_m^2}$.

Vom menționa, că pentru cazul circuitului trifazat se pot întocmi ecuațiile integro-diferențiale a echilibrului tensiunii instantanee la calcularea regimului tranzitoriu, utilizând metoda curenților de buclă, care la următorul pas se transformă în ecuații algebrice aplicând transformata Laplace. Ecuațiile algebrice se prezintă prin funcțiile imagine, ce permite calcularea funcțiilor imagine a curenților de buclă. Cunoașterea funcțiilor imagine ale curenților de buclă permite determinarea valorilor funcțiilor imagine a curenților în fiecare element al circuitului trifazat, ce permite și calcularea funcției imagine a căderii tensiunii pe aceste elemente. Aplicând transformata inversă Laplace funcțiile imagine a curenților și funcțiile imagine a căderii tensiunii pe aceste elemente în funcții original.

Astfel se pot calcula regimurile permanente și tranzitorii aplicând același algoritm și procedeu de calcul al circuitelor prezentate prin scheme echivalente monofilare și scheme echivalente trifazate.

2.5. Elaborarea algoritmului de calcul al regimului rețelei electrice prin metoda curenților de buclă

1. Întocmirea schemei echivalente a circuitului rețelei electrice. Schema echivalentă se poate prezenta în topologia monofilară (pentru cazul regimului simetric) sau în topologia schemei trifazate cu conductor nul. La întocmirea schemei echivalente se ia în vedere distribuția spațială a racordării sarcinilor, instalațiilor de compensare a puterii reactive și surselor distribuite de generare.

2. Identificarea buclelor de curent. Se selectează sursa de tensiune electromotoare de bază, de obicei, sursa de alimentare de la intrarea circuitului pe care o notăm E_0 . În direcția de la stânga la dreapta se face numerotarea nodurilor de sarcină ale rețelei la care se conectează cel puțin o sarcină sau o sursă de generare distribuită. Se identifică toate porțiunile de circuit, care se conectează la nodurile rețelei (la un nod al rețelei pot fi racordate mai multe sarcini și surse de generare). Identificarea buclelor de curent se face astfel, că fiecare buclă să includă sursa de tensiune definită ca de bază și o singură sarcină sau sursă de generare distribuită, deci, o singură latură transversală a circuitului.

3. În baza topologiei fizice a rețelei, caracteristicilor constructive ale rețelei și sarcinilor conectate se calculează valorile parametrilor, care se includ ca elemente cu parametri concentrați. Parametrii schemelor echivalente de calcul se prezintă de rezistențe active, inductanțe și capacități. Combinațiile elementelor *RLC* și tensiunilor electromotoare *E* permit asigurarea identității caracteristicilor sarcinilor și surselor de generare conectate la rețeaua electrică în gamă largă de valori.

4. Liniarizarea componentelor neliniare cu ansambluri de elemente liniare, a căror valori se determină din caracterul neliniarității. Elementul neliniar în schemele echivalente pentru cazul semnalelor variabile în timp se substituie cu elemente cu parametri concentrați în domeniul de frecvență. Ca instrument de transformare a funcțiilor neliniare cel mai frecvent se utilizează transformata Fourier sau rezultatele măsurătorilor experimentale ale spectrului de armonici (fig.2.7, fig.2.9). Spectrele de armonici se pot determina și în baza rezultatelor simulărilor matematice ale proceselor dinamice în circuitele examinate (dacă este cunoscut modelul matematic și instrumentul respectiv de simulare a procesului).

5. Estimarea bandei de frecvență a spectrului, care se utilizează în calculul regimului rețelei cu neliniarități. Lățimea spectrului se estimează reieșind din caracteristica spectrului după

criteriul de limitare a cotei puterii armonicilor superioare, de exemplu $\frac{U_k^2}{U_1^2} \equiv \frac{I_k^2}{I_1^2} \leq K_{prag}^P$ și/sau

după criteriul de limitare a distorsiunii curbei de variație în timp a curentului

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^m I_k^2}}{I_1} \leq K_{prag}^I, \text{ sau tensiunii } K_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^m U_k^2}}{U_1} \leq K_{prag}^U, \text{ unde } U_k, I_k - \text{amplitudinea armonicii}$$

superioare de tensiune sau curent al spectrului de ordinul *k*; U_1, I_1 – amplitudinile armonicilor de

tensiune sau curent fundamentale. Raportul $\frac{I_k^2}{I_1^2}$ caracterizează cota de putere care revine armonicii

de ordinul *k* și se micșorează puternic cu creșterea valorii ordinului armonicii. Această comportare a raportului armonicilor din spectrele de frecvență servește ca argument pentru a utiliza la substituirea neliniarității reale un număr limitat de armonici superioare, ce simplifică schema de calcul.

6. Substituirea elementului neliniar cu structuri de circuit liniare se face conform recomandărilor și algoritmului descris. Transformarea surselor de curent în surse de tensiune electromotoare (tensiune) se face cu aplicarea teoremei Tevenen. Impedanța internă a surselor de

tensiune cu frecvențele $f_k \neq f_1$ se determină de parametrii sarcinii neliniare la frecvența fundamentală, considerând că componenta activă $R_{2Sk} = R_{2S1} = const.$ și inductanța (componenta reactivă) $L_{2Sk} = L_{2S1} = const.$ Astfel se ia în vedere că impedanțe ale sursei și a circuitului de buclă sunt funcții de frecvență.

7. Determinarea valorii efective a impedanței conductorului nul Z_{kN}^{ech} în schema echivalentă monofilară la calcularea regimului cu aplicare metodei curenților de buclă. Această corecție este condiționată de faptul, că în regim nesimetric prin conductorul nul se scurge curentul determinat de dezechilibrul curenților de fază. Acest curent de dezechilibru conduce la pierderi de energie în conductorul nul, care sunt proporționale pătratului acestui curent și unei valori efective sau fictive a rezistenței conductorului nul în schema echivalentă de calcul. Aplicarea criteriului valorii constante a pierderilor în conductorul nul, condiționat de dezechilibrul curenților de fază și repartiția uniformă a acestor pierderi din nul în circuitele de fază pentru nodul m pentru schema echivalentă a circuitul trifazat se formulează astfel (compartimentul 2.9):

$\Delta P_{mA(B,C)} = I_{mN}^2 R_{mN} = 3I_m^2 R_{mN}^{ech} = const.$ Din acest criteriu reiese, că valoarea efectivă (echivalentă) a rezistenței conductorului, care trebuie introdusă în schema echivalentă de calcul se determină

conform relației: $R_{mN}^{ech} = \frac{1}{3} \frac{I_{mN}^2}{I_m^2}.$

8. Întocmirea ecuațiilor echilibrului tensiunii în bucele evidențiate în formă algebrică sau în formă de ecuații integro-diferențiale.

9. Calcularea curenților de buclă. Din ecuațiile algebrice prezentate de funcții originale se determină valorile curenților în bucele evidențiate. În cazul calculării regimului tranzitoriu se calculează la primul pas imaginile curenților de buclă după transformarea ecuațiilor integro - diferențiale în ecuații algebrice.

10. Calcularea în baza primei teoreme a lui Kirchhoff a curenților prezențați ca mărimi reale sau complexe în cazul că sunt funcții de timp sau a funcțiilor imagine a curenților în porțiunile longitudinale ale schemei echivalente de calcul.

11. Obținerea funcțiilor originale ale curenților prin utilizarea transformatei inverse Laplace a funcțiilor imagine calculate a curenților și a funcțiilor imagine a căderilor de tensiune pe elementele și porțiunile longitudinale ale schemei echivalente.

12. Calcularea valorilor intrare a curenților în fiecare nod al rețelei și căderilor de tensiune pe fiecare porțiune longitudinală, sarcină sau porțiune a circuitului.

13. Calculul indicilor de calitate a e.e se face în baza cunoașterii curenților de buclă pentru fiecare porțiune, element și frecvență, căderilor de tensiune ce permite posibilitatea de calcul a coeficienților de distorsiune a curentului și tensiunii în fiecare nod al rețelei, precum și a profilurilor de tensiune și curent de-a lungul liniei.

2.6. Concluzii la capitolul II

1. S-a argumentat utilitatea aplicării metodei curenților de buclă pentru calcularea regimului de funcționare a rețelelor electrice cu sarcini și surse de generare distribuite și conceptul de elaborare a algoritmului de calcul robust atât pentru calcularea regimului permanent, cât și pentru calculul regimului tranzitoriu. Calculul regimului tranzitoriu după algoritmul elaborat se face cu aplicarea transformatei directe și inverse a lui Laplace.

2. S-a demonstrat, că pentru cazul regimului simetric în rețeaua de distribuție cu sarcini distribuite se poate aplica schema monofilară de calcul. Aceasta este o urmare a faptului, că în conductorul nul nu circulă curentul condiționat de dezechilibrul curenților fazelor circuitului trifazat după amplitudine și a unghiului de fază. Aceasta permite aplicarea procedurii de descompunere a circuitului trifazat în circuite monofilare pentru fiecare fază în care conductorul de retur al curentului spre sursa de alimentare a rețelei se prezintă ca un conductor ideal (fără rezistență activă și inductivitate). Aceasta reiese din regimul simetric și sinusoidal de funcționare al rețelei trifazate pentru care se îndeplinește condiția $Z_N \cdot (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = 0$.

3. S-a propus modalitatea de aplicare a schemei echivalente monofilare de calcul a regimului rețelei trifazate cu dezechilibrul curenților de fază prin introducerea în circuitul buclei respective a unei impedanțe echivalente suplimentare, care va lua în vedere impactul parametrilor conductorului nul asupra curentului în bucla circuitului. Valorile acestor parametri sunt funcție a curentului de dezechilibru prin conductorul nul și se determină reieșind din căderea tensiunii pe componenta inductivă a conductorului nul și asigurarea valorii constate a pierderilor de la curentul de dezechilibru al circuitului trifazat, deci în conductorul de întoarcere a curentului din schemele echivalente monofilare. Valorile echivalente ale parametrilor suplimentari sunt condiționate de scurgerea curentului prin conductorul nul și se calculează cu aplicarea următoarelor relații:

$$L_{kN}^{ech} = L_{kN} \frac{|I_{kN}|}{|I_k|} \text{ și } R_{kN}^{ech} = \frac{1}{3} \frac{I_{kN}^2}{I_k^2}, \text{ unde } k\text{- notare nodului de racord al rețelei.}$$

4. S-au formulat regulile de formare ale buclelor de curent la calcularea regimului în circuit, care prevăd ca în fiecare buclă să fie o porțiune prin care circulă doar curentul acestei bucle. În calitate de astfel de ramuri unice se selectează ramurile transversale racordate la nodurile rețelei de alimentare și la conductorul nul.

5. S-a propus și argumentat identitatea aplicării algoritmului de calcul pentru cazul calculării regimului în schema echivalentă similară topologiei reale a rețelei trifazate, procedeul de calcul al curenților și căderii tensiunii pe fiecare element al circuitului în baza utilizării primei teoreme Kirchhoff și a legii Ohm.

6. S-a propus și argumentat procedeul de liniarizare a surselor distribuite de energie și sarcinilor neliniare cu componente liniare prezentate de impedanțe și tensiuni electromotoare. S-a propus și argumentat procedeul de echivalare a surselor de curent prezentate de un spectru de armonici superioare, utilizând teorema Thevenin și componentele active și reactive ale elementului neliniar la frecvența armonicii fundamentale. Prin aceasta s-a depășit incertitudinea privind determinarea parametrilor sursei echivalente de tensiune, condiționată de faptul, că aplicarea teoremei Thevenin necesită pentru cazul armonicilor superioare de curent cunoașterea valorilor a două mărimi, pe când din spectrul curenților se cunoaște doar valoarea unei mărimi, a amplitudinii sau valoarea efectivă a curentului de frecvență superioară.

7. S-a propus modalitate de calcul a profilului tensiunii de-a lungimile liniei, utilizând valorile curenților de buclă și scenariul mai complex, dar concomitent și mai precis, care constă în determinarea profilului căderilor tensiunii în porțiunile longitudinale prin ce se ia în vedere impactul tuturor curenților de buclă asupra modalității de deformare a profilului tensiunii pe circuit de la intrare spre ieșire. Precizia primei modalități de determinare a profilului tensiunii în linie depinde de parametrii longitudinali și transversali ai schemei echivalente a fazei.

8. Aplicarea conceptului de decompoziție a circuitului trifazat în circuite monofilare, precum și substituirea elementelor neliniare cu componente liniare conduce la creșterea numărului de ecuații independente de calcul a curenților de buclă, dar aceasta nu conduce la creșterea complexității procesului de calcul, deoarece acest calcul se face separat pentru fiecare buclă, iar soluția rezultantă (finală) se obține prin sumarea setului întreg de soluții particulare, ținând cont de topologia circuitului. Aceasta prezintă un avantaj esențial al procedeului de calcul propus cu utilizarea metodei curenților de buclă, care permite calcularea atât a regimurilor permanente, cât și a regimurilor tranzitorii. Concomitent se pot realiza calcule estimative a valorilor coeficienților de distorsiune a profilului tensiunii și curentului în fiecare nod al rețelei de alimentare fără a face măsurători directe.

III. MODELAREA IMPACTULUI CONSUMULUI ȘI GENERĂRII DISTRIBUITE CONCOMITENTE ÎN REȚELELE ELECTRICE DE JOASĂ TENSIUNE

3.1. Modelarea rețelei electrice de joasă tensiune cu consumatori și surse de generare distribuită

Rețeaua electrică reprezintă o instalație electrotehnică complexă constituită din linii electrice, bare de tensiune, transformatoare, bransamente, sarcini, surse de generare racordate la linia electrică, descărcătoare, eclatoare etc. REJT le revine și cea mai mare cotă a pierderilor e.e în lanțul de transmisie – distribuție. În acest context, analiza regimurilor intermitente care se observă în realitate atât la faza de proiectare, cât și exploatare prezintă o sursă ce furnizează informații utile pentru elaborarea măsurilor argumentate de sporire a eficienței tehnologiilor de distribuție a energiei și de asigurare a calității e.e furnizate, adaptând parametrii rețelei la necesitățile utilizatorilor [80].

Cea mai eficientă abordare privind obținerea rezultatului dorit constă în analiza parametrică a diferitor scenarii de realizare a regimului rețelei la furnizarea energiei consumatorilor prin simulări matematice. Pentru aceasta este necesar de avut metoda, instrumentul respectiv de modelare a obiectului real și ansamblul de date inițiale care corespund obiectului studiat, inclusiv, parametrii schemei echivalente. Vom menționa, că cea mai mare variabilitate asupra regimului este produsă de linia electrică urmare a conectării și deconectării aleatorii ale sarcinilor de la linia de alimentare, precum, și urmare a racordării unor noi consumatori ce conduc la modificarea topologiei rețelei de alimentare. Corectitudinea și valabilitatea rezultatelor simulărilor depinde de gradul de similitudine a schemei echivalente și a obiectului real, care se determină de parametrii schemei echivalente.

Verificarea modelului propus se va efectua prin formularea unui studiu de caz ce va permite verificarea modelului de calcul propus și stabilirii impactului GD concomitent cu consumul asupra unor parametrii de calitate a REJT.

Se propune examinarea profilului de tensiune prin modelarea în mediul MATLAB a regimului staționar, regimului de mers în gol și a regimului de scurt circuit. În așa mod, în baza unui script elaborat ce permite modelarea rapidă și iterativă se modelează regimurile propuse.

Scriptul elaborat în mediul MATLAB stabilește valorile profilului de tensiune, iar modelul permite studierea regimurilor conform puterilor de generare și consum ce funcționează concomitent. Conform analizei stabilim următoarele algoritme dependente de puterile de calcul a regimurilor propuse:

- puterea de generare este egală cu puterea nominală ($P_g = P_n$);
- puterea de generare este mai mare decât puterea nominală $P_g > P_n$;

- puterea de generare este mai mică decât puterea nominală ($P_g < P_n$).

Așadar, modelul prevede conectarea a 12 sarcini distribuite la care se conectează centrale electrice cu panouri fotovoltaice cu $P_g = 5600 \text{ W}$. Transformatorul are puterea aparentă de $S = 630 \text{ kVA}$. Conectarea sarcinii în nod (punctul de racord a consumatorului) se efectuează prin cablul cu lungimea $L = 15 \text{ m}$. În tabelul 3.1 este indicată puterea maximă ce poate fi conectată pe un fider în dependență de lungimea acestuia pentru sarcini trifazate distribuite și sarcini monofazate distribuite. Așadar, lungimea recomandată a unui fider cu tensiunea de 380 V este de până la 400 m , iar pentru tensiunea de 220 V este de până la 250 m . În realitate, datorită întinderii sectorului rezidențial liniile electrice ating lungimi de peste 700 m , cu un număr mare de consumatori.

Pentru calculul $P = 67,2 \text{ kW}$ ($U = 220 \text{ V}$) considerăm conductor СИП-4 4x95 lungimea medie de $32,5 \text{ m}$.

În scopul examinării impactului GD asupra calității e.e în regim de consum și generare concomitentă vom utiliza datele inițiale din tabelul 3.1.

Tabelul 3.1. Datele generale de calcul

Nr.	Tensiunea nominală, V	Nr. consumatori	Lungimea fiderului, m	Puterea, kW
1.	220	12	390	67,2
2.	380	33	1072,5	184,8

Calculul REJT cu SD și surse fotovoltaice de GD cu tensiunea nominală de 220 V. Cercetarea se efectuează în sectorul rezidențial prin conectarea în 12 gospodării casnice dotate cu centrală electrică cu panouri fotovoltaice ce generează e.e pentru consum propriu, iar surplusul este transmis în rețea. Reieșind din tabelul nr.1 stabilim că pentru tensiunea de $U = 220 \text{ V}$ se calculează numai pentru o fază a circuitului trifazat. Fiderul examinat este arborescent și are lungimi peste lungimile recomandate.

În acest scop la data de 15 iulie 2015 a fost măsurată curba de sarcină într-o gospodărie pentru a putea formula mai exact problema (fig. 3.1).

Montarea panourilor fotovoltaice este posibilă pe acoperișul caselor de locuit, iar suprafața medie pentru toți consumatorii de amplasare a panourilor este de 41 m^2 . Aceasta este o suprafață ipotetică și medie în dependență de suprafețele caselor din sectorul rezidențial (localități rurale de pe teritoriul Republicii Moldova).

În scopul cercetării se propune montarea panourilor solare de tip HH-POLY280W (280-300 W, Poli cristal, 1956x990x40). Puterea de generare a panoului este $P = 280 \text{ W}$, iar numărul total într-o gospodărie este 21 panouri. Puterea nominală a instalației fotovoltaice a unei gospodării

din 21 panouri este $P=5580\text{ W}$, iar radiația solară 100 w/m^2 și nu depășește puterea nominală a unei gospodării (nici puterea instalației furnizorului dimensionată de transformator).

Modelarea se face la diferite ore ale zilei (conform Anexei 1), iar rezultatele corespund profilurilor de tensiune din bucle.

Din Anexa 1 se atestă că în regim de generare și consum instalația de generare a e.e funcționează de la orele 6^{00} până la orele 20^{00} , iar în perioada dintre ora 13^{00} și ora 18^{00} avem regim maxim de generare. Între orele 6^{00} - 10^{00} și 17^{00} - 20^{00} avem $P_g < P_n$, iar între orele 11^{00} - 16^{00} $P_g > P_n$. Intervalul dintre ora 10^{00} și 11^{00} îl putem considerăm $P_g = P_n$.

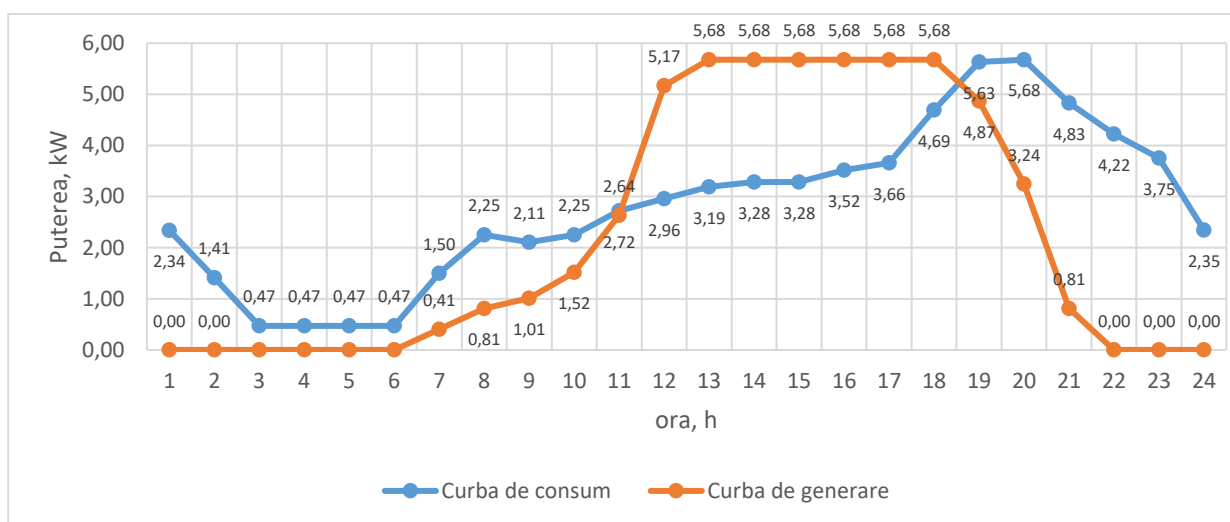


Fig.3.1. Curba de sarcina și consum pentru data de 15 iulie 2015

Modelarea se efectuează în baza programei MATLAB. Algoritmul programei este elaborat pentru cercetarea problemei examinate și este indicat în Anexa 3.

Pentru modelare considerăm o REJT cu tensiunea $U=220\text{ V}$, cu surse și consumatori de energie care funcționează concomitent. Modelul presupune studiul unei singure faze pe care se conectează consumatorii și sursele distribuite cu puterile instalate în diferite ore.

În figura 3.2 este indicat graficul orei 6^{00} modelat prin metoda curenților de buclă descrisă în capitolul II, care corespunde $P_g < P_c$. Din rezultatele modelării se stabilesc profilurile de tensiune cu SGD au valori de la $U=220 - U=191,85\text{ V}$, iar fără SGD valorile profilurilor de tensiune corespund profilurilor de tensiune $220 - 179,54\text{ V}$. Toate graficele modelate conform valorilor ce corespund $P_g < P_c$ sunt indicate în Anexa 5.

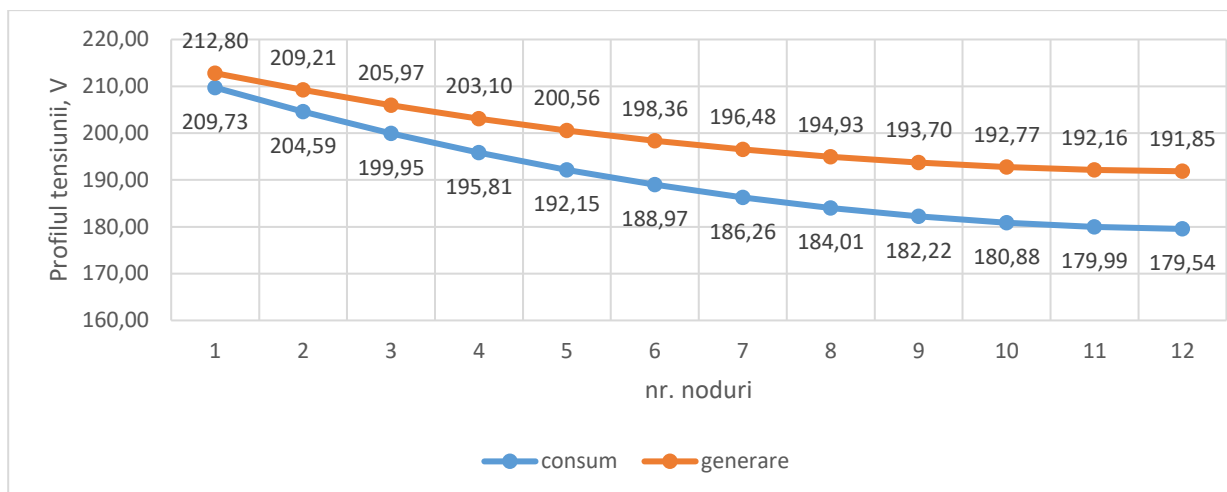


Fig.3.2. Rezultatele modelării profilului tensiunii din nodurile REJT cu 12 consumatori și 12 SGD ($U=220\text{ V}$), ($P_g(0,405\text{ kW}) < P_c(1,501\text{ kW})$, ora 6^{00})

În figura 3.3 este indicat graficul orei 10^{00} modelat, care corespunde $P_g \leq P_c$ din care reiese că profilurile de tensiune cu SGD au valori de la 220 – 218,47 V, iar fără SGD valorile profilurilor de tensiune ating valorile de la 220 – 154,92 V. Toate graficele modelate conform valorilor ce corespund $P_g \leq P_c$ sunt indicate în Anexa 5.

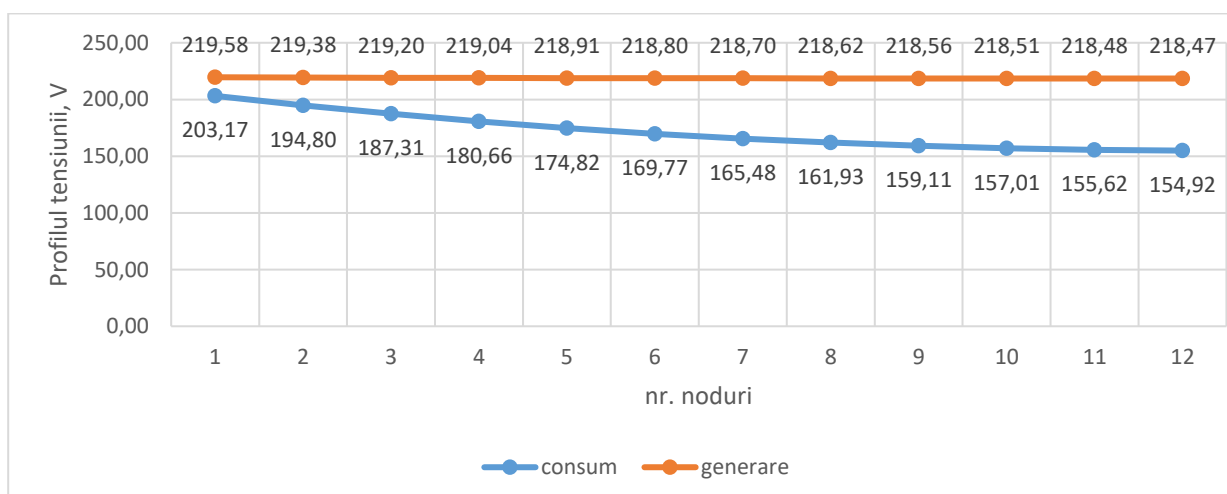


Fig.3.3. Rezultatele modelării profilului tensiunii din nodurile REJT cu 12 consumatori și 12 SGD ($U=220\text{ V}$), ($P_g(2,636\text{ kW}) \leq P_c(2,721\text{ kW})$, ora 10^{00})

În figura 3.4 este indicat graficul orei 13^{00} modelat, care corespunde $P_g > P_c$ din care reiese că profilurile de tensiune cu SGD au valori de la 220 – 251,80 V, iar fără SGD valorile profilurilor de tensiune ating valorile de la 220 – 145,35 V. Toate graficele modelate conform valorilor ce corespund $P_g > P_c$ sunt indicate în Anexa 5.

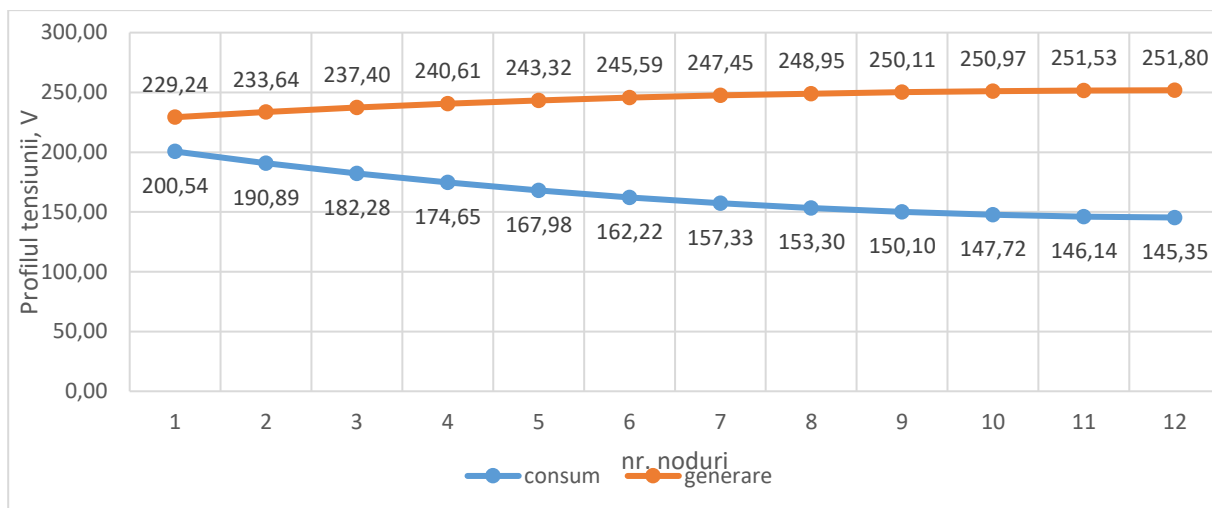


Fig.3.4. Rezultatele modelării profilului tensiunii din nodurile REJT cu 12 consumatori și 12 SGD ($U=220\text{ V}$), ($P_g(5,678) > P_c(3,284)$) ora 14⁰⁰

În scopul stabilirii regimului de mers în gol, modelarea se efectuează cu puterea de generare maximă $P_g = 5,678\text{ kW}$ în 12 noduri și considerăm puterea de consum $P_c = 0\text{ kW}$. Din rezultatele modelării stabilim o creștere a profilului de tensiune de la valorile nominale ($U=220\text{ V}$) la valori de $U=325,6\text{ V}$. Acest regim este un regim periculos pentru funcționarea instalațiilor electrice și conduce la avarii în instalația electrică examinată.

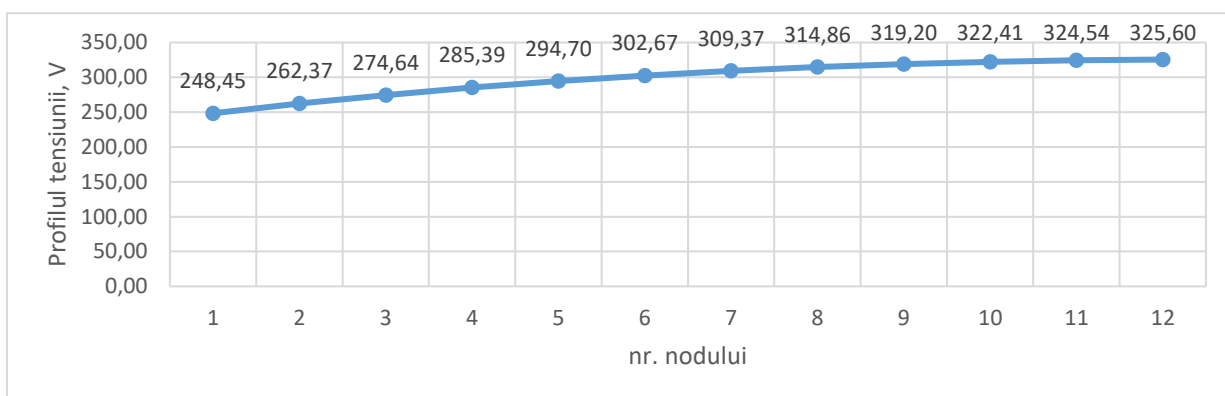


Fig.3.5. Rezultatele modelării profilului tensiunii din nodurile REJT cu 12 consumatori și 12 SGD ($U=220\text{ V}$) în regim de m.g ($P_c=0\text{ kW}$)

Modelarea regimului de s.c. se efectuează în timpul procesului de scurt circuit când $U \rightarrow 0\text{ V}$, în acest sens considerăm tensiunea în nodul în care s-a produs scurtcircuitul egală cu zero ($U=0\text{ V}$). În regim fără SGD, în nodurile de după scurt circuit tensiunea $U=0\text{ V}$ se consideră drept condiție teoretică stabilită pentru calcul.

Modelarea se efectuează în baza programului din Anexa 3 cu înlocuirea în nodurile buclelor de consum $U=0\text{ V}$, iar în buclele de generare $U=220\text{ V}$.

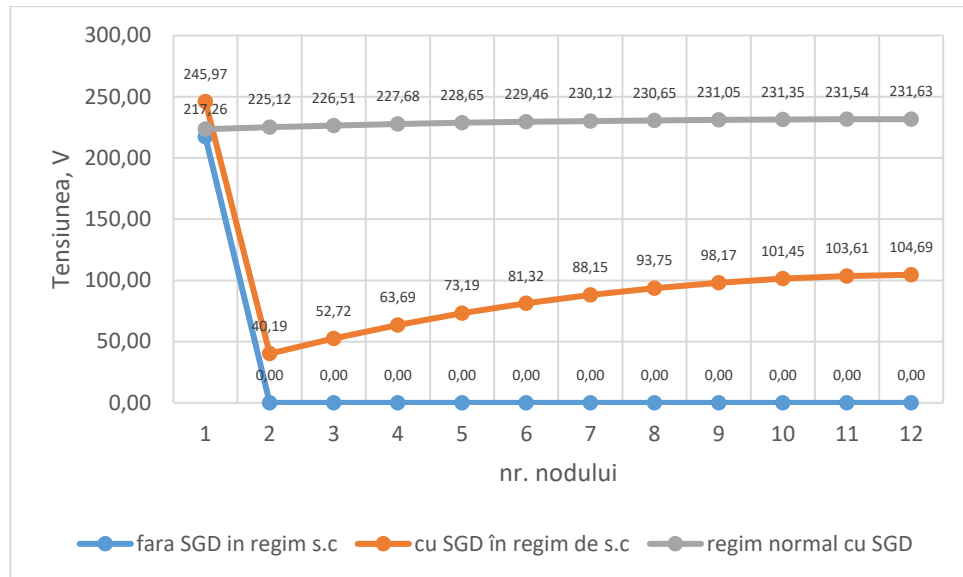


Fig.3.6. Rezultatele modelării profilului tensiunii din nodurile REJT cu 12 consumatori și 12 SGD ($U=220\text{ V}$), în regim de s.c pentru ora 17^{00} nodul 1, ($P_n=4,691\text{ kW} < P_g=5,678\text{ kW}$)

Analiza impactului de GD în regim de scurt circuit se efectuează pentru ora 17^{00} la începutul liniei electrice în nodul 1, iar din rezultatele prezentate în graficul 3.6 ($P_g < P_c$) stabilim că în nodurile de după scurt circuit există o tensiune de la $U=40,19\text{ V}$ în nodul 2 și $U=104,69\text{ V}$ în nodul 12.

Reieșind din rezultate se impune problema analizei impactului consumului și generării din SGD în nodul 6 pentru a putea stabili nivelul de impact.

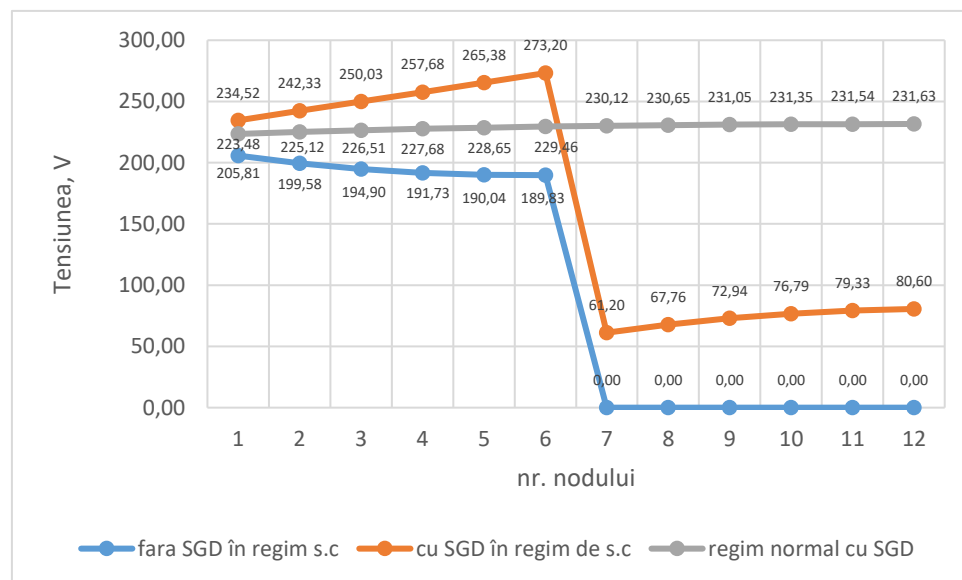


Fig.3.7. Rezultatele modelării profilului tensiunii din nodurile REJT cu 12 consumatori și 12 SGD ($U=220\text{ V}$), în regim de s.c pentru ora 17^{00} nodul 6, ($P_n=4,691\text{ kW} < P_g=5,678\text{ kW}$)

Analiza impactului GD în regim de scurt circuit pentru ora 17^{00} la începutul liniei electrice în nodul 1 este prezentată în graficul 3.7 ($P_g > P_c$) de unde stabilim că în nodurile de după scurt

circuit există o tensiune de la $U=273,20$ V în nodul 6 și $U=61,20$ V în nodul 7, iar în nodul 12 $U=80,60$ V.

Reieșind din aceste două cazuri stabilim următoarele:

- nodurile în punctele de s.c sunt alimentate din două direcții (pentru ambele cazuri), iar în toate nodurile de după s.c se stabilesc tensiuni ce lipsesc în regim fără de SGD;
- în cazul s.c în nodul 6 (mijlocul geometric a liniei electrice), din nodul 1 și până în nodul 6, valorile profilurilor tensiunii cresc brusc comparativ cu regimul staționar de consum și generare concomitentă și regimul de consum.

Așadar, se creează o nouă problemă care necesită a fi soluționată deoarece obținem în regimul de s.c valori ale tensiunii în toată linia electrică, iar protecția existentă poate să nu sesizeze aceste valori. Tot aici, stabilim că în cazul s.c care tind spre 0 (zero), dar nu ating aceste valori din cauza rezistenței mari înregistrăm creșteri de tensiuni nestandardizate și o lipsă a protecției instalației electrice.

Calculul REJT cu SD și surse eoliene de GD cu tensiunea nominală de 220 V.

Cercetarea se efectuează în sectorul rezidențial prin conectarea în 12 gospodării dotate cu turbine eoliene de puteri mici ce vor genera e.e pentru consum propriu, iar surplusul îl vor genera în rețea.

În acest scop la data de 15 iulie 2015 a fost colectate date ale vântului pentru a putea calculul puterii de generare a turbinei eoliene. Măsurătorii au fost vizualizați și monitorizați de către angajații Serviciului Hidrometeorologic de Stat la stația AWS Chișinău, la înălțimea de $h=15$ m.

Tabelul nr.3.2. Calculul puterii teoretice de generare conform vitezei reale ale vântului

ora	0	3	6	9	12	15	18	21	Teoretic
Viteza vântului, m/s	2,00	2,00	2,00	1,00	5,00	6,00	1,00	4,00	12,50
Puterea turbinei, kW	0,01	0,01	0,01	0,00	0,09	0,16	0,00	0,05	1,47

Pentru examinarea impactului GD din surse eoliene asupra profilului tensiunii vom alege turbine eoliene de tipul WE1500 cu puterea nominală $P_n = 1,5$ kW, înălțimea de montare $h=12$ m deasupra solului. Întru asigurarea condițiilor minime egale cu condițiile din calculului pentru sursele fotovoltaice și se propune montarea în gospodărie a 3 turbine de tip WE 1500 ($P_{tot}=4500$ W la viteza vântului de 9-12 m/s, $P_{tot2}=7800$ W și $P_{med}=6150$ W). În raza municipiului Chișinău conform datelor colectate pentru data de 15 iulie 2015, de către serviciul Hidrometeorologic de Stat viteza vântului, la înălțimea de $h=10$ m deasupra solului, este prezentată în tabelul 3.2.

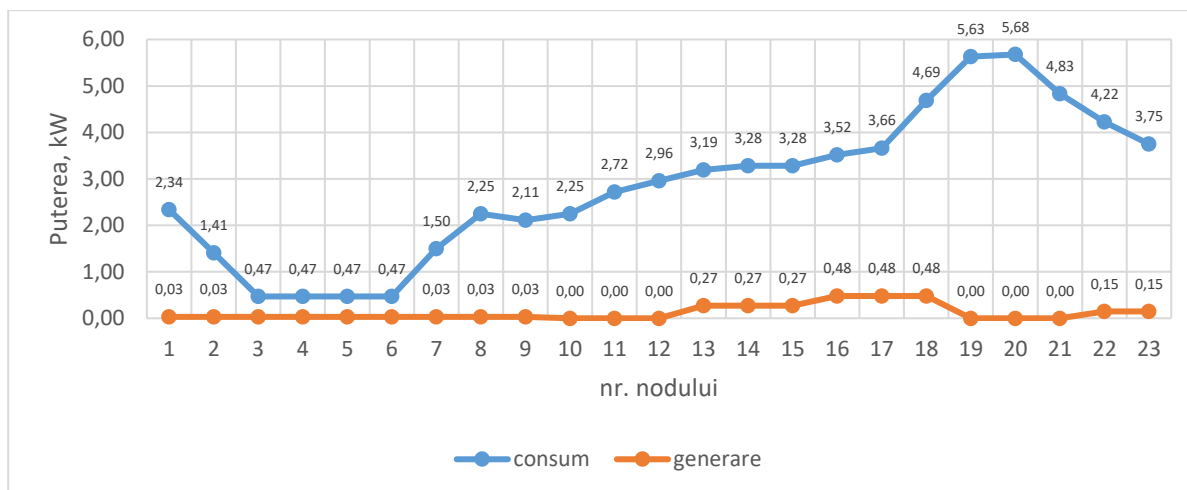


Fig.3.8. Curbele de consum a e.e și generare a e.e în dependență de vânt pentru data de 15 iulie 2015

Considerăm datele de calcul a rețelei ca și în cazul calculului cu SGD fotovoltaice. Pentru evaluarea impactului GD din surse eoliene asupra profilului de tensiune utilizăm programul elaborat în MATLAB din Anexa 3.

În figura 3.9 este indicat graficul orei 6⁰⁰ modelat prin metoda curenților de buclă, care corespunde $P_g < P_c$. Din rezultatele modelării se stabilesc profilurile de tensiune cu SGD ce au valori de la $U = 220 - U = 188,78$ V, iar fără SGD valorile profilurilor de tensiune corespund profilurilor de tensiune $220 - 179,54$ V. Toate graficele modelate conform valorilor ce corespund $P_g < P_c$ sunt indicate în Anexa 6.

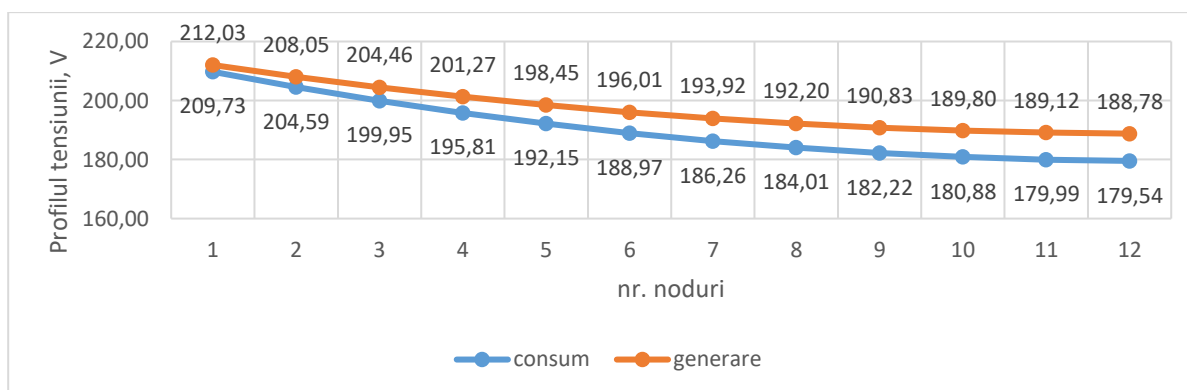


Fig.3.9. Profilul tensiunii din noduri calculat conform curbelor de sarcina și consum pentru data de 15 iulie 2015

Așadar, la data de 15 iulie 2015 (în perioada de vară) avem valori de generare sub valorile de consum cu o diferență de orele de generare. Totodată, generarea cu valori $P_g = P_c$ și $P_g > P_c$ va corespunde rezultatelor modelate din Anexa 5 din care considerent nu este necesar de remodelat datele pentru perioada de iarnă. Datele modelelor obținute permit stabilirea impactului în diferite regimuri de funcționare. Reieșind din instabilitatea condițiilor meteorologice pe parcursul anului (și anume a celor legate de mișcările maselor de aer) stabilim că o prognoză exactă a regimului de

funcționare în dependență de curbele de sarcină nu este posibil. Totodată, rezultatele obținute permit elaborarea condițiilor tehnice speciale și a măsurilor necesare de întreprins cunoscând condițiile meteorologice prognozate pe perioada de până la 5 zile (prognoza apropiată realității) în REJT.

O altă problemă se conturează din arhitectura REJT și anume din specificul acestora caracterizat de consumatori monofazați cu puteri de consum apropiate cerințelor individuale, ceea ce producătorii de turbine eoliene nu pot asigura prin turbine monofazate cu puteri de $P = 5 - 7$ kW din cauza randamentului scăzut și dimensiunilor specifice turbinelor trifazate.

3.2. Examinarea impactului generării distribuite în rețelele electrice de tip RL asupra profilului de tensiune

Trecerea de la conductorii neizolați de tip AC/A, la conductorii auto-portanți de tip (СИП sau Torsada) pe teritoriul Republicii Moldova a condus la micșorarea abaterilor de tensiune în sectorul rezidențial. Aceasta impune în circuit o componentă nestudiată pentru REJT aeriene care reprezintă cota majoră din sectorul electroenergetic al Republicii Moldova, acesta fiind inductanța liniei electrice. Componenta inductanței în circuit se datorează izolării conductorului electric și construcției coaxiale ale acestuia [80].

Totodată, la moment se atestă din cauza eficientizării consumului de energie a utilizării în sectorul locativ a plitelor de preparat bucatele de tip inductive care parțial înlocuiesc plitele rezistive și modifică conceptul de consum a consumatorilor casnici. Influența GD asupra calității e.e necesită la etapa de fezabilitate o aplicare generalizată care ar stabili soluțiile ce vor permite luarea deciziilor de înaintarea unor condiții pentru etapa de proiectare.

Formele curbelor de tensiune la moment reprezintă un parametru de calitate, care poate influența receptorii actuali ale consumatorilor din cauza sensibilității sporite ale acestora. Inductanța suplimentară care apare în rețeaua electrică, inclusiv și SGD sunt un factor ce poate influența asupra calitatea e.e. și anume asupra formei curbei de tensiune.

Mai multe dificultăți se întâlnesc la calcularea regimurile tranzitorii. Totuși vom menționa, că orice regim tranzitoriu tinde cu timpul la o stare staționară, deoarece în circuitele reale are loc fenomenul de disipare a energiei, care și asigură efectul de atingere a stării de echilibru. Pentru cazul regimului tranzitoriu procesele se descriu de ecuații integro-diferențiale, ceea ce și conduce la mai multe dificultăți în cazul studierii caracteristicii derulării regimului tranzitoriu.

Studierea impactului GD asupra calității e.e impune în baza noilor provocări (tipul activ-inductiv, regim staționar, regim tranzitoriu etc.) modificarea conceptului propus prin introducerea

unor criterii pentru efectuarea studiilor analitice la etapa de fezabilitate, ținând cont că la etapa de prefezabilitate este suficientă analiza conform metodologiei elaborate.

Pentru analiza figurii 3.10 la determinarea mărimilor necunoscute a curenților și tensiunilor în diferite porțiuni ale circuitului descriem sistemul de ecuații (3.1):

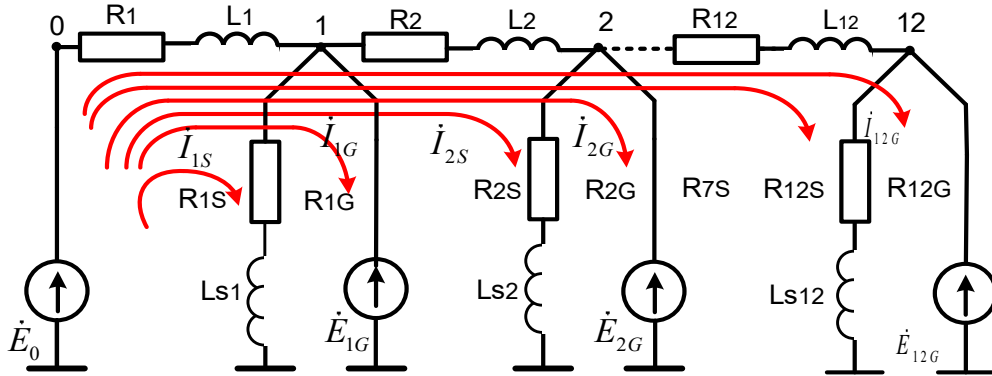


Fig.3.10. Schema de calcul pentru 12 sarcini

Alcătuiim ecuațiile diferențiale pentru schema din figura 3.10:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 i_{1s} + L_1 \frac{di_{1s}}{dt} + r_{1s} i_{1s} + L_{s1} \frac{di_{1s}}{dt} = e_0; \\ r_1 i_{1G} + L_1 \frac{di_{1G}}{dt} = e_0 - e_1; \\ \vdots \\ r_1 i_{12s} + L_1 \frac{di_{12s}}{dt} + r_{2s} i_{12s} + L_2 \frac{di_{12s}}{dt} + \dots r_{12} i_{12s} + L_{12} \frac{di_{12s}}{dt} + r_{12s} i_{12s} + L_{s12} \frac{di_{12s}}{dt} = e_0; \\ r_1 i_{12G} + L_1 \frac{di_{12G}}{dt} + r_{2s} i_{12G} + L_2 \frac{di_{12G}}{dt} + \dots r_{12} i_{12G} + L_{12} \frac{di_{12G}}{dt} = e_0 - e_n. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Alcătuiim ecuațiile diferențiale pentru schema din figura 3.10:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} = e_0; \\ R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} = e_0 - e_1; \\ \vdots \\ R_{12} i_{12} + L_{s12} \frac{di_{12}}{dt} = e_0; \\ R_{12} i_{12} + L_{12} \frac{di_{12}}{dt} = e_0 - e_{12}. \end{array} \right. \quad (3.2)$$

unde:

$$R_{k-1} = R_0 + \sum_{i=1}^k r_{Li} + R_{Sk}; R_k = R_0 + \sum_{i=1}^k r_{Li} + R_{Ek}$$

$$L_{k-1} = L_0 + \sum_{i=1}^k L_{Li} + L_{Sk}; L_k = R_0 + \sum_{i=1}^k L_{Li} + L_{Ek}.$$

În baza metodologiei din capitolul II se prezintă schema electrică de calcul pentru imaginile funcțiilor Laplace.

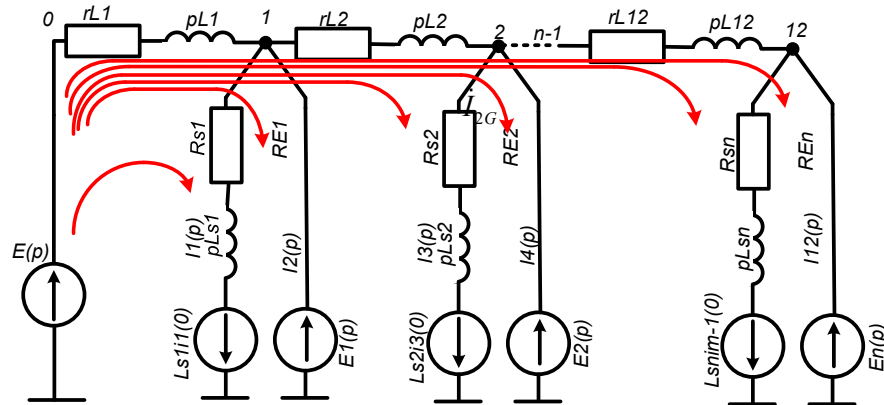


Fig. 3.11. Schema circuitului echivalent în ceea ce privește parametrii funcției imaginii după Laplace

Stabilim ecuațiile pentru schema din figura 3.11:

$$\begin{cases} Z_{1S}(p)I_{1S}(p) = E_0(p); \\ Z_{2G}(p)I_{2G}(p) = E_0(p) - E_1(p); \\ \vdots \\ Z_{12S}(p)I_{12S}(p) = E_0(p); \\ Z_{12G}(p)I_{12G}(p) = E_0(p) - E_{12G}(p). \end{cases}$$

Funcția de tensiune inițială în nodul 12 exprimată de parametrii circuitului de sarcină:

$$\begin{aligned} u_{S12}(t) = & \frac{E_{0m} \left[\omega^2 L_{S1-12} - j\omega R_{S1-12} \right]}{-2L_{S1-12} \omega^2 + j2R_{S1-12} \omega} e^{-j\omega t} - \frac{E_{0m} \left[\omega^2 L_{S1-12} - j\omega R_{S1-12} \right]}{4L_{S1-12} \omega^2 - j2R_{S1-12} \omega} e^{-j\omega t} + \\ & + \frac{E_0 \left[\left(\frac{R_{S1-12}}{L_{S12}} \right)^2 L_{S12} - \left(\frac{R_{S12}}{L_{S12}} \right) R_{S12} \right]}{3L_{S1-12} \left(\frac{R_{S1-12}}{L_{S1-12}} \right)^2 - 2R_{S1-12} \left(\frac{R_{S1-12}}{L_{S1-12}} \right) + L_{S1-12} \omega^2} e^{\frac{R_{S1-12}}{L_{S1-12}} t}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Funcția inițială a tensiunii în nodul 12 pentru circuitul cu sursa de generare este determinată din relația:

$$u_{Ek}(t) = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{Q_{E12}(p_{E12})}{D'_{E12}(p_{E12})} \right) e^{p_{Ei}t} = \frac{j\omega(E_0 - E_{G12})R_{G1-12}}{-2L_{G1-12}\omega^2 + j2R_{G1-12}\omega} e^{j\omega t} - \frac{j\omega(E_0 - E_{G12})R_{G1-12}}{4L_{G1-12}\omega^2 - j2R_{G1-12}\omega} e^{-j\omega t} + \frac{-\left(\frac{R_{G1-12}}{L_{G1-12}}\right)(E_0 - E_{G1-12})R_{G1-12}}{3L_{G1-12}\left(\frac{R_{G1-12}}{L_{G1-12}}\right)^2 - 2R_{G1-12}\left(\frac{R_{G1-12}}{L_{G1-12}}\right) + L_{G1-12}\omega^2} e^{\frac{R_{G1-12}}{L_{G1-12}}t} \quad (3.4)$$

Considerăm o rețea electrică cu tensiunea de $U=380 \text{ V}$, cu surse și consumatori de energie care funcționează concomitent. Modelul presupune un studiu consumului monofazat în care se conectează SD și SGD în regim normal de funcționare. În așa mod se calculează numai o fază și se ia în calcul valorile pentru tensiunea de linie $U_L=220 \text{ V}$.

Se conectează 12 consumatori trifazați dotați cu centrale electrice cu panouri fotovoltaice $P=5600 \text{ W}$. Transformatorul este cu puterea aparentă de $S=630 \text{ kVA}$.

Parametrii liniei electrice. Topologia liniei electrice se poate prezenta ca un element principal al procedurii de calcul cu utilizarea schemei echivalente, care se prezintă de un ansamblu de porțiuni cu parametri concentrați (fig. 2.17 și fig. 3.10). Valorile parametrilor acestor porțiuni se pot defini ca parametri ai deschizăturii liniei, sau a unui număr multiplu de deschizături, conform poziționării punctelor de racord ale SD și SGD. Utilitatea definirii parametrilor longitudinali ca cei ai deschizăturii reiese din faptul, că proiectarea oricărei linii electrice include determinarea lungimii acestei deschizături, care depinde de tensiunea nominală, relieful solului, condițiile climaterice. Condițiile climaterice (vântul și chiciura- depunerea de gheață pe conductoare) sunt factorii principali, care determină dimensiunea deschizăturii.

Condițiile climaterice diferă de la o zonă geografică la alta și se definesc în standardele de proiectare ale liniilor electrice. Astfel, teritoriul Republicii Moldova corespunde zonelor II și III după vânt și zonelor III și IV după gheață. Zona IV după gheață (grosime de depunere a gheții de peste 20 mm) corespunde zonei codrilor [81-84].

Urmare a factorilor nominalizați, dimensiunea deschizăturii liniilor de joasă tensiune (0.4 kV) nu depășește 40 m. Astfel, pentru zona de gheață III deschizătura maximă a liniei nu trebuie să depășească 35 m, iar pentru zona IV – 30 m la aplicarea conductoarelor de tip СИП [81-84]. Reieșind din aceste restricții, vom considera, că dimensiunea deschizăturii este de 30 m. Un alt parametru, care este necesar de selectat pentru definirea parametrilor schemei echivalente îl prezintă aria secțiunii transversale a conductorului fazei liniei. Conform NAIE se recomandă ca secțiunea conductorului fazei porțiunii magistrale să depășească 50 mm^2 , iar a ramificărilor de la porțiunea magistrală să fie la nivel de 25 mm^2 .

În prezent se recomandă, ca liniile noi de alimentare de joasă tensiune cu e.e sau cele modernizate să fie proiectate cu aplicarea conductoarelor auto-portante (СИП-4, СИПс-4, СИПН-4, AsXS, AsXS_n TORSADO). Cunoscând valoarea recomandată a secțiunii transversale a conductorului fazei se pot determina parametrii specifici: rezistența specifică activă R_0 [Ohm/km] și rezistența inductivă specifică X_0 [Ohm/km] la frecvența rețelei. Pentru conductoarele tip СИП se indică următoarele valori: $R_0 = 1.91 - 0.253$ Ohm/km și $X_0 = 0.084 - 0.072$ Ohm/km [81-84].

În baza acestor date obținem pentru conductorul СИП-4 4x50 cu secțiunea 50 mm² valorile specifice ale parametrilor: $R_0 = 0.000641$ Ohm / m și $L_0 = 2.45 \cdot 10^{-7}$ H / m.

Determinarea configurației rețelei o vom face cu aplicarea următoarei restricții recomandate. La sarcina de 67,2 kW la capătul liniei abaterea tensiunii nu trebuie să depășească valoarea admisibilă, de exemplu de $\pm 10\%$ de la valoarea nominală [71]. Sarcina de 67,2 kW are echivalentul prezent prin rezistența activă $R_{S67,2} = \frac{U^2}{P \cdot 1000} = \frac{220^2}{67,2 \cdot 1000} = 0.720$ Ohm. Valoarea

limită admisibilă a curentului regimului permanent în acest conductor СИП-4 4x95 este de 300 A. Deoarece, cunoaștem valorile componentelor cablului СИП-4 4x95 $R_0 = 0.000411$ Ohm / m și

$Z_0 = 0.000077$ Ohm / m, modulul impedanței Z_0 va avea valoarea $|Z_0| = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{X_0}{R_0}\right)^2}$.

Valoarea raportului $\left(\frac{X_0}{R_0}\right)^2 = \left(\frac{0.000077}{0.000641}\right)^2 = 0.0144$, din care reiese că modulul impedanței la frecvența fundamentală se determină preponderent de componenta activă $|Z_0| = 1.0072 \cdot R_0 \approx R_0 = 0.000641$ Ohm / m.

Deoarece modulul impedanței specifice este determinat de componenta activă, avem posibilitatea de a estima lungimea maximă l_{\max} a rețelei după criteriul limitării abaterii maxime admisă a tensiunii pe sarcina de la capătul liniei $P_S = 67,2$ kW, că la scurgerea curentul prin line căderea tensiunii se determina de căderea pe rezistența activă ($R_0 \cdot l_{\max}$), unde l_{\max} - lungimea admisibilă a liniei. Din relația ce descrie divizorul de tensiune format din elementele rezistive ($R_0 \cdot l_{\max}$) și $R_{S67,2} = 0,720$ Ohm, pentru căderea de tensiune pe linie $\Delta U \leq 0,1U_{nom}$, obținem:

$$l_{\max} \approx \frac{(1 - R_{S67,2})}{|Z_0|}. \quad (3.5)$$

Pentru cablul selectat CIII obținem $l_{\max} = 390 \text{ m}$. Numărul de sarcini care pot fi conectate la acest fider se determină ca raportul lungimii liniei l_{\max} la dimensiunea deschizăturii $l_{des} = 30 - 35 \text{ m}$, deci $N_s = \frac{l_{\max}}{l_{des}} = \frac{390}{30 - 35} = 11 - 13$. Vom considera ca la rețea sunt racordate $NS = 11$ de sarcini cu lungimea de $L = 32,5 \text{ m}$ între ele.

Fie, linie aeriană sau aeriană în cablu este constituită din conductoarele fazelor cu capacități față de pământ și capacități mutuale între însuși conductoarele fazelor și conductorul neutru. Deoarece la scurgerea curentului prin aceste conductoare apar câmpuri electromagnetice, aceste conductoare posedă capacitatea de acumulare a energiei în aceste câmpuri. Sursele de acumulare a energiei se pot prezenta în schema echivalentă de capacități și inductivități, care se pot privi ca componente ale schemei echivalente de calcul cu parametri concentrați.

Capacitatea liniei electrice. Se permite orice aranjament al conductoarelor de fază pe suporturi (stâlpi), indiferent de zona condițiilor climatice. Firul neutru, de regulă, ar trebui să fie situat sub firele de fază. Distanțele dintre conductoarele de pe suport, în funcție de condițiile convergenței lor cu săgeată până la 1,2 m, trebuie să fie cel puțin: 40 cm în zonele I, II și III pe gheață, 60 cm în IV și zone speciale pe gheață. Distanța de la firele cu cea mai mare înclinare până la sol și carosabil trebuie să fie de cel puțin 6 m [81-84].

Acestea permit efectuarea calculelor valorilor capacității și inductanței liniare a liniei electrice de joasă tensiune cu neutrul legat la pământ. În figura 3.1 se prezintă convențional topologia aranjării conductoarelor liniei trifazate cu neutrul legat la pământ și a liniei de joasă tensiune executată în cablu.

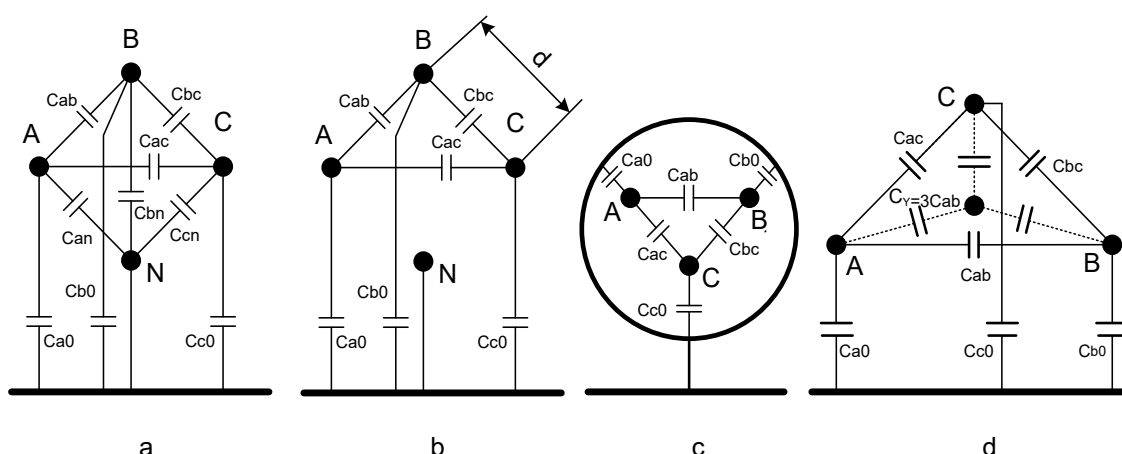


Fig. 3.12. Capacitățile liniilor de transmisie trifazată a energiei: a - linia aeriană cu capacitățile la sol și între conductoare; b - linia aeriană cu potențialul neutrilor egal cu potențialul pământului; c - linia de cablu; d - transformarea triunghiului capacităților într-o stea

Susceptanța capacitivă se datorează capacităților dintre faze, conductoarele de fază (nuclee) și pământ. În circuitul echivalent al liniei de transmisie a puterii se folosește capacitatea calculată (de lucru) a brațului stelei echivalente, obținută din transformarea triunghiului de conductivitate capacitivă într-o stea (fig. 3.12d). Capacitatea de lucru a liniilor de cablu este semnificativ mai mare decât capacitatea liniilor aeriene, deoarece conductoarele fazelor cablurilor sunt foarte apropiate unele de altele și de învelișurile metalice legate la pământ. În plus, constanta dielectrică a izolației cablurilor este mult mai mare decât unitatea - constanta dielectrică relativă a aerului. Varietatea mare a modelelor de cabluri, absența informației despre dimensiunea lor geometrică complică determinarea capacității de lucru și, prin urmare, în practică, se utilizează date din măsurători operaționale sau din fabrică.

Capacitatea de fază (C , F/m) pe unitate de lungime a liniei trifazate cu o dispunere orizontală a conductoarelor față de sol se calculează cu expresia [85].

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2H_{med}d}{r^3 \sqrt[3]{(4H_{med}^3 + d^2)} \sqrt{H_{med}^2 + d^2}}}, \quad (3.6)$$

unde $H_{med} = H_{st.} - \frac{2f}{3}$ - înălțimea medie a suspensiei conductorului fazei deasupra solului, m , d - distanța dintre axele conductoarelor fazelor adiacente, m , $\epsilon_0 \approx 8.85419 \cdot 10^{-12} F / m$ - permitivitatea dielectrică absolută.

Neglijând influența pământului, deci, considerând că $H_{med} \gg d$, obținem o expresie simplificată:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d^3 \sqrt[3]{2}}{r}}, [F / m] \quad (3.7)$$

unde r - raza conductorului fazei, m .

Inductivitatea liniei electrice. Reactanța inductivă X_0 (Ohm / km) la frecvența 50 Hz se determină cu formula empirică:

$$X_0 = 0.144 \lg \frac{D_{med}}{r} + 0.016\mu, [Ohm / km], \quad (3.8)$$

unde $D_{med} = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}$ - distanța geometrică medie între conductoarele fazelor, m .

Pentru liniile de tensiune joasă cu amplasarea fazelor în vârful triunghiului echilateral cu latura $d = 0.4 m$, reiese că $D_{med} = 0,4 m$; $\mu = \mu_r \mu_0 = 2\pi \cdot 10^{-7} H/m$. Relația (3.6) este aplicabilă doar pentru liniile aeriene. În cazul liniilor în cablu la calcularea inductivității și capacității specifice este

necesar de luat în vedere geometria cablului și parametrii electrici ai izolației. Rezistența inductivă este semnificativ (de 3-5 ori) mai mică decât cea a liniei aeriene, iar capacitatea liniei în cablu este mult mai mare ca a liniei aeriene. Totuși, viteza de propagare a undei electromagnetice în cablu este doar de cca. două ori mai mică ca în linia aeriană.

Pentru conductorul AC 50/8,0 cu diametrul exterior 9.6 mm, deci, $r = 0.00048 \text{ m}$, $d = D_{\text{med}} = 0.4 \text{ m}$ valoarea capacității fazei conform relației (3.8) va avea valoarea $C_0 = 8 \cdot 10^{-12} \text{ F / m}$, sau pentru deschizătura $l_{\text{des}} = 30 \text{ m}$ vom avea capacitatea $C_{\text{des}} = 240 \text{ pF}$.

Din ecuația (3.8) calculăm rezistența inductivă specifică și apoi valoarea inductivității specifice, care este egală cu $L_0 = 1.33948 \cdot 10^{-6} \text{ H / m}$. Inductanța deschizăturii $L_{\text{des}} = 4.018 \cdot 10^{-5} \text{ H}$.

Vom verifica corectitudinea calculului parametrilor specifici ai liniei 0,4 kV prin compararea cu vitezei calculate a undei electromagnetice cu viteza luminii, deci, $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{(1.3394 \cdot 10^{-6})(8 \cdot 10^{-12})}} = 305614415.9 \text{ m / s}$. Valoarea precisă a vitezei luminii $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$, ce ne dă o eroare a calculului sub 2 %, confirmând corectitudinea valorilor calculate ale parametrilor liniari.

În linia aeriană din cablu se manifestă fenomenul de scurgere a curentului capacitiv mai pronunțat ca în linia cu conductoare neizolate. Curentul capacitiv de scurgere la sol din rețeaua de cablu poate fi de 0,7 - 2,8 A / km, în funcție de secțiunea conductorului și de nivelul de tensiune. Valoarea curentului capacitiv de scurgere în linia cu conductoare neizolate aeriene cu tensiunea 10 kV este de 30-50 ori mica ca în cazul liniei aeriene în cablu (din conductoare auto-portante) [85-87]. Din aceste date se poate estima valoarea capacității liniare din relația $I = U \omega C$, de unde

$$C = \frac{I}{\omega U} = \frac{0.7 - 2.8}{314 \cdot 10000} = (0,223 - 0.892) \mu\text{F / km}. \text{ În linia electrică aeriană (conductoare neizolate)}$$

această capacitate va avea valoarea de $C_{\text{LEA}} = (0.00446 - 0.01784) \mu\text{F/km}$. Aceste valori permit recalcularea capacității porțiunii deschizăturii liniei din cabluri auto-portante

$$C_{\text{des.LEC}} = (0.00669 - 0.0267) \mu\text{F} \text{ și liniei aeriene cu conductoare neizolate}$$

$$C_{\text{des.LEA}} = (0.0001338 - 0.000535) \mu\text{F}. \text{ Aceste valori a capacităților se pot include în schema}$$

echivalentă la calcularea regimului în rețeaua de joasă tensiune ca ramuri transversale formate din capacități cu parametri concentrați. Ultimele valori estimate după analogie a deschizăturii liniei

aeriane $C_{des} = (139 - 535) pF$ sunt de același ordin cu valoarea calculată cu aplicarea formulei (3.6)- $C_{des} = 240 pF$ [85-87].

Parametrii sarcinilor distribuite. La determinarea valorilor sarcinilor vom utiliza informația despre ansamblul de receptori caracteristici pentru un consumator individual rezidențial.

În NAIE se indică două praguri a puterii declarate sau solicitate de la furnizor de către consumatorii casnici: 5 kW și 7 kW. Aceste valori corelează cu valorile din tabelul 3.1 (limita de jos). Pentru calculele ulterioare vom utiliza valoarea puterii declarate de 5 kW. Utilizarea acestei valori și a valorii medii a factorului de putere $\cos \varphi_{med} = 0,859 - 0,872$ va corespunde unor valori limită de sus pentru sarcinile racordate la nodurile rețelei.

Parametrii sarcinii se recomandă de calculat cu utilizarea următoarelor relații:

1. $S_S = P_S / \cos \varphi_{med} = 6,43 kVA;$
2. $R_S = \frac{U^2}{P_S \cdot 1000} = \frac{220^2}{6,43 \cdot 1000} = 7,52 Ohm;$
3. $Z_S = \frac{R_S}{\cos \varphi_{med}} = \frac{7,52}{0,872} = 8,64 Ohm;$
4. $X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2} = \sqrt{(8,64)^2 - (7,52)^2} = 4,25 Ohm;$
5. $L_S = \frac{X_S}{\omega} = 0,013 H,$

(3.9)

unde

SS - valoarea aparentă a sarcinii (limita de sus), VA;

P_S - puterea activă absorbită de către sarcină, W;

$\cos \varphi_{med}$ - valoarea medie a factorului de putere a ansamblului de sarcini conectate la rețeaua de alimentare;

R_S - rezistența activă a sarcinii, Ohm;

U - tensiunea efectivă a rețelei de alimentare (valoarea de fază, V;

Z_S - impedanța sarcinii, Ohm;

X_S - rezistența inductivă reactivă a sarcinii, Ohm;

L_S - componenta reactivă a impedanței sarcinii (preponderent inductivă), Ohm;

L_S - inductivitatea sarcinii, H.

Parametrii sursei de alimentare. Pentru a dimensiona principala sursă de alimentare vom utiliza numărul de sarcini racordate la linie ($N_s=12$) și puterea lor aparentă ($S_s=6.43$ kVA, deci, puterea aparentă a unei faze a sursei principale de alimentare este egală cu $S_{FE0} = N \cdot S_s = 11 \cdot 5.75 = 70,73$ kVA.

Puterea aparentă a transformatorului $S_{E0} = 3 \cdot S_{FE0} = 3 \cdot 70,73 = 212,19$ kVA. După scara de putere standard, cel mai apropiat transformator are puterea de 400 kVA. Dar reieșind că se examinează doar un singur fider transformatorul de facto este de puterea 630 kVA.

Transformatoarele cu această putere au pierderile medii pe ansamblu a 10 producători la mers în gol $P_{MG} = 1002$ W, pierderile medii în regim de scurtcircuit $P_{SC} = 7465$ W, tensiunea de scurtcircuit $u_{SC} = 5,5\%$, curentul de mers în gol $i_{MG} = 0.8\%$ [88-90].

Determinarea parametrilor sarcinilor de generare, inclusiv, a sarcinii conectate la intrarea liniei pentru schema echivalentă se face în baza următorului algoritm:

Determinarea puterii nominale a fazei SG la intrarea în linie.

$$S_{F.nom} = \frac{S_{nom}}{m}, [kVA], \text{ unde } m - \text{ număr faze,} \quad (3.10)$$

Tensiunea de fază pe partea de tensiune înaltă

$$U_{F1.nom} = \frac{U_{nom}}{\sqrt{m}}, [kV] \quad (3.11)$$

Valoarea efectivă a curentului de fază în primarul transformatorului

$$I_{F1.nom} = \frac{S_{F.nom} [kVA]}{U_F [kV]}, [A] \quad (3.12)$$

Valoarea efectivă a tensiunii de scurtcircuit a transformatorului

$$U_{SC} = \frac{u_{SC} [\%] \cdot U_{F1.nom} [kV]}{100}, [kV] \quad (3.13)$$

Impedanța de scurtcircuit a transformatorului

$$Z_{SC} = \frac{U_{SC} [V]}{I_{F1.nom} [A]}, [Ohm] \quad (3.14)$$

Pierderile de scurtcircuit raportate la o fază

$$P_{SC.F1} = \frac{P_{SC} [W]}{m}, [W], \text{ unde } m = 3 - \text{ numărul de faze} \quad (3.15)$$

Rezistența activă de scurtcircuit

$$R_{SC} = \frac{P_{SC.F1} [W]}{I_{F1.nom}^2 [A]}, [Ohm] \quad (3.16)$$

Rezistența inductivă de scurtcircuit a transformatorului

$$X_{SC} = \sqrt{Z_{SC.F1}^2 - R_{SC.F1}^2}, [Ohm] \quad (3.17)$$

Calculul rezistenței active și reactive a primarului și secundarului prin distribuirea lor proporțională egală.

$$X_{SC.F1} = X'_{SC.F2} = 0.5X_{SC}, [Ohm]; R_{SC.F1} = R'_{SC.F2} = 0.5R_{SC}, [Ohm] \quad (3.18)$$

Inductivitatea fluxului magnetic de scăpări (dispersie) a primarului și secundarului transformatorului:

$$L_{S1} = L'_{S2} = \frac{X_{S1}}{2\pi f} = \frac{0.5X_{SC}}{2\pi f}, [H]; L_{S2} = L'_{S2} \left(\frac{U_{F2}}{U_{F1}} \right)^2, [H]. \quad (3.19)$$

Curentul de mers în gol a (M.G) a transformatorului

$$I_{MG} = i_{MG} [\%] \cdot 100 \cdot I_{F1.nom}, [A]. \quad (3.20)$$

Impedanța totală a transformatorului la M.G

$$Z_{MG} = \frac{U_{F1.nom} [V]}{I_{MG} [A]}, [Ohm]. \quad (3.21)$$

Pierderi de puteri în regim de M.G raportate la o fază

$$P_{MG.F1} = \frac{P_{MG} [W]}{m}, [W], \text{ unde } m - \text{ număr faze.} \quad (3.22)$$

Rezistența activă a transformatorului în regim de M.G

$$R_{MG} = \frac{P_{MG.F1} [W]}{I_{MG}^2 [A]}, [Ohm]. \quad (3.23)$$

Rezistența reactivă a transformatorului la M.G

$$X_{MG} = \sqrt{Z_{MG}^2 - R_{MG}^2}, [Ohm]. \quad (3.24)$$

Inductivitatea primarului transformatorului

$$L_{MG} = \frac{X_{MG} [Ohm]}{2\pi f [rad / s]}, [H]. \quad (3.25)$$

Rezistența activă și inductanța ramurii de magnetizare a transformatorului

$$R_{\mu} = R_{MG} - R_{SC1}, [Ohm], L_{\mu} = L_{MG} - L_{SC1}, [H], (R_{SC1} \perp R_{MG}; L_{SC1} \perp L_{MG}). \quad (3.26)$$

În baza acestui algoritm, se pot determina parametrii transformatorului pentru utilizare în schema echivalentă de calcul a regimului. Astfel se pot determina valorile schemei echivalente a SGD racordate la rețeaua de alimentare.

Parametrii determinați cu utilizarea algoritmului descris corespund transformatorului de coborâre în schema echivalentă T, în care rezistența de magnetizare activă și reactivă au conexiune în serie. Al doilea moment constă în faptul, că în schema de calcul a rețelei este necesar de utilizat valorile parametrilor raportați la secundarul transformatorului cu păstrarea constantă a evoluției caracteristicii statice $U_2 = f(I_2)$ și pierderile variabile $P_{\text{var}} = f(I)$ a transformatorului. Acestor cerințe corespunde mai bine schema echivalentă de tipul Γ , în care circuitul de magnetizare se prezintă de o conexiune în paralel a rezistenței ce modelează pierderile active constate R_μ și impedanța reactivă ce prezintă fluxul fundamental de magnetizare $X_\mu \equiv L_\mu$.

Caracteristica statică se poate obține prin includerea în ramura cu tensiunea electromotoare a sursei un circuit format din rezistența activă a înfășurărilor și impedanța creată de fluxul magnetic de scăpări, care are o acțiune de impedanță internă a sursei de tensiune. Deoarece, variația tensiunii $U_2 = f(I_2)$ în banda de evoluție a curentului secundarului $I_2 \leq I_{2\text{nom}}$ nu este pronunțată, nu vor varia puternic asupra evoluției curentului I_2 a secundarului și asupra pierderilor în miezul transformatorului, care sunt proporționale tensiunii U_2^2 . Aceasta se poate obține prin utilizarea sursei de generare formată din trei brațe (fig. 3.3a) sau din două brațe (fig. 3.3b).

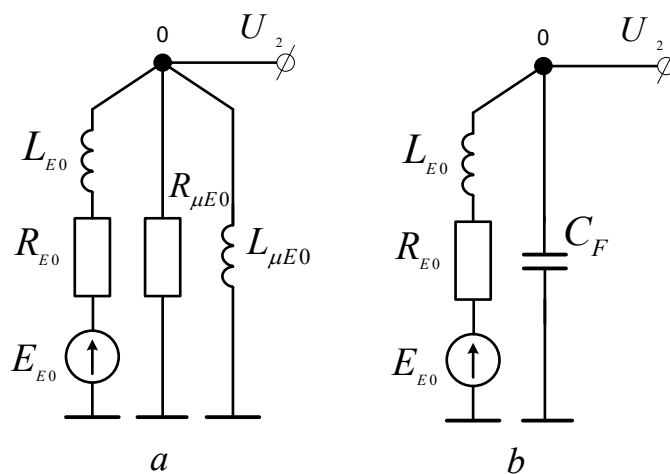


Fig. 3.13. Schema echivalentă a sursei de generare cu topologie cu ramuri paralele cu transformator (a) și inverter fără transformator (b)

Calculul valorilor parametrilor din schema fig. 3.13 pentru transpunerea lor la tensiunea secundarului se poate face prin echivalarea conductivității elementelor în schema paralelă $\frac{1}{R_{\mu p}} + \frac{1}{jX_{\mu p}}$ și în serie $\frac{1}{R_{\mu p}} + \frac{1}{jX_{\mu p}}$, deci, $\frac{1}{R_{\mu p}} + \frac{1}{jX_{\mu p}} = \frac{1}{R_{\mu s} + jX_{\mu s}}$. Din ultima relație se pot determina expresiile pentru calcularea valorilor componentelor circuitului de magnetizare în schema paralelă ($R_{\mu p} \parallel X_{\mu p}$) la tensiunea înfășurării primarului, unde indicele ($\mu s1$) se referă la schema echivalentă de conexiune în serie a $R_{\mu s1}$ și $X_{\mu s1}$:

$$R_{\mu p1} = \frac{R_{\mu s1}^2 + (\omega L_{\mu s1})^2}{R_{\mu s1}}; X_{\mu p1} = \frac{R_{\mu s1}^2 + (\omega L_{\mu s1})^2}{\omega L_{\mu s1}}; L_{\mu p1} = \frac{R_{\mu s1}^2 + (\omega L_{\mu s1})^2}{\omega^2 L_{\mu s1}}. \quad (3.27)$$

Reieșind din destinația transformatorului, transformarea valorilor tensiunii și curentului, și păstrarea pierderilor de energie constante în transformator indiferent de schema echivalentă utilizată pentru prezentarea acestui transformator. Elementele R_{E0} și L_{E0} se referă la pierderile variabile ale transformatorului și asigură caracteristica statică a transformatorului în regim de sarcină. Valoarea componentei active R_{E0} și reactive X_{E0} a cărei echivalent este inductanța L_{E0} creată de fluxul de dispersie în regim de scurtcircuit a transformatorului și aceste componente se transformă în valorile raportate la tensiunea înfășurării secundare cu ajutorul coeficientului de transformare $K_U = \frac{U_{1nom}}{U_{2nom}}$.

$$K_U = \frac{U_{1nom}}{U_{2nom}}.$$

Rezistența activă $R_{E01} \approx R_{SC}$, a cărei valoare se determină cu formula (3.18) și inductivitatea $L_{E01} \approx L_{SC} = \frac{X_{SC}}{\omega}$, unde inductanța reactivă X_{SC} se calculează cu relația (3.19).

Valorile componentelor schemei echivalente (fig. 3.13a) pentru cazul utilizării în calcule a tensiunii secundarului transformatorului se recomandă de recalculat astfel:

$$E_{02} = \frac{E_{01}}{K_U}; R_{E02} = \frac{R_{E01}}{K_U^2}; L_{E02} = \frac{L_{E01}}{K_U^2}; R_{\mu p2} = \frac{R_{\mu p1}}{K_U^2}; L_{\mu p2} = \frac{L_{\mu p1}}{K_U^2}. \quad (3.28)$$

În tabelul 3.1 se prezintă valorile calculate ale parametrilor schemei echivalente (fig. 3.3a) a transformatorului TMΓ 630 kVA pentru circuitul înfășurării primare și secundare pentru

$K_U = 25$ cu parametrii: $S = 630$ kVA, $U_{1n} = 10,0$ kV, $U_{2n} = 0.4$ kV, $i_{M.G} = 0.8\%$, $u_{SC} = 5.5\%$, $P_{M.G} = 1002$ W, $P_{SC} = 7465$ W și transformatorului TMΓ 250 kVA.

Compararea parametrilor transformatorului cu puterea 630 kVA și 250 kVA (tab. 3.3) permite de a constata, că ambele transformatoare au valori comparabile în schema echivalentă de calcul.

Tabelul 3.3. Parametrii schemei echivalente a transformatoarelor
TMΓ 630 kVA și TMΓ 250 kVA

Denumire parametru	E_{0F} , V	$R_{E0} = R_{SC}$, Ohm	$L_{E0} = L_{SC}$, H	$R_{\mu P}$, Ohm	$L_{\mu P}$, H
TMΓ 630 kVA					
Înfășurarea primarului	5774	1,88	0,03	99760,17	64,45
Înfășurarea secundarului	231	0,003	0,0000434	159,62	0,052
TMΓ 250 kVA					
Înfășurarea primarului	5774	5,92	0,054	172523,0	67,49
Înfășurarea secundarului	231	0,00947	0,0000866	276,0	0,0543

Parametrii sursei de generare distribuită în baza SER. SGD în baza SER includ obligatoriu invertoare de tensiune, care asigură transformarea parametrilor primari ai energiei generate în valori racordate cu tensiunea și frecvența rețelei centralizate de alimentare. Invertoarele pot debita direct energia în rețea sau prin injecția ei în primarul unui transformator clasic de putere, care poate fi și un transformator de ridicare conectat la rețeaua de medie sau înaltă tensiune. Instalațiile ce operează cu fluxuri de energie regenerabilă pot avea mai multe trepte de conversie a e.e:

1. (Generator \Rightarrow DC / DC \Rightarrow DC / AC \Rightarrow Transformator \Rightarrow Rețea);
2. (Generator \Rightarrow DC / AC \Rightarrow Transformator \Rightarrow AC / DC \Rightarrow DC / AC \Rightarrow Rețea);
3. (Generator \Rightarrow AC / DC \Rightarrow Filtru \Rightarrow DC / AC \Rightarrow Transformator \Rightarrow Reactor \Rightarrow Rețea), [91-94].

În caz că sursa de generare se conectează la rețea prin transformator monofazat sau trifazat, iar schema echivalentă a acestei surse se poate prezenta după topologia din fig. 3.13a, deci, schema echivalentă a sursei include tensiunea electromotoare E_{02} , impedanța internă din elementele $R_{E0}L_{E0}$ și circuitul format din două ramuri transversale conectate în paralel $R_{\mu E0}L_{\mu E0}$ raportate la parametrii înfășurării secundare ai transformatorului. Vom menționa, că transformatorul poate fi și ridicător. Pentru a racorda parametrii tensiunii surselor regenerabile cu cei ai rețelei se utilizează invertoare de tensiune. Invertoarele se pot conecta direct la rețeaua de distribuție sau cu ajutorul

transformatoarelor. La conectarea cu ajutorul transformatorului valorile parametrilor se vor calcula în baza algoritmului prezentat de relațiile (3.9) - (3.25).

În cazul conexiunii invertorului la rețea după schema fără transformator (fig. 3.13b) [91-94], schema echivalentă a acestei surse de energie de asemenea va include sursa de tensiune electromotoare E_{02} , impedanța internă $R_{E0}L_{E0}$ și ramura transversală formată de un condensator C_F de filtrare a armonicilor superioare de curent generate de către invertor. Valorile parametrilor circuitului $R_{E0}L_{E0}$ de ieșire a invertorului fără transformator se determină din caracteristica statică a invertorului $U_2 = f(I_2)$. Valoarea inductivității de ieșire a acestor invertore are valoarea la nivel de mH și unități de microfarad a filtrului de ieșire. Ca exemplu, în [91-94] se indică aceste valori egale cu $L = 0.7$ mH, iar capacitatea filtrului $C_F = 6.8 \mu F$. Factorul de putere a invertoarelor de tensiune are valoarea $\cos \varphi = 0.7 - 0.8$. [91-94]. În fig. 3.14 se prezintă variante a schemei echivalente a sursei de generarea distribuită în baza SER cu conversia energiei de convertoare a electronicii de putere cu transformator (fig. 3.14a) și la racordarea directă a convertorului la rețeaua electrică centralizată sau ca componentă a micro rețelei (fig. 3.14 b, c).

Invertoarele moderne fără corecția factorului de putere au valoarea acestui parametru $\cos \varphi \geq 0.8$ și randamentul la nivel de $\eta = 99.0\%$ [91-94]. La aplicarea tehnologiei de corecție a factorului de putere (PFC tehnologie) factorul de putere $\cos \varphi \Rightarrow 1.0$ și impedanța internă se poate prezenta ca o rezistență internă fără elemente inductive și capacitive.

Parametrii impedanței interne în schema echivalentă pentru cazul $\cos \varphi \neq 1$ se determină din triunghiul impedanțelor, utilizând formulele din compartimentul III. Pentru cazul, că $\cos \varphi = 1$ rezistența internă R_{GD} pentru invertorul cu tensiunea de ieșire U cu puterea activă P_{nom} , ce va determina luând în considerare randamentul invertorului. Puterea pierderilor proprii a invertorului se calculează cu relația $\Delta P = \eta P_{nom}$ [91-94].

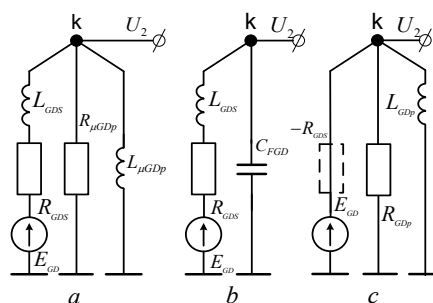


Fig. 3.14. Schema echivalentă a sursei de generare distribuită cu transformator (a) și la conectarea directă cu rețeaua electrică (b) și (c)

În multe cazuri, instalațiile de racordare a SER la rețele și chiar la alimentarea sarcinilor autonome au capacitatea de a stabili tensiunea de ieșire în tot diapazonul de evoluție a curentului debitat în sarcină sau în rețeaua centralizată. Urmare a dirijării forțate, caracteristica statică $U_{iesire} = f(I_S)$ poate avea o tendință de creștere la creșterea curentului de ieșire [91-94]. Aceasta este o particularitate, care trebuie de luat în vedere la întocmirea schemei echivalente a sursei cu invertor de tensiune. Această creștere se poate modela prin introducerea unei valori negative în impedanța interioară a sursei de generare distribuită cu invertor de tensiune, de exemplu, a componentei active ($-R_{GD}$) în fig. 3.14c. Schema de calcul a regimului rețelei va percepe această creștere a tensiunii ca introducerea unei surse suplimentare, deoarece valoarea negativă ($-R_{GD}$) a componentei active a impedanței interne Z_{GD} va asigura o cădere negativă a tensiunii, care la sumarea cu t.e.m E_{GD} a sursei va asigura creșterea tensiunii pe terminalele de ieșire.

În normele tehnice ale instalațiilor electronicii de putere DC/AC cu invertoare de tensiune se stabilesc valorile abaterii admisibile a tensiunii de ieșire la nivel de $\pm 10\%$ de la U_{nom} și variațiile tensiunii de ieșire stabilizată cu o instabilitate totală de $\pm 5\%$ la abaterea tensiunea de intrare și variația curentului de sarcină în limitele specificate cu randamentul de conversie (91-92)%. Invertoarele moderne DC/AC au randamentul (92 - 95)% [99].

Valoarea impedanței interne proprii $Z_{GD.int}$ a sursei de generare distribuită se poate determina în baza caracteristicii statice, pentru care este reglementată valoarea abaterii maxime a tensiunii de la valoarea nominală $\Delta U \leq (\pm 0.05U_{nom})$ pentru curentul nominal I_{nom} , deci obținem ecuația:

$$Z_{GD.int} = \frac{0,05 \cdot U_{nom}}{I_{nom}}. \quad (3.29)$$

Din ecuația (3.29) se poate determina componenta activă a impedanței interne a ursei de generare, în caz că se cunoaște valoarea puterii aparente S_{GD} și a factorului de putere a SGD (tabelul 3.2), $R_{GD} = \frac{0,05 \cdot U_{nom}^2}{S_{GD} \cdot \cos \varphi_{GD}} = \frac{0,05 \cdot 220^2}{6430 \cdot 0,9} = 0,418 \text{ Ohm}$. Componenta reactivă a impedanței interne [100-108].

La determinarea parametrilor schemei echivalente a SGD racordată la rețeaua de distribuție se poate considera că t.e.m. $E_{GD} = const$, iar fenomenul de pierdere de energie în această schemă

să se modeleze cu un rezistor R_{GDp} conectat paralel la bornele sursei de t.e.m. E_{GD} , iar puterea activă echivalentă pierderilor în procesul de conversie să se modeleze cu ajutorul unei inductanțe L_{GDp} sau cu o capacitate C_{GD} , de asemenea conectate paralel la terminalele de ieșire a t.e.m. E_{GD} (fig. 3.14). Cunoașterea puterii pierderilor inverterului P_{GDp} (sau a puterii aparente $S_{GD.nom}$ și factorul de putere $\cos\varphi_{GD}$), a valorii randamentului $\eta = 0,91 - 0,95$ și a tensiunii de ieșire (t.e.m. E_{GD}) ne permite să calculăm valoarea rezistenței schemei R_{GDp} [108-121]:

$$R_{GDp} = \frac{E_{GD}^2}{\eta P_{GD.nom}} = \frac{E_{GD}^2}{\eta S_{GD.nom} \cos\varphi_{GD}}. \quad (3.30)$$

Modelarea REJT cu SD și SGD de tip RL. În scopul efectuării verificării impactului inductivității în REJT cu SGD din SER se efectuează modelarea în MATLAB conform formulelor (3.3 și 3.4) care descriu schema electrică indicată în figura 3.10. Datele calculate se vor indica în tabelul 3.4.

Tabelul 3.4. Date inițiale pentru calculul circuitului RL

Nr.	Denumirea	R, Ω	L, H
1.	LEA-0,4 kV (L=32,5 m)	0,020	$2,5 \cdot 10^{-3}$
2.	LEA-0,2 kV (L=15 m)	0,029	$1,16 \cdot 10^{-3}$
3.	Sarcina, P=5,6 kW	8,643	$1,3 \cdot 10^{-3}$
4.	Invertor pe baza de transformator	0,418	$7 \cdot 10^{-4}$

În schema de calcul considerăm că ieșirea din transformator corespunde standardelor iar inductanța nu influențează circuitul. Tot aici, nu se calculează inverterul deoarece se consideră inverter cu corecție PFC.

Pentru stabilirea impactului circuitului RL asupra calității e.e se propune efectuarea modelării în următoarele regimuri conform curbelor de sarcină și de generare indicate în figura 3.1.

- puterea de generare este egală cu puterea nominală ($P_g = P_n$);
- puterea de generare este mai mare decât puterea nominală ($P_g > P_n$);
- puterea de generare este mai mică decât puterea nominală ($P_g < P_n$).

Stabilim parametrii unei faze pentru a efectua modelarea. Calculul presupune modelarea pentru 11 noduri de consum și generare pentru stabilirea impactului asupra profilului tensiunii.

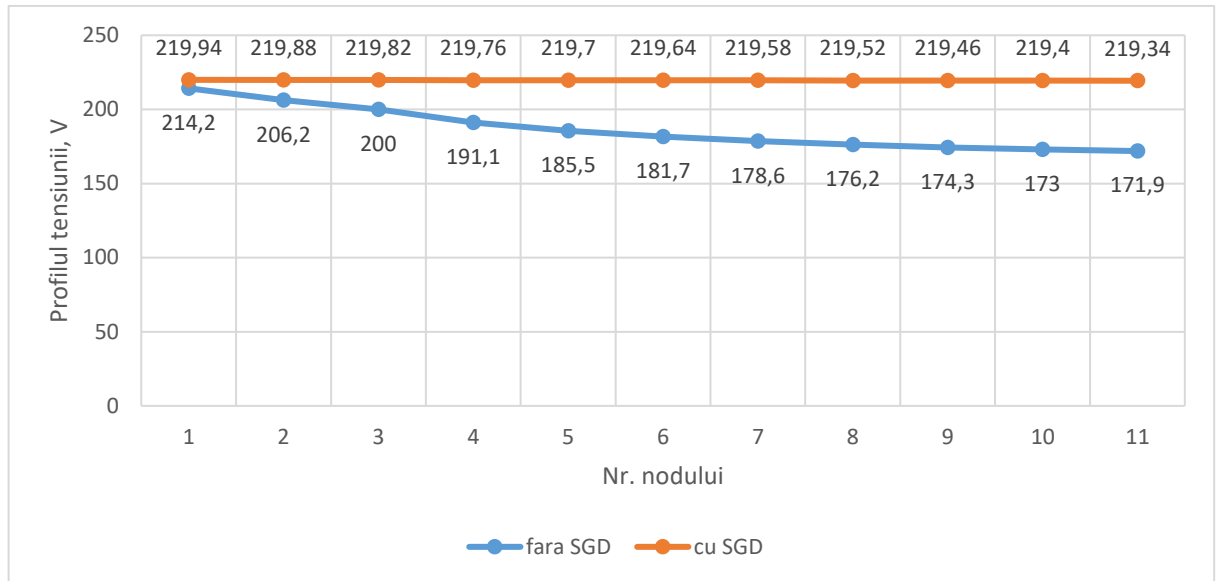


Fig. 3.15. Rezultatele calculului profilului tensiunii în nodurile cu receptori RL

În figura 3.15 este indicată valoarea profilului de tensiune (volți) dintr-o singură fază cu receptori de tip RL conform tabelului 3.4. Stabilim că programa indică valori de calcul comparabile. Așadar, în scopul stabilirii formei de tensiune în noduri indicăm rezultatele modelului în figura 3.16.

În figura 3.15 este indicat modelul, care corespunde $P_g = P_c$ ($P=5600\text{ W}$). Din rezultatele modelării se stabilesc profilurile de tensiune cu SGD ce au valori de la $U=220 - U=219,34\text{ V}$, iar fără SGD valorile profilurilor de tensiune corespund profilurilor de tensiune $220 - 171,9\text{ V}$.

În scopul indicării rezultatului în figura 3.16 se indică valoarea profilului de tensiune calculat conform modelului elaborat. Pentru indicarea formei se vor prezenta rezultatele modelate în nodul 1. Figura 3.16 ilustrează regimul $P_c = 5600\text{ W}$. Tensiunea în nod este de $U=214,2\text{ V}$.

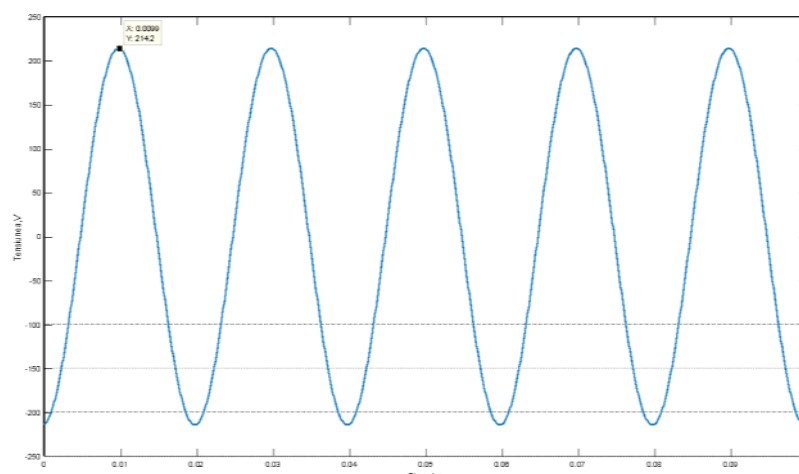


Fig. 3.16. Forma curbei profilului de tensiune în nodul 1 (fără SGD)

Cunoscând valoare de referință ($U_1=220 V$), stabilim că pentru modelul de calcul cu SGD, valoare profilului de tensiune este de $U=214, 2 V$. În acest sens, aplicăm modelul elaborat și obținem rezultatele din nodul 1 cu SGD (Figura 3.17). Acestea reprezintă căderea de tensiune.

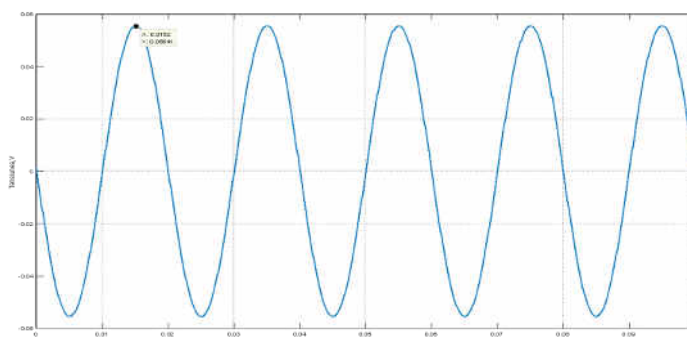


Fig. 3.17. Forma curbei profilului căderii de tensiune în nodul 1 (cu SGD)

Modelul matematic analizat permite stabilirea valorilor tensiunii și modelării curbei acesteia în orice nod al rețelei electrice în baza rezistenței și inductanței cunoscute. Căderea de ($U=0.0554 V$) în nodul se datorează pierderilor în rețeaua electrică. În lipsa examinării inductanței sarcinii și a REJT valorile de generare sunt compensate din SGD în comun cu pierderile în nod, iar datele indică $U=0$ (zero). Includerea în calcul a impedanței conform modelului propus sporește precizia de calcul și indică forma tensiunii analizate.

În figura 3.18 indicăm valoarea medie a profilului de tensiune fără surse de generare: $U_c=189,39 V$ și cu surse de generare distribuită $U=219,7 V$.

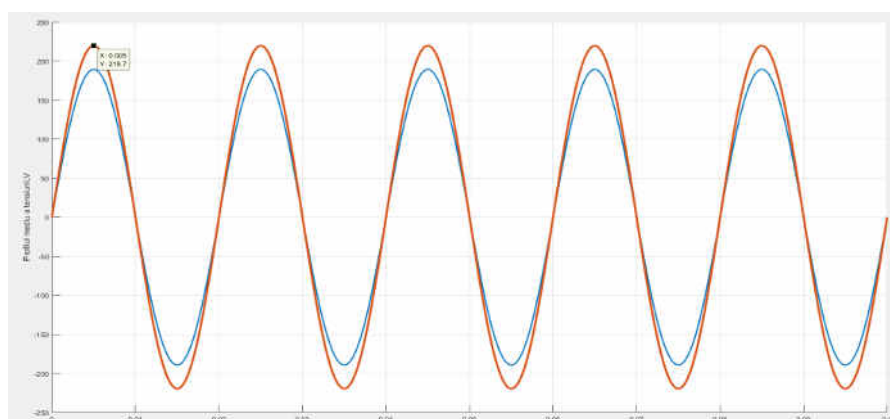


Fig. 3.18. Valoarea medie a profilului de tensiune cu $P=5,6 kW$

Consumul și generarea concomitentă din surse distribuite cu puterea de consum egală cu puterea de generare în care se calculează și cu inductanța rețelei ce indică o pierdere nesemnificativă a profilului de tensiune. Profilul prezentat cu SGD este unul normativ, iar SGD au sarcina de diminuare a pierderilor indiferent de numărul conectate.

3.3. Calculul rețelei electrice cu sarcini și surse de generare distribuite cu tensiunea $U=380\text{ V}$ în diferite regimuri de funcționare

Regim simetric. Considerăm o rețea electrică cu tensiunea de $U=380\text{ V}$, cu surse și consumatori de energie care funcționează concomitent. Modelul presupune studiul consumului trifazat simetric pe care se conectează SD și SGD în regim de funcționare concomitent.

Modelul prevede conectarea în fiecare fază a câte 11 consumatori cu impedanța egale (în total primim 33 consumatori). Aparatele de măsură se vor conecta în nodul 11 din fiecare fază pentru stabilirea valorilor tensiunii. Modelul grafic va prezenta valorile eficace ale curbelor de curent și tensiune din nodul 11 ale fiecărei faze. Valorile reale sunt indicate de parametrul RMS indicat pe interfața modelului de măsurare. Spre exemplu, în graficul din figura 3.19 este indicată valoarea eficace a tensiunii egală cu $U_{eficace}=284,20\text{ V}$ ceea ce corespunde valorii reale de $U_{RMS}=200,96\text{ V}$.

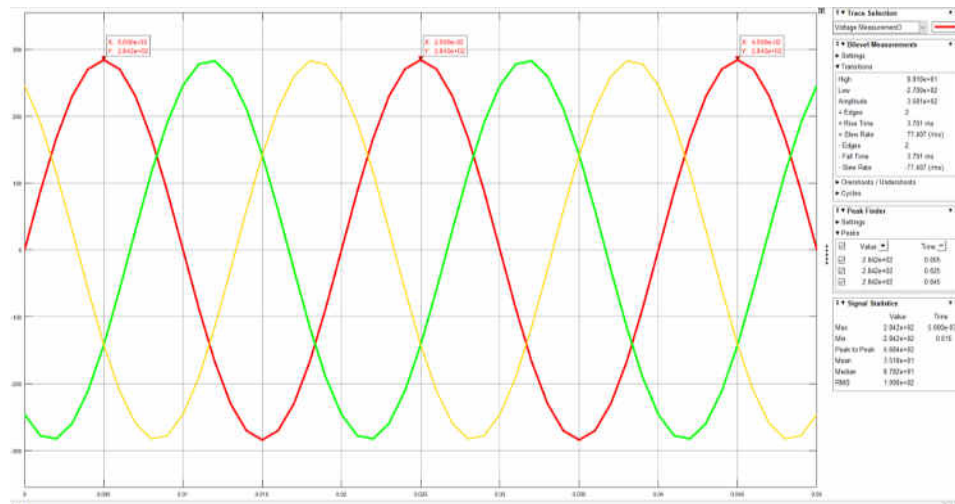


Fig.3.19. Curba tensiunilor de linie din nodul 11 a circuitului trifazat simetric $U=380\text{ V}$ (faza C) pentru $P=5,6\text{ kW}$

În figura 3.19 modelul corespunde sarcinii simetrice, sistemul de conectare este TNC (Tera Neutru Concentrat) cu punere la pământ cu firul nul conectat la neutrul transformatorului și legat la pământ (schema de conexiune a transformatorului (Y_0)).

Considerăm generarea din surse SER egală cu puterea consumată pentru în fiecare nod iar în nodul 11 efectuăm măsurarea (figura 3.19).

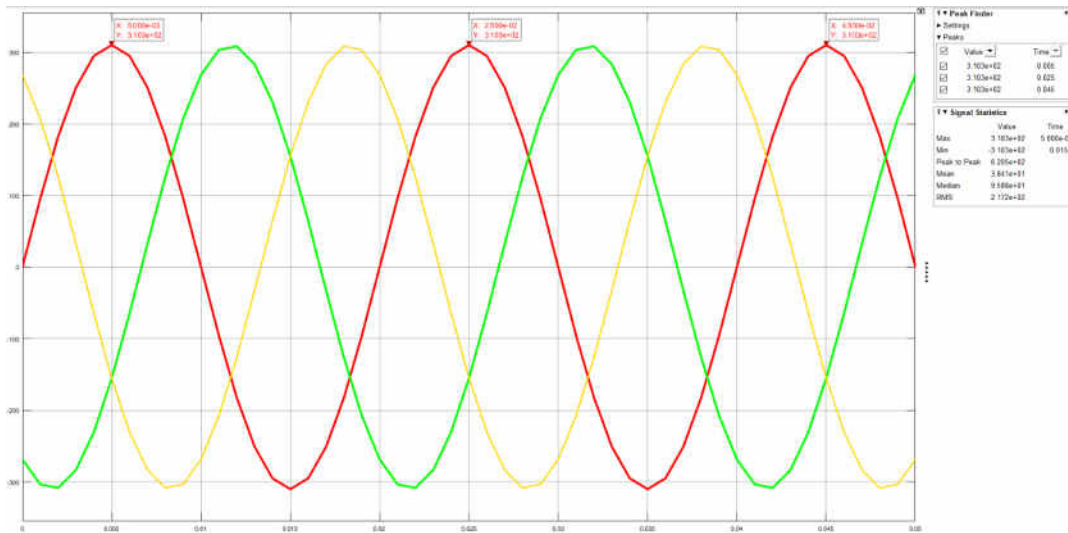


Fig.3.20. Curba tensiunilor de linie din nodul 11 a circuitului trifazat simetric cu GD $U=380\text{ V}$ (faza C) pentru $P=5,6\text{ kW}$

Tensiunea eficace în figura 3.19 în nodul 11 cu sarcina $P_c=5,6\text{ kW}$ și conectate SGD cu puterea $P_g=5,6\text{ kW}$ corespunde valorilor $U_{eficace}=310,3$ ceea ce corespunde valorii reale de $U_{RMS}=217,2\text{ V}$. Diferența de $U=2,8\text{ V}$ reprezintă pierderile care apar în rețeaua electrică.

Regim nesimetric. Considerăm că faza s-a deconectat ($U_C=0\text{ V}$). În așa mod stabilim regimul de funcționare a rețelei electrice și anume valorile tensiunii în nodul 11. Tensiunile $U_A=U_B$ indică valori $U_{RMS(A-B)}=177,72\text{ V}$, iar în faza U_c circulă tensiunea de $U_{RMS(C)}=67,17\text{ V}$ (figura 3.11).

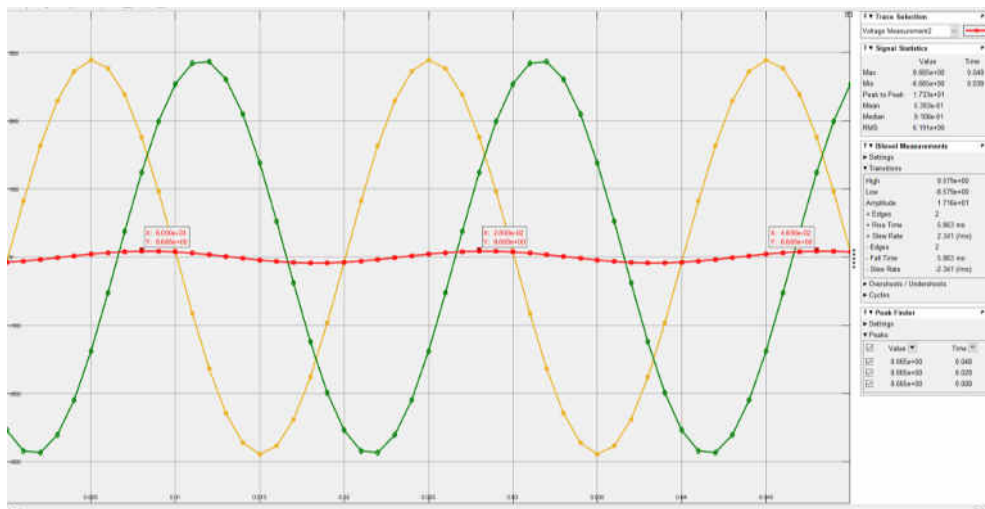


Fig.3.21. Curba tensiunilor de linie din nodul 11 a circuitului trifazat $U=380\text{ V}$ (faza C $U_C=0\text{ V}$) pentru $P=5,6\text{ kW}$

În modelul propus conectăm SGD cu $P=5,6\text{ kW}$ în toate fazele egal și obținem fazele din figura 3.21. Tensiunea în nodul 11, cu conectarea SGD indică valori $U_{RMS(A-B)}=220\text{ V}$ ($U_A=U_B$), iar în faza U_c circulă tensiunea de $U_{RMS(C)}=220\text{ V}$ (figura 3.12).

Datorită faptului generării trifazate și conectării tensiunii în nodul 11, rețeaua lucrează în regim insular și pierderile sunt acoperite din generarea din nod. În acest model firul nul este conectat și echilibrează sarcina.

Tensiunea în nodul 11 a fazei U_C corespunde tensiunii generate de SGD în acel nod. Este un factor pozitiv pentru asigurarea calității e.e din nodul 11.



Fig.3.22. Curba tensiunilor de linie din nodul 11 a circuitului trifazat cu SGD $U=380\text{ V}$ (faza C $U_C=0\text{ V}$) pentru $P=5,6\text{ kW}$

O altă problemă care necesită a fi examinată este impactul SGD cu $U_C=0\text{ V}$ și cu neutrul deconectat. Rezultatele modelării indică următoarele valori ale tensiunii $U_{RMS(A-B)}=264,41\text{ V}$, iar tensiunea $U_{RMS(C)}=146,67\text{ V}$.



Fig.3.23. Curba tensiunilor de linie din nodul 11 a circuitului trifazat nesimetric cu SGD conectate și cu firul nul deconectat $U=380\text{ V}$ (faza C) pentru $P=5,6\text{ kW}$

3.4. Estimarea impactului variabilelor independente asupra corectitudinii restabilirii semnalului ne-sinusoidal

Rețelele electrice sunt poluate de armonici superioare de curent și tensiune condiționate de prezența sarcinilor neliniare. Gradul de poluare este caracterizat de coeficientul de distorsiune. armonicile superioare sunt caracterizate de amplitudine și faza. Calcularea regimului circuitului se poate realiza, considerând că este cunoscut spectrul armonicilor în baza principiului de

superpoziție. de fapt prin aceasta se face o liniarizare a circuitului și avem posibilitatea de a utiliza metodele clasice de calcul ale bazelor teoretice ale electrotehnicii. Cel mai frecvent este cunoscut spectrul, dar nu sunt cunoscute fazele armonicilor superioare. În acest context vom formula problema estimării influenței fazei armonicilor superioare asupra formei semnalului sinusoidal primar, având ca scop determinarea condițiilor, când se poate neglija al doilea parametru (faza) analiza indicilor de calitate a energiei în rețelele electrice.

Procedura de analiză are la bază reconstruirea formei semnalului etalon în baza spectrului cunoscut. Pentru aceasta se utilizează două forme a semnalului periodic: de formă dreptunghiulară și cu forma de triunghi. Pentru aceste semnale spectru se poate prezenta în formă analitică

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n).$$

În baza spectrului cunoscut vom restabili forma semnalului pentru

diferite lungimi ale șirului de armonici superioare, inclusiv cu varierea fazei armonicilor superioare. În calitate de criteriu al preciziei restabilirii vom utiliza coeficientul de determinare R^2 al formei semnalului etalon prezentat în formă discretă cu pasul de discretizare în timp Δt și al semnalului restabilit pentru aceleași puncte pe axa timpului. Astfel vom opera cu două serii de mărimi, pentru care se calculează coeficientul de corelare și coeficientul R^2 . În figura 3.24 se prezintă exemple de restabilire a formei semnalului dreptunghiular și cu forma de triunghi pentru diferite ansambluri de armonici superioare luate în considerare.

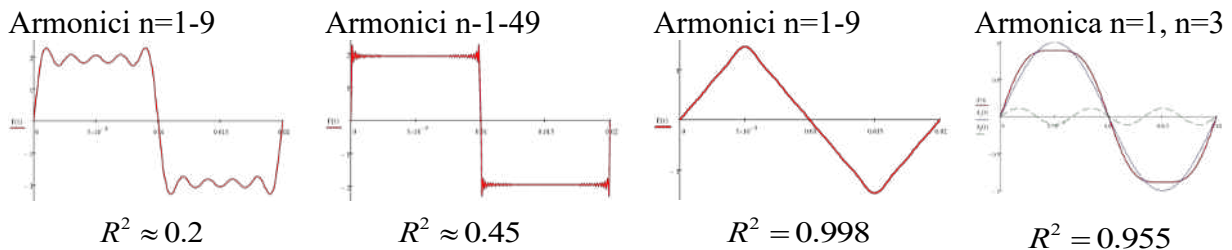


Fig. 3.24. Forma restabilită a semnalului inițial

Pentru a sesiza trendul, calculele privind impactul fazei inițiale ale armonicilor superioare asupra corectitudinii restabilirii semnalelor inițiale s-a efectuat pentru armonicile impare 3, 5, 7 și 9 și varierea discretă a fazei inițiale cu pasul de 30 grade electrice, deci pentru patru valori $\varphi = 0^0, 30^0, 60^0, 90^0$. Valoarea recalcularea *coeficientul de determinare* R^2 pentru fiecare caz in parte(fig. 3.24).



Fig. 3.25. Diagrama variației coeficientul de determinare R^2 în funcție de numărul armonicilor luate în calcul

Gradul de influență a fazei inițiale ale armonicilor superioare depinde de numărul armonicilor superioare și cu creșterea valorii acestui indicator se micșorează. Cea mai puternică influență este caracteristică pentru armonicile cu frecvența apropiată de frecvența armonicilor fundamentale. Ca factor semnificativ se prezintă amplitudinile armonicilor superioare din spectru.

În figura 3.25 se prezintă date informații privind influența defazajului de fază asupra preciziei restabilirii semnalului etalon de formă triunghi.

3.5. Concluzii la capitolul III

1. Utilizarea conceptului de superpoziție la analiza regimului circuitelor multifilare de joasă tensiune cu sarcini și surse distribuite, modelate în programul MATLAB indică la posibilitatea utilizării acestei metode pentru stabilirea impactului SD, iar rezultatele modelării indică profilele de tensiune în fiecare nod în care rețeaua SD generează concomitent cu consumul. Aceasta oferă posibilitatea utilizării metodei la etapa de prefizabilitate, la proiectarea rețelelor electrice.

2. Verificarea conceptului de superpoziție la analiza regimului circuitelor multifilare de joasă tensiune cu sarcini și surse distribuite propus se definește în figura 3.7. prin ce se demonstrează funcționalitatea acesteia și posibilitatea utilizării la calculul impactului la studiu de prefizabilitate a rețelei electrice.

3. Forma curbei profilului de tensiune în nod în dependență de receptorii neliniari reali ale rețelei, evaluate în baza particularităților rețelei electrice cu surse neliniare și generare distribuită concomitent, indică mici devieri ceea ce reprezintă un impact minor asupra rețelei, și corespunde sinusoidei clasice. Metoda propusă de analiză este posibil de utilizat pentru stabilirea impactului surselor neliniare, asupra formei curbei de tensiune la etapele de prefizabilitate, iar profilul tensiunii din nod indică valoarea care poate fi luată în cadrul studiilor de prefizabilitate la proiectarea rețelelor de joasă tensiune cu generare și consum concomitent.

4. Se stabilește un impact negativ asupra profilului tensiunii din nod în cazul deconectării firului nul, în regim nesimetric apar creșteri nedorite a profilului de tensiune în nodurile alăturate.

5. În urma estimărilor a gradului de influență a parametrilor ce caracterizează spectrul armonic asupra corectitudinii restabilirii semnalului ne-sinusoidal sa stabilit că corectitudinea restabilirii semnalului ne-sinusoidal depinde de numărul armonicilor luate în calcul, deoarece cu precizia restabilirii crește numărul de armonici utilizate. Ca factor semnificativ se prezinta amplitudinile armonicilor superioare din spectru, iar impactul fazei armonicilor se diminuează cu creșterea rangului armonicii superioare.

CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI

În urma elaborării tezei au fost înaintate propuneri de soluționare a problemei științifice privind impactul SGD asupra calității energiei electrice prin elaborarea metodologiilor de calcul a profilului de tensiune în REJT în diferite regimuri de funcționare ca indicatori al calității e.e. în rețelele menționate în funcție de puterile de generare și consum dictate de curbele consumatorilor.

1. A fost elaborat conceptul și metodologia de calcul pentru cercetarea regimului rețelei de joasă tensiune cu surse și sarcini distribuite, similară topologiei reale a rețelei trifazate, prin aplicarea procedurii de calcul a curenților și căderii tensiunii pe fiecare element al circuitului conform primei teoreme a lui Kirchhoff și a legii lui Ohm, care are scopul de stabilirea profilului tensiunii în nodurile rețelei. În urma modelării matematice în mediul MATLAB s-a constatat utilitatea metodei și s-a stabilit că aceasta poate fi utilizată la proiectarea rețelelor electrice de joasă tensiune cu generare și consum concomitent din surse distribuite la etapa de fezabilitate.

2. A fost elaborat modelul matematic a rețelei electrice cu surse și sarcini distribuite aplicând conceptul de decompoziție a circuitului trifazat cu substituirea elementelor neliniare cu componente liniare. Avantajul modelului de calcul propus permite stabilirea impactului generării distribuite și consumului concomitent atât a regimurilor permanente, cât și a regimurilor tranzitorii. Concomitent se pot realiza calcule estimative a valorilor coeficienților de distorsiune a profilului tensiunii și curentului în fiecare nod al rețelei de alimentare fără a face măsurători directe. În așa mod, modelările unei rețele reale în baza unei programe elaborate în MATLAB a stabilit utilitatea modelului de calcul propus și a indicat forma profilului de tensiuni din nodurile examinate, iar rezultatele pot fi utilizate ca indicator de impact în urma cercetării.

3. S-a argumentat că utilizarea unui spectru limitat de armonici superioare poate fi utilizat la stabilirea impactului elementelor neliniare din rețele electrice cu sarcini și surse distribuite conectate concomitent. Această reiese din analiza estimării bandei de frecvență a spectrului evaluat după criteriile de limitare a cotei puterii armonicilor superioare și/sau a distorsiunii curbei de variație în timp a amplitudinii armonicilor menționate al spectrului de ordinul k . Raportul caracterizează cota de putere care revine armonicilor de ordinul k și se micșorează odată cu creșterea valorii ordinului armonicilor.

4. S-a stabilit valoarea coeficientului de determinare R^2 pentru valori $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ale armonicilor impare 3, 5, 7 și 9 pentru variația discretă a fazei cu 30 de grade electrice care corespunde valorilor : 1) semnal dreptunghiular (armonica 1-3) - $R^2 = 0,998$ și (armonica 1 - 49) - $R^2 = 0,45$; 2) semnal triunghiular (armonica 1-9) - $R^2 = 0,2$ și (armonica 1

- 3) - $R^2 - 0955$, ceea ce permite simplificarea analizei de impact a surselor neliniare asupra calității e.e în REJT.

5. Impactul generării distribuite și consumului concomitent asupra calității e.e a fost examinat în circuit ținând cont de parametrii RL pentru a stabili impactul SGD asupra profilului tensiunii. În așa mod, s-a obținut valorile profilului de tensiune (fără SGD – 19,91 %, cu SGD – (0,13%)), dar rezultatele indică și forma curbei care este neschimbată, ceea ce este un impact pozitiv și regim recomandat de funcționare ($P_g=P_n$), indiferent de SGD (fotovoltaică sau eoliană).

Așadar, în baza cercetării efectuate a rezultatelor obținute privind stabilirea impactului SGD care funcționează concomitent cu SD în rețelele electrice **se recomandă:**

1. În contextul examinării impactului generării distribuite asupra calității e.e se recomandă utilizarea termenului de „*profil al tensiunii*” ceea ce reprezintă examinarea variației tensiunii de-a lungul rețelei electrice, iar analiza efectuată indică că, profilul tensiunii se poate examina în diferite regimuri, indiferent de curba de sarcină și consum, ceea ce este actual pentru sursele verzi de energie;

2. La etapa de cercetare a impactului SGD cu SD concomitente conectate în REJT, ca element al analizei de recomandă utilizarea procedurii de calcul al regimului staționar a rețelei electrice arborescente, iar pentru stabilirea unei precizii matematice înalte (ideale) și formei de tensiune de utilizat metoda de calcul a regimului tranzitoriu.

3. În timpul evaluării impactului sarcinilor neliniare asupra rețelelor electrice cu GD asupra formei curbei de tensiune din nodul rețelei de utilizat ansambluri de circuite active și pasive, iar caracteristică generalizată să fie similară caracteristicii reacției elementului neliniar după spectrul de armonici generate. Numărul acestor circuite trebuie să fie egal cu numărul armonicilor superioare luate în calcul pentru fiecare nod de racord a sarcinii neliniare conectate la rețea.

4. Pentru o analiză a impactului GD asupra calității e.e se vor neglija puterile aparente a armonicilor superioare transmise de GD în comparație cu valoarea puterii aparente a armonicii fundamentale, necăutând la faptul că există o dependență liniară și proporțională a valorilor coeficienților de distorsiune de curent și tensiune în funcție de puterea aparentă a armonicii fundamentale în fazele rețelei de alimentare.

5. Regimul recomandat optim pentru stabilirea profilului de tensiune și a formei tensiunii cu SGD și SD în REJT cu neliniarități este recomandat ($P_g=P_n$).

BIBLIOGRAFIE

1. Геворкян, Сергей Георгиевич. *Первые исследователи электричества: от Уильяма Гильберта до Михаила Ломоносова*. Пространство и Время, 2011, № 4, pp. 43а-53.
2. Anderson, James A. (2008). "'Treacherous Factions': Shifting Frontier Alliances in the Breakdown of Sino-Vietnamese Relations on the Eve of the 1075 Border War", in *Battlefronts Real and Imagined: War, Border, and Identity in the Chinese Middle Period*, pp. 191–226. Edited by Don J. Wyatt. New York: Palgrave MacMillan. ISBN 978-1-4039-6084-9.
3. Grant, Edward. *Peter Peregrinus*, Dictionary of Scientific Biography. New York: Scribners, 1975, vol. 10, p. 532. Thomson, Ron B. *Peter Peregrinus*, in *Medieval Science, Technology and Medicine: An Encyclopedia*, edited by Thomas Glick et al. New York and London: Routledge, 2005, pp. 388-389.
4. Benge, Janet, Benge, Geoff. *Christopher Columbus: Across the Ocean Sea*. YWAM Publishing, 2005. ISBN 978-1-932096-23-1.
5. *Большая советская энциклопедия: в 30 т.* / Гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. Москва: Сов. энцикл., 1969–1978.
6. Robbins, R. H. *Browne, Sir Thomas (1605–1682)*, Oxford Dictionary of National Biography, Oxford University Press, 2004; online edition, May 2008, accessed 16 February 2013.
7. Berzan, Vladimir. *ELECTROFIZICA ŞI ENERGETICA*. Chişinău, 2014. – 262 p.
8. Agassi, Joseph. *Faraday as a Natural Philosopher*. Chicago: University of Chicago Press, 1971.
9. Сайфутдинова, Г.Б., Лившиц, С.А., Усачев, С.С. *История и перспективы развития электрических сетей*. Казанский государственный энергетический университет.
10. *Витебск. Энциклопедический справочник*. Минск: Изд. БелСЭ, 1988.
11. Козелков, О.В., Козелкова, В.О., Хакимов, А.Р., Ширеков, А.А. *Трансляция электроэнергии: история развития и перспективы*. Вестник современной науки, 2015, № 10, ISSN 2410-2563.
12. Прилепская, Людмила Львовна. *Энергоресурсы и наследие Н. Теслы*. Вестник КузГТУ, 2013, № 2, pp. 157-161.
13. Доливо-Добровольский, М.О. *Избранные труды (О трёхфазном токе)*. Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1948.
14. Guarnieri, M. (2013). "Who Invented the Transformer?". *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7 (4): 56–59. DOI: 10.1109/MIE.2013.2283834. S2CID 27936000.
15. Баранов, М.И. *Эмилий Христианович Ленц — один из основоположников науки об электромагнетизме*. Электротехника і Електромеханіка, 2006, № 3.
16. Russian Federation: Nuclear Power Reactors. *Power Reactor Information System*. IAEA. Disponibil la: <https://www.iaea.org/pris/> [accesat 20.02.2023].
17. Скороходова, О.Н. От конфронтации к сотрудничеству: становление новой модели экономических отношений США и стран — членов ОПЕК (1973–1978). *Вестник Московского университета. Серия 8: История*, 2013, № 6.
18. Герасимов, Г.А. şi Фигге, Д. Чернобыль: двадцать лет спустя. *КЭТ*, 2006, № 2, p. 5–14.
19. Алихаджиева, А.С. Киотский протокол: достоинства и недостатки. *Общество и право*, 2005, № 4(10), p. 91–92.
20. U.S. Department of Energy. 6 Charts that Will Make You Optimistic About America's Clean Energy Future. *Energy.gov*. 13 noiembrie 2015. Disponibil la: <https://www.energy.gov> [accesat 20.02.2023].

21. U.S. Department of Energy. The Future Arrives for Five Clean Energy Technologies – 2015 Update. Noiembrie 2015. Disponibil la: <https://www.energy.gov> [accesat 20.02.2023].
22. Pulling Ahead on Clean Technology: China's 13th Five Year Plan Challenges Europe's Low Carbon Competitiveness. *Briefing Paper*, martie 2016.
23. Department of Energy & Climate Change. Energy Trends March 2016. 31 martie 2016. Disponibil la: <https://www.gov.uk/government/collections/energy-trends> [accesat 20.02.2023].
24. Chabot, Bernard. Analysis of electricity production in the EU in 2015 with a focus on renewables.
25. European Commission. *EU energy in figures: Statistical pocketbook 2015*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
26. IEA analysis shows energy-related emissions of CO2 stalled for the second year in a row as renewable energy surged. Paris, 6 martie 2016.
27. Enerdata. Disponibil la: <https://www.enerdata.net/> (accesat 20.02.2023).
28. Фролов, А.С., și Рыбкина, Е.А. Развитие малой энергетики как шаг к ресурсно-инновационному развитию страны. *ВЭПС*, 2018, № 1. Disponibil la: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-maloy-energetiki-kak-shag-k-resursno-innovatsionnomu-razvitiyu-strany> (accesat 11.08.2021).
29. Афонин, В.С., Васьков, А.Г., Дерюгина, Г.В., Тягунов, М.Г., și Шестопалова, Т.А. Системные свойства гибридных энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии. *Энергобезопасность и энергосбережение*, 2012, № 2. Disponibil la: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnye-svoystva-gibridnyh-energokompleksov-na-osnove-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii> [accesat 11.08.2021].
30. Судавный, А.С. Развитие когенерации в контексте концепции интеллектуального распределения. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2014, № 8. Disponibil la: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-kogeneratsii-v-kontekste-kontseptsiiii-intellektualnogo-raspredeleniya> [accesat 11.08.2021].
31. Виноградов, А.В., și Васильев, А.Н. Потребности и задачи реализации проектов распределённой энергетики в агрохолдингах. *Вестник КГЭУ*, 2019, № 3(43). Disponibil la: <https://cyberleninka.ru/article/n/potrebnosti-i-zadachi-realizatsii-proektov-raspredelyonnoy-energetiki-v-agroholdingah> [accesat 11.08.2021].
32. Федоров, В.К., Татевосян, А.С., Сангов, М.М., și Тажиев, Р.Т. Проблемы и перспективы использования возобновляемых источников энергии. *Национальные приоритеты России*, 2017, № 5(27). Disponibil la: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-ispolzovaniya-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-1> [accesat 11.08.2021].
33. Сухов, А.А., și Стушкина, Н.А. Модернизация систем электроснабжения сельских потребителей путем внедрения распределенной генерации. *Агроинженерия*, 2018, № 5(87). Disponibil la: <https://cyberleninka.ru/article/n/modernizatsiya-sistem-elektrosnabzheniya-selskih-potrebiteley-putem-vnedreniya-raspredelennoy-generatsii> [accesat 11.08.2021].
34. Куликов, А.Л., Осокин, В.Л., și Папков, Б.В. Проблемы и особенности распределённой электроэнергетики. *Вестник НГИЭИ*, 2018, № 11(90). Disponibil la: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-osobennosti-raspredelyonnoy-elektroenergetiki> [accesat 11.08.2021].
35. Булатов, Ю.Н., Крюков, А.В., și Алексеенко, Е.А. Моделирование аварийных режимов в системах электроснабжения с установками распределенной генерации. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2017, № 1(5). Disponibil la:

<https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-avariynyh-rezhimov-v-sistemah-elektrosnabzheniya-s-ustanovkami-raspredelennoy-generatsii> [accesat 11.08.2021].

36. Булатов, Ю.Н., și Крюков, А.В. Мультиагентная система управления установками распределённой генерации. *Известия вузов. Проблемы энергетики*, 2015, № 11-12. Disponibil la: <https://cyberleninka.ru/article/n/multiagentnaya-sistema-upravleniya-ustanovkami-raspredelyonnoy-generatsii> [accesat 11.08.2021].

37. Постолатий, В.М., Быкова, Е.В., Киорсак, М. Развитие генерирующих мощностей в Молдавской энергосистеме на базе использования парогазовых установок. În: *Управляемые электропередачи Лаборатория управляемых электропередач 35 лет (1972 – 2007)*, Chișinău, Republica Moldova, Институт энергетики, 2007, pp. 65-74. ISBN 978-9975-62-194-6.

38. Calitatea energiei electrice - probleme armonici. Disponibil la: <https://senys.ro/calitatea-energiei-electrice-probleme-armonici/> [accesat 22.02.2023].

39. Chiorsac, M., Terteza, Gh., și Turcuman, L. *Bazele Teoretice ale Electrotehnicii*. Chișinău: Editura "Tehnica-UTM", 2019.

40. Демирчян, К.С., Нейман, Л.Р., Коровкин, Н.В., și Чечурин, В.Л. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Том 1. 4-е изд. Санкт-Петербург: Питер, 2003. 463 с. ISBN 5-94723-620-6.

41. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. 11-е издание. Москва: Гардарики, 2007. 701 с. ISBN 5-8297-0159-6.

42. Potâng, A. *Analiza circuitelor electrice liniare în regim periodic sinusoidal și nesinusoidal: Ciclul de prelegeri*. Chișinău: Tehnica-UTM, 2018. 196 p.

43. Potâng, A., și Todos, P. *Electrotehnică generală : curs teoretic*. Chișinău: UTM, 2007. 465 p.

44. Svoboda, J.A., și Dorf, R.C. *Introduction to Electric Circuits*. John Wiley & Sons, 2013.

45. Erhan, F. *Bazele teoretice ale electrotehnicii*. Chișinău: Centrul Editorial al U.A.S.M., 2009. ISBN 978-9975-64-145-6.

46. Косарев, Б.А., și Федоров, В.К. Модель электротехнической системы с распределенной генерацией. *ОЭВ*, 2019, № 5(167). Disponibil la: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-elektrotehnicheskoy-sistemy-s-raspredelennoy-generatsiey> [accesat 01.11.2021].

47. Ackermann, T., Andersson, G., și Söder, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, 2001, 57, pp. 195–204.

48. Coster, E.J. *Distribution Grid Operation Including Distributed Generation*. ISBN 978-90-386-2289-7.

49. Järventausta, P., Repo, S., Rautiainen, A., și Partanen, J. Smart grid power system control in distributed generation environment. *Annual Reviews in Control*, 2010, 34, pp. 277–286.

50. Greacen, C., Engel, R., și Quetchenbach, T. *A Guidebook on Grid Interconnection and Islanded Operation of Mini-Grid Power Systems Up to 200 kW*. LBNL 6224E.

51. Nautilus Institute for Security and Sustainability. *Integrating Mini Grids Into National Grids: Technical And Organizational Aspects*. 22 septembrie 2020. Disponibil la: <https://nautilus.org/napsnet/napsnet-special-reports/integrating-mini-grids-into-national-grids-technical-and-organizational-aspects/?view=pdf> [accesat 23.02.2023].

52. *Ingineria Calității Produselor Metalurgice. Note de curs*. Disponibil la: <http://www.sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/Gheorghiu-ICPM.pdf>

53. Стенников, В.А., și Воропай, Н.И. Централизованная и распределенная генерация – не альтернатива а интеграция.
54. Рогов, Г.В. *Комплексное повышение качества электроэнергии в сложных сетях*. Известия ТПУ, 2013, № 4.
55. Хацевский, К.В., Денчик, Ю.М., Клеутин, В.И., Зубанов, Д.А., Бубнов, А.В., Харламов, В.В. *Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения*. ОНВ, 2012, № 2(110), pp. 212–214.
56. Ананичева, С.С., Алексеев, А.А., și Мызин, А.Л. *Качество Электроэнергии Регулирование Напряжения И Частоты В Энергосистемах*. Екатеринбург: УрФУ, 2012.
57. ГОСТ 13109-97. *Энергия электрическая. Совместимость технических средств. Нормы качества энергии в системах питания с э. э. распределения общего назначения*.
58. ГОСТР 53333-2008. *Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная; Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения*.
59. SR EN 50160. *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*.
60. LEGE Nr. 1525 din 19.02.1998 *cu privire la energetică*. Publicat: 04.06.1998 în Monitorul Oficial Nr. 50-51 art Nr: 366, Data intrării în vigoare: 04.06.1998.
61. *Instalatii electrice de alimentare cu energie electrica a consumatorilor*. Disponibil la: <http://www.rasfoiesc.com/inginerie/electronica/Instalatii-electrice-de-alimen77.php> [accesat 08.06.2017].
62. Симуткин, М.Г. *Разработка Методов Оценки Влияния Нелинейных Электроприемников На Режимы Работы Оборудования Распределительных Сетей*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва, 2014.
63. Медведев, К.М., și Максименко, Д.В. *Моделирование однофазных административно-бытовых электроприемников, потребляющих резко несинусоидальный ток*. Вестник ггту им. П. О. Сухого, № 3, 2011.
64. *Normă Tehnică Energetică privind limitarea regimului deformant în rețelele electrice de transport și de distribuție – Faza I*. Normativ privind limitarea regimului nesimetric și deformant în rețelele electrice. PE 143/1994.
65. Dolara, A., și Leva, S. *Power Quality and Harmonic Analysis of End User Devices*. Energies, 2012, 5, 5453–5466. doi:10.3390/en5125453.
66. Uddin, S., Shareef, H., Mohamed, A., și Hannan, M.A. *Harmonics and thermal characteristics of low wattage LED lamps*. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 11a/2012.
67. *Web.snauka.ru*. Disponibil la: <http://web.snauka.ru/issues/2015/06/55021/> [accesat 05.06.2020].
68. Vieru, D., și Berzan, V. *Расчет стационарного режима радиальной сети с распределенными нагрузками и источниками генерации*. Minsk, Belarusia. Conferința „Integrating science and technology for a sustainable and secure future: energy, environment, informatics and human health. SSF-2014”, 2014. Minsk / Alexander von Humboldt Foundation/Humboldt Kolleg, Book of abstracts, pp. 00-00.
69. Tatian, I. *Procedeu generalizat de calcul al regimului în rețelele cu sarcini și surse de generare distribuite*. Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători, 2015, p. 42.

70. Vieru, D., Tatian, I., și Postoronca, Sv. *Procedeu de calcul al regimului staționar al rețelei electrice arborescente*. Conferința științifică Jubiliară a studenților și colaboratorilor UTM, 20 octombrie 2014, Chișinău, Secțiunea EIE-1, Electroenergetica, pp. 4.
71. Vieru, D., și Berzan, V. *Расчет стационарного режима радиальной сети с распределенными нагрузками и источниками генерации*. Minsk, Belarusia. Conferința „Integrating science and technology for a sustainable and secure future: energy, environment, informatics and human health. SSF-2014”, 18-21 septembrie 2014, Minsk / Alexander von Humboldt Foundation/Humboldt Kolleg, Book of abstracts, pp. 43–46. ISBN 978-985-6456-92-6.
72. Vieru, D., și Tatian, I. *Modelarea regimului de funcționare a microrețelei cu diferite tipuri ale surselor de generare de mică putere*. Teze a 69-a Conferință științifică a studenților și masteranzilor UASM, 23 martie 2016, Chișinău, pp. 85–87. Ch.: Editura UASM. ISBN 978-9975-64-281-1.
73. Vieru, D. *Calculul regimului rețelelor electrice de joasă tensiune cu surse de energie regenerabilă distribuită*. Materialele Conferinței Științifice a Doctoranzilor. Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători. Ediția a V-a, 25.05.2016, UnAȘM, Ch.: 2016, pp. 229-232.
74. Berzan, V., Postoronca, S., Vieru, D., și Tintiuc, I. *Calcularea regimului circuitului cu sarcini distribuite [Resursă electronică]*. In: Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei, 26-28 noiembrie, 2015. Chișinău, 2016, vol. 1, pp. 395-398. ISBN 978-9975-45-440-7. ISBN 978-9975-45-441-4 (Vol.1).
75. Vieru, D., Tatian, I., și Postoronca, S. *Procedeu de calcul al regimului staționar a rețelei electrice arborescente*. In: Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei, 20 – 21 octombrie, 2014. Chișinău, 2015, vol. 1, pp. 353-356. ISBN 978-9975-45-249-6. ISBN 978-9975-45-381-3 (Vol.1).
76. Berzan, V., Tirsu, M., și Iliescu, P. *Calculation of Electric Circuit rules of Sources and Distributed Loads*. ICHQP 2014. 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Bucharest, Romania, 25-28 May 2014. SESSION 6C - Renewable Generation/Distributed Generation and Power Quality. IEEE (Journal, Magazine, Conference, Book). ICHQP_187. 978-1-4673-6487-4/14/\$31.00 ©2014 IEEE.
77. *Гармонические составляющие выпрямленного напряжения и первичного тока выпрямителей*. Disponibil la: https://studref.com/441012/tehnika/garmonicheskie_sostavlyayuschie_vypryamlenogo_napryazheniya_pervichnogo_toka_vypryamiteley. [accesat 04.10.2020].
78. Волков, Н.Г. *Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учебное пособие*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010, 152 p. Disponibil la: <https://portal.tpu.ru/SHARED/d/DIMMASSIKK/academics/Tab2/B8.pdf> (accesat 04.10.2020).
79. Жежеленко, И.В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий*. М.: Энергоатомиздат, 6-е издание дополненное, 2010, 375 p. ISBN 978-5-283-033-07-5.
80. Dmitrii, V. *Application of the Operational Method for Calculating the Mode of the Electrical Grid Circuit with Distributed Loads*. 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN). IEEE, 2019, pp. 1-6.
81. [PUE - 2.4]. Disponibil la: <https://www.ruscable.ru/info/pue/2-4.html>. (Accesat 02.05.2020).

82. [SIP-4 провод]. Disponibil la: <https://k-ps.ru/spravochnik/provoda-izolirovannyye/dlya-vozdushnyix-linij-peredach/sip-4/provod-sip-4-4%D1%8535.html>. (Accesat 02.05.2020).
83. Черешнюк, С.В., Луговой, В.А., și Тимашова, Л.В. *Современный подход к учету климатических нагрузок на воздушные линии электропередачи*. INTERNATIONAL CONFERENCE ENERGY OF MOLDOVA –2012. REGIONAL ASPECTS OF DEVELOPMENT, 4-6 octombrie 2012, Chișinău, Republica Moldova, pp. 543-549.
84. Логинова, С.Е., Логинов, А.В. (partile I-II, V-X), Ударов, В.М. (partile III-IV), Consultanti: Кубасов, Т.И., Шийко, А.П. *Пособие по проектированию воздушных линий электропередачи напряжением 0,38–20 кВ с самонесущими изолированными и защищенными проводами. Книга 1. Система самонесущих изолированных проводов напряжением до 1 кВ без отдельного несущего элемента*. Ред. 5, доп. С-Пб: ENSTO - ОАО «НТЦ Электроэнергетики» (РОСЭП), 2017.
85. Tîrsu, M. et al. *Reactive Power in the Long Electrical Lines/Puterea Reactivă în Liniile Electrice/Reaktivnaya Moschnost' v Dlinnykh Elektricheskikh Liniyakh*. Problemele Energeticii Regionale, 2014, T. 2014, № 3.
86. IEEE Std 551™-2006. *IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems*. Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
87. ГОСТ 28249-93. *Short-circuits in electrical installations. Calculation methods in a.c. electrical installations with voltage below 1 kV*.
88. PE 134-2/96. *Normativ privind metodologia de calcul al curenților de scurtcircuit în rețelele electrice cu tensiunea sub 1 kV*.
89. Berzan, V., Patsiuk, V., și Rybakova, G. *Analysis of the Particularities of the Regime in the Circuit with Distributed Parameters when Feeding the Load with Concentrated Parameters*. 2019 International Conference on Modern Power Systems (MPS 2019), 21-23 mai 2019.
90. Taflove, A., și Brodwin, M.E. *Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations*. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 23, pp. 623-630, 2004.
91. Berzan, V., Iu E. *Zero-voltage and Zero-current-switching of Half-bridge PWM Converter for High Power Applications*. Problemele Regionale ale Energeticii, 2015, № 2 (28), pp. 21-28.
92. Berzan, V. et al. *Micro-inverter for Photovoltaic Modules*. 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). IEEE, 2016, pp. 626-631.
93. Berzan, V., et al. *98.2% Efficiency, Low Cost, 6.6-kW AC/DC Converter for HEV/EV On-Board Charger*. 2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE). IEEE, 2018.
94. Berzan, V. et al. *Electronics Converters with High Energy Efficiency Indices*. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). IEEE, 2019, pp. 468-473.
95. Calinin, L.P., Zaitsev, D.A., Tyrshu, M.S., și Golub, I.V. *Varianty razvitiya transportnoy seti Moldovy pri parallel'noy rabote s energosistemoy Ukrainy*. Problemele Energeticii Regionale, vol. 1, no. 18, pp. 24-34, 2012.
96. Tîrșu, M., Zaitsev, D., Golub, I. *Generarea distribuită - oportunitate de creștere a securității energetice*. In: Forumul regional al energiei FOREN 2020. Ediția a XV-a, 7-10 septembrie 2020, București. Craiova, România, 2020, p. 0.

97. Князев, В. *Энергоэффективная технология передачи электрической энергии на напряжении 0,95 кВ*. СЕТИ РОССИИ, № 5 (38), 2016, pp. 36-39.
98. Куксенко, С.П. *Электромагнитная совместимость: электроэнергетика*. Томск: Томск. гос. унт систем упр. и радиоэлектроники, 2017, 265 с.
99. Ermurachi, Iu., Berzan, V., Andronati, N. *Soluții inovative de realizare a echipamentelor de conversie a energiei electrice în baza electronicii de putere*. Inginerie agrară și transport auto, vol. 51, 2018. Simpozionul "Realizări și perspective în ingineria agrară și transport auto". Chișinău, Moldova, 4-5 octombrie 2018, CZU: 620.314.58.
100. Ermurachi, Iu., Berzan, V., Vieru, D., Moraru, Larisa, Ermurachi, Iu.Iu., Cabac, S. *Convertor de curent continuu în curent continuu*. Conferința Științifică Jubiliară a studenților și colaboratorilor UTM, 20 octombrie, 2014, Chișinău, Secțiunea EIE-3. Electrotehnica, Electromecanica și Metrologie, 4p.
101. Ermurachi, Y.V., Ermurachi, Y.Y., Vieru, D. *Моделирование работы инвертора PV модулей при их параллельной работе с электрической сетью*. Belarusia, Minsk. Conference „Integrating Science and Technology for a Sustainable and Secure Future: Energy, Environment, Informatics and Human Health. SSF-2014”, 18-21 septembrie 2014, Minsk, Alexander von Humboldt Foundation/Humboldt Kolleg, Book of Abstracts, pp. 46-48. ISBN 978-985-6456-92-6.
102. Kalinin, L.P., Zaitsev, D., Golub, I., Tyrshu, M. *The Use of Chokes to Improve the Quality of the Static Frequency Converter*. Problemele Energeticii Regionale, 2019, nr. 1(39), pp. 34-42. ISSN 1857-0070. DOI: 10.5281/zenodo.2650950.
103. PNG Image [accesat 20.03.2020]. Disponibil la: <https://www.pngegg.com/ru/png-tymxh>.
104. *Анализ инверторов при работе с разными видами электроприборов* [Accesat 20.03.2020]. Disponibil la: <http://ust.su/solar/media/section-inner18/1756/>.
105. *Сетевой инвертор EA50KTL5I 50кВт* [accesat 15.12.2020]. Disponibil la: <http://eastups.com.ua/ru/good/setevoy-invertor-ea50ktsli-50kW>.
106. Волков, А.Г. *Автономная система генерирования электрической энергии на базе многозонных электронных конверторов*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.09.03.-Электротехническре комплексы и системы. Новосибирск, 2015, 192 с.
107. Жданкин, В. *Транзисторные инверторы: характеристики, структурные схемы, рекомендации по применению*. ОБЗОР/АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА. Disponibil la: <https://www.cta.ru/cms/f/342572.pdf>.
108. *Статический инвертор напряжения серии ИНС. Техническая информация ЭКРА 656453.110/Э5 ТИ* [accesat 15.12.2020]. Disponibil la: <https://ekra.ru/upload/iblock/.pdf>.
109. *Расчет электрических нагрузок квартир и коттеджей. Расчет токов короткого замыкания*. Schneider Electric. Disponibil la: https://eti.su/articles/spravochnik/spravochnik_1560.html.
110. *Uralen Trans* [accesat 15.10.2020]. Disponibil la: <https://uralen.ru/catalog/trans/group-17/64.html>.
111. *VsetMG Silovye Transformatory* [accesat 15.10.2020]. Disponibil la: https://vsetmg.ru/produkcija/silovye-transformatory/transformatory-maslyanye/tmg_630.
112. Крамской, Ю.Г. *Применение силовой электроники при строительстве объектов генерации на основе ВИЭ и особенности их интеграции в электрические сети*. Доклад 081216. CIGRE, Подкомитет РНК СИГРЭ В4, 8 декабря 2016, 27 с.

113. Ermurachi, Iu., Berzan, V., Vieru, D., Moraru, Larisa, Ermurachi, Iu.Iu., Cabac, S. *Convertor de curent continuu în curent continuu*. Conferința Științifică Jubiliară a studenților și colaboratorilor UTM, 20 octombrie 2014, Chișinău, Secțiunea EIE-3. Electrotehnica, Electromecanica și Metrologie, 4p.
114. Ermurachi, Y.V., Ermurachi, Y.Y., Vieru, D. *Моделирование работы инвертора PV модулей при их параллельной работе с электрической сетью*. Belarusia, Minsk. Conference „Integrating Science and Technology for a Sustainable and Secure Future: Energy, Environment, Informatics and Human Health. SSF-2014”, 18-21 septembrie 2014, Minsk, Alexander von Humboldt Foundation/Humboldt Kolleg, Book of Abstracts, pp. 46-48. ISBN 978-985-6456-92-6.
115. Kalinin, L.P., Zaitsev, D., Golub, I., Tyrshu, M. *The Use of Chokes to Improve the Quality of the Static Frequency Converter*. Problemele Energeticii Regionale, 2019, nr. 1(39), pp. 34-42. ISSN 1857-0070. DOI: 10.5281/zenodo.2650950.
116. *PNG Image* [accesat 20.03.2020]. Disponibil la: <https://www.pngegg.com/ru/png-tymxh>.
117. *Анализ инверторов при работе с разными видами электронприборов* [accesat 20.03.2020]. Disponibil la: <http://ust.su/solar/media/section-inner18/1756/>.
118. *Сетевой инвертор EA50KTLSI 50кВт* [Accesat 15.12.2020]. Disponibil la: <http://eastups.com.ua/ru/good/setevoy-invertor-ea50ktsi-50kW>.
119. Волков, А.Г. *Автономная система генерирования электрической энергии на базе многозонных электронных конверторов*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.09.03.-Электротехническре комплексы и системы. Новосибирск, 2015, 192 с.
120. Жданкин, В. *Транзисторные инверторы: характеристики, структурные схемы, рекомендации по применению*. ОБЗОР/АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА. Disponibil la: <https://www.cta.ru/cms/f/342572.pdf>.
121. *Статический инвертор напряжения серии ИНС. Техническая информация ЭКРА 656453.110/Э5 ТИ* [accesat 15.12.2020]. Disponibil la: <https://ekra.ru/upload/iblock/.pdf>.

ANEXE

Anexa 1. Consumul și generarea e.e într-o gospodărie cu conectarea unei centrale electrice

Nr. ord	Ora	Puterea consumată, kW	Puterea generată, kW
1.	0 ⁰⁰	2,34	0
2.	1 ⁰⁰	1,41	0
3.	2 ⁰⁰	0,47	0
4.	3 ⁰⁰	0,47	0
5.	4 ⁰⁰	0,47	0
6.	5 ⁰⁰	0,47	0
7.	6 ⁰⁰	1,501	0,405
8.	7 ⁰⁰	2,251	0,811
9.	8 ⁰⁰	2,11	1,014
10.	9 ⁰⁰	2,251	1,521
11.	10 ⁰⁰	2,721	2,636
12.	11 ⁰⁰	2,956	5,171
13.	12 ⁰⁰	3,190	5,678
14.	13 ⁰⁰	3,284	5,678
15.	14 ⁰⁰	3,284	5,678
16.	15 ⁰⁰	3,518	5,678
17.	16 ⁰⁰	3,659	5,678
18.	17 ⁰⁰	4,691	5,678
19.	18 ⁰⁰	5,630	4,866
20.	19 ⁰⁰	5,677	3,244
21.	20 ⁰⁰	4,832	0,811
22.	21 ⁰⁰	4,223	0
23.	22 ⁰⁰	3,753	0
24.	23 ⁰⁰	2,345	0

**Anexa 2. Consumul și generarea e.e
într-o gospodărie**

Nr. ord	Ora	Puterea consumată, kW	Puterea generată, kW
1.	0 ⁰⁰	2,34	0,03
2.	1 ⁰⁰	1,41	0,03
3.	2 ⁰⁰	0,47	0,03
4.	3 ⁰⁰	0,47	0,03
5.	4 ⁰⁰	0,47	0,03
6.	5 ⁰⁰	0,47	0,03
7.	6 ⁰⁰	1,501	0,03
8.	7 ⁰⁰	2,251	0,03
9.	8 ⁰⁰	2,11	0,03
10.	9 ⁰⁰	2,251	0
11.	10 ⁰⁰	2,721	0
12.	11 ⁰⁰	2,956	0
13.	12 ⁰⁰	3,190	0,27
14.	13 ⁰⁰	3,284	0,27
15.	14 ⁰⁰	3,284	0,27
16.	15 ⁰⁰	3,518	0,48
17.	16 ⁰⁰	3,659	0,48
18.	17 ⁰⁰	4,691	0,48
19.	18 ⁰⁰	5,630	0
20.	19 ⁰⁰	5,677	0
21.	20 ⁰⁰	4,832	0
22.	21 ⁰⁰	4,223	0,15
23.	22 ⁰⁰	3,753	0,15
24.	23 ⁰⁰	2,345	0,15

Anexa 3. Algoritmul de calcul în MATLAB

```

%Programa cu 12 consumatori si 12 de surse
%curentii care circula in retea
clear;
n=1:12;
%Date generale transformator S=630kVA%
Zt=0.065;
E=220;
%date despre consumator
Pc=4832;
for Zc=n;
    Zc=(E^2)/(Pc);
end
%Date despre LEA-0,4 (calculul pentru o faz? S=95)%
Ll=32.5;%lungimea liniei
S1=95;%sectiunea transversala a cablului
Zl=(2*Ll)/(32*S1);%impedan?a total?
%date despre LEconsumatorului
Lc=15;%lungimea din punctul de racord spre consumator
S2=16;%lungimea liniei
Zlc=(2*Lc)/(32*S2);%impedan?a total?
%date despre sursa de generare
Pg=811;
Zg=E^2/(Pg);
%calculam rezistenta totala pe ramura (consumator)
Zram=(Zt+(n*Zlc));%fara L=32.5 m
Zmc=[(Zram+(n*Zl))];%cu L=32.5 m
Ztc=(Zmc+Zc);%diagonla consumator
%calculam rezistenta totala pe ramura (generator)
Ztg=[Zmc+Zg];%diagonala totala de generare
%Alcatuim matricea consum
A1=[meshgrid(Zmc)];
A2=triu(A1,+1);
A3=tril(A1',-1);
A4=A3+A2;
A5=diag(Ztc);
Ac=[A4+A5];%matricea de consum
%Alcatuim matricea de generare
A1=[meshgrid(Zmc)];
A12=triu(A1,+1);
A13=tril(A12',-1);
A14=A13+A12;
A15=diag(Ztg);
Ag=[A14+A15];%matricea de generare
%Alcatuim matricea tensiunilor U=220 V;
U=meshgrid(220,n);
U2=meshgrid(220,n);
%Calculam curentii din ramuri;
Ic=linsolve(Ac,U);% curentul de consum
Ig=linsolve(Ag,U2);% curentul de generare
%Calcul in nod tensiunile din ramuri
Uc=Ic*Zc%valorile tensiunii fara generare
Ug=Ig*Zg%valorile tensiunii in regim de consum
Ucg=(Uc-Ug)+E%valorile tensiunii generate spre nod dup? consum
%Graficile pentru UC si Ug;
plot(Uc,'Linewidth',1,'Linestyle','-','Marker','s')
hold on
xlabel('nr. nodului')
ylabel('Profilul tensiunii,V')
plot(Ucg,'Linewidth',1,'Linestyle','-','Marker','o')
hold off
grid;
legend ('Uc','Ucg')

```

Anexa 4. Algoritmul de calcul în MATLAB

```

%Programa cu 33 consumatori si 33 de surse
clear;
n=1:33;
%Date generale transformator S=630kVA%
Zt=0.065;
E=380;
%date despre consumator
Pc=2721;
for Zc=n;
Zc=((E^2)*0.92*sqrt(3))/(Pc);
end
%Date despre LEA-0,4 (calculul pentru o faz? S=95)%
Ll=32.5;%lungimea liniei
S1=95;%sectiunea transversala a cablului
Zl=(2*Ll)/(32*S1);%impedan?a total?
%date despre LEconsumatorului
Lc=15;%lungimea din punctul de racord spre consumator
S2=16;%lungimea liniei
Zlc=(2*Lc)/(32*S2);%impedan?a total?
%date despre sursa de generare
Pg=2636;
Zg=((E^2)*0.92*sqrt(3))/(Pg);
%calculam rezistenta totala pe ramura (consumator)
Zram=(Zt+(n*Zlc));%fara L=32.5 m
Zmc=[(Zram+(n*Zl))];%cu L=32.5 m
Ztc=(Zmc+Zc);%diagonla consumator
%calculam rezistenta totala pe ramura (generator)
Ztg=[Zmc+Zg];%diagonala totala de generare
%Alcatuim matricea consum
A1=[meshgrid(Zmc)];
A2=triu(A1,+1);
A3=tril(A1',-1);
A4=A3+A2;
A5=diag(Ztc);
Ac=[A4+A5]%matricea de consum
%Alcatuim matricea de generare
A1=[meshgrid(Zmc)];
A12=triu(A1,+1);
A13=tril(A12',-1);
A14=A13+A12;
A15=diag(Ztg);
Ag=[A14+A15];%matricea de generare
%Alcatuim matricea tensiunilor U=220 V;
U=meshgrid(380,n);
U2=meshgrid(380,n);
%Calculam curentii din ramuri;
Ic=linsolve(Ac,U)% curentul de consum
Ig=linsolve(Ag,U2)% curentul de generare
%Calcul in nod tensiunile din ramuri
Uc=Ic*Zc%valorile tensiunii fara generare
Ug=Ig*Zg%valorile tensiunii in regim de consum
Ucg=(Uc-Ug)+E%valorile tensiunii generate spre nod dup? consum
%Graficile pentru UC si Ug;
plot(Uc,'Linewidth',1,'Linestyle','-','Marker','s')
hold on
xlabel('nr. nodului')
ylabel('Profilul tensiunii,V')
plot(Ucg,'Linewidth',1,'Linestyle','-','Marker','o')
hold off
grid;
legend('Uc','Ucg')

```

Anexa 5. Modelarea prin metoda curentilor de buclă a impactului consumului și GD în regim normal de funcționare $U=220\text{ V}$ (SDG fotovoltaice)

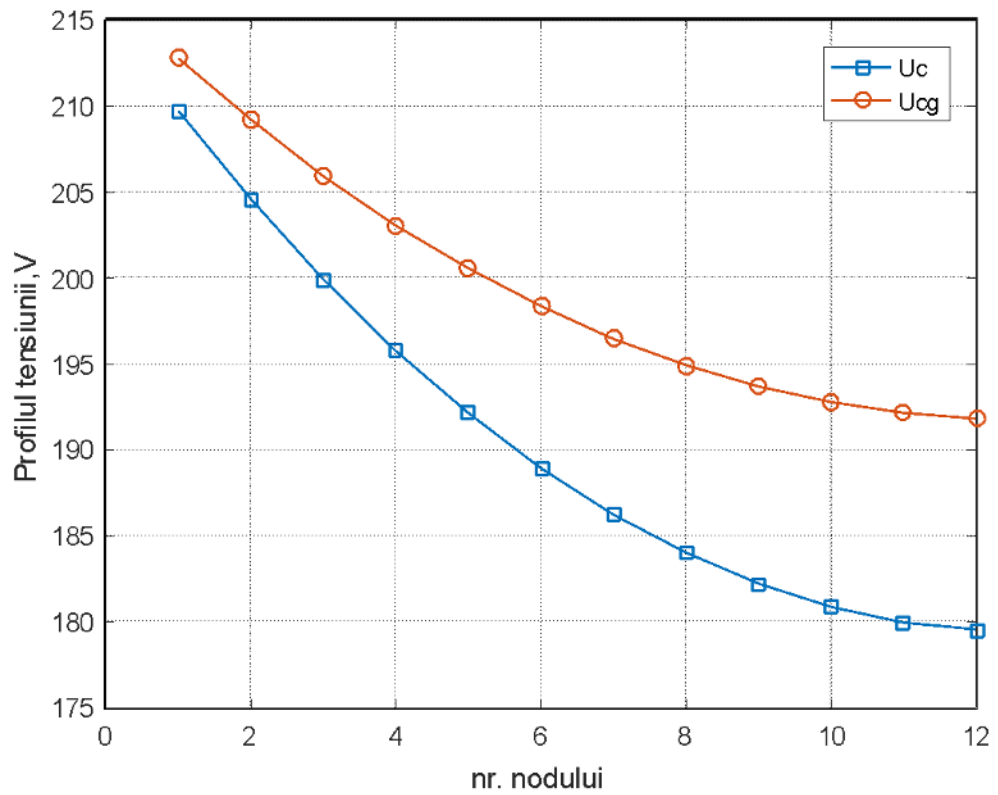


Fig. A5.1. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 6⁰⁰ ($P_n=1,501\text{ kW} > P_g=0,405\text{ kW}$)

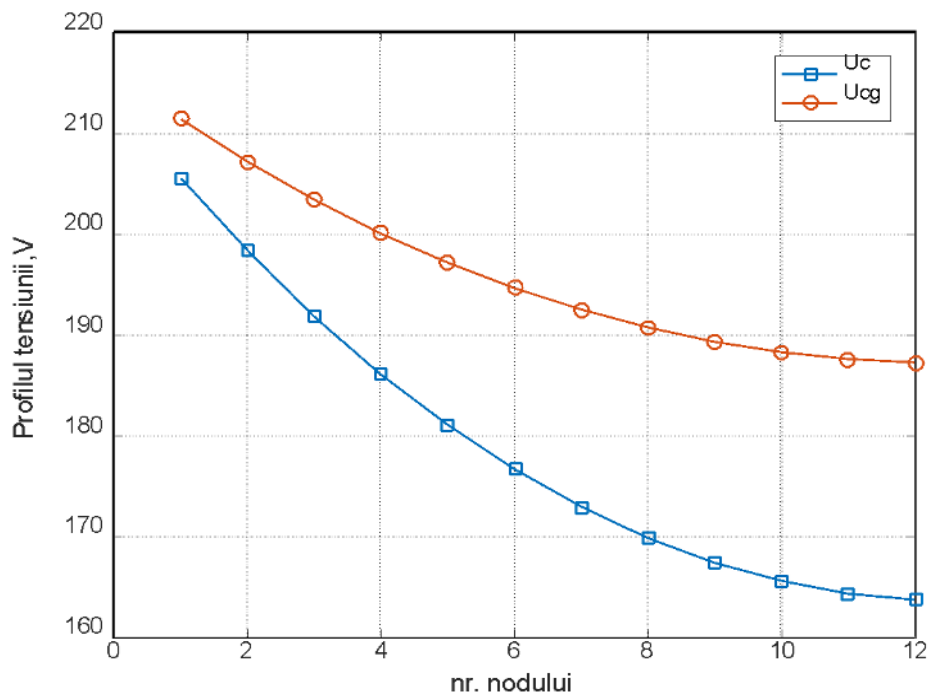


Fig. A5.2. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 7⁰⁰ ($P_n=2,51\text{ kW} > P_g=0,811\text{ kW}$)

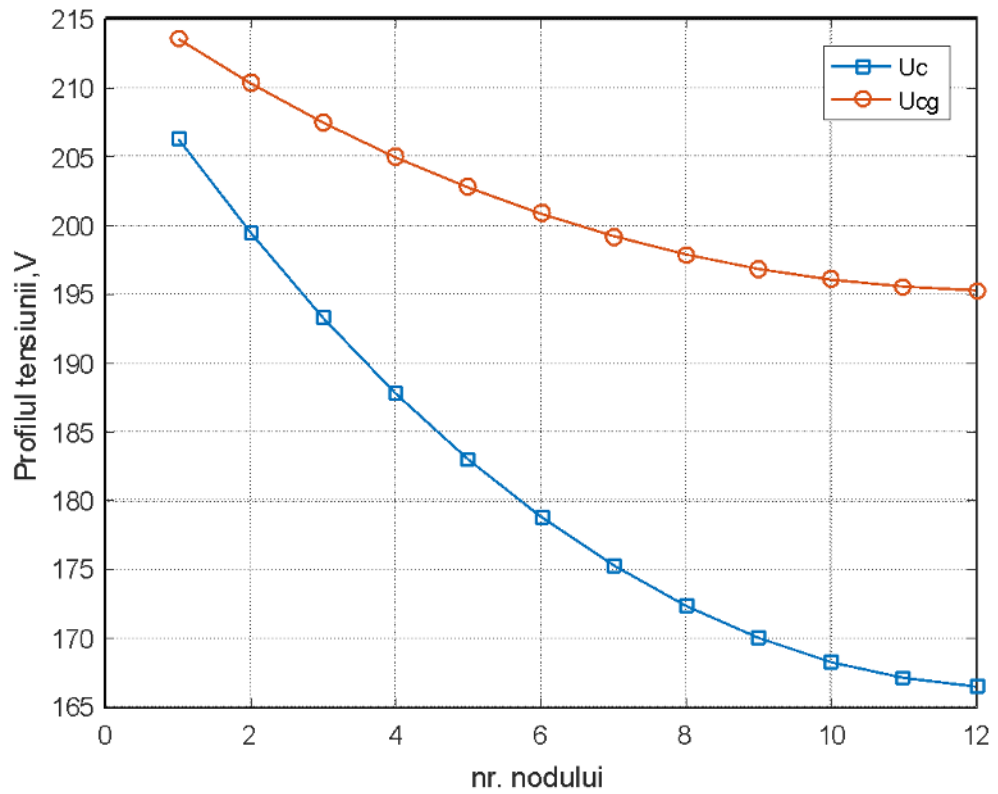


Fig. A5.3. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 8⁰⁰
 ($P_n = 2,11 \text{ kW} > P_g = 1,014 \text{ kW}$)

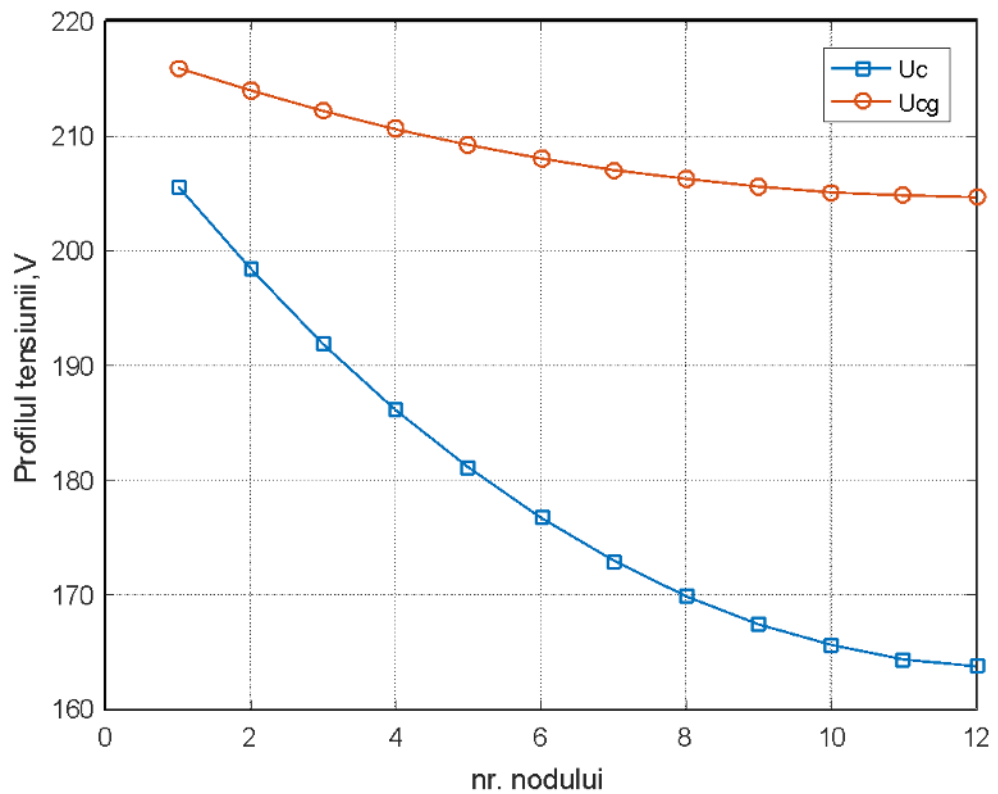


Fig. A5.4. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 9⁰⁰
 ($P_n = 2,251 \text{ kW} > P_g = 1,521 \text{ kW}$)

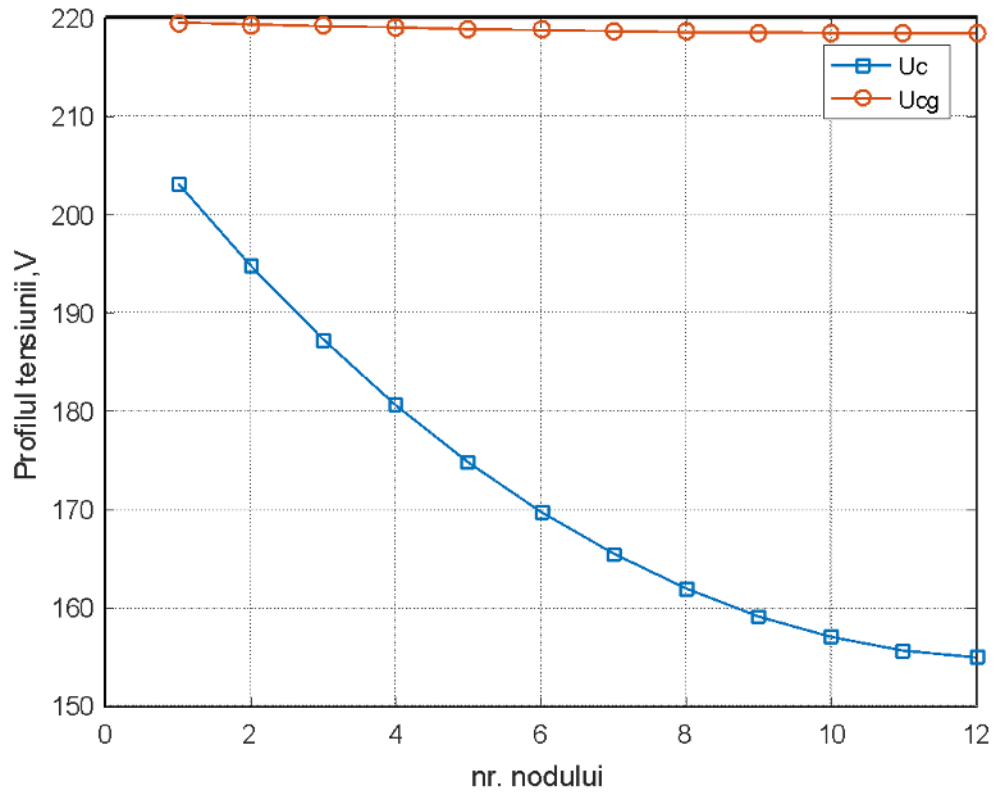


Fig. A5.5. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 10⁰⁰ (P_n= 2,721 kW>P_g= 2,636 kW)

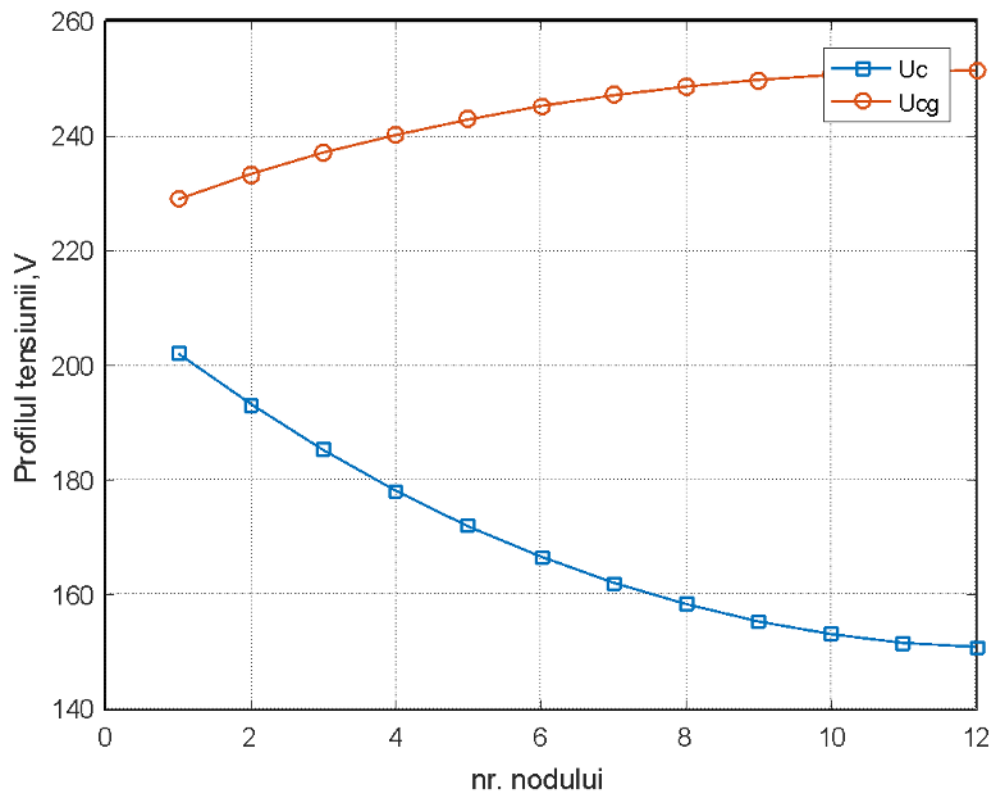


Fig. A5.6. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 11⁰⁰ (P_n=2,956 kW>P_g= 5,171 kW)

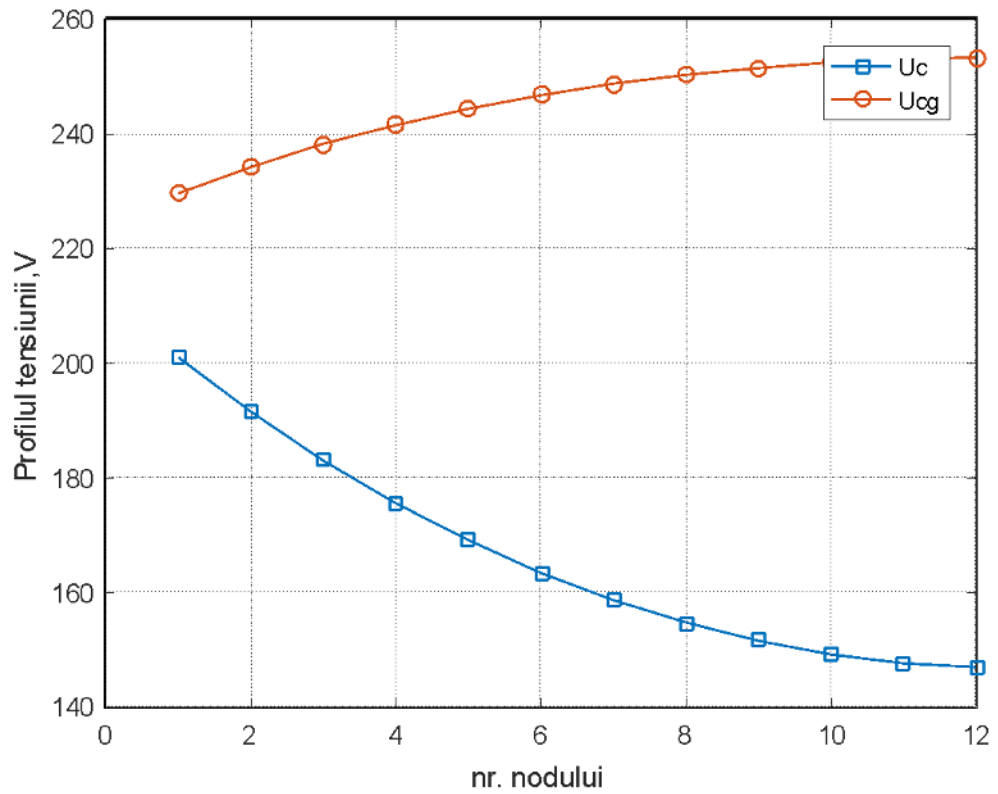


Fig. A5.7. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 12⁰⁰
 ($P_n = 3,190 \text{ kW} < P_g = 5,678 \text{ kW}$)

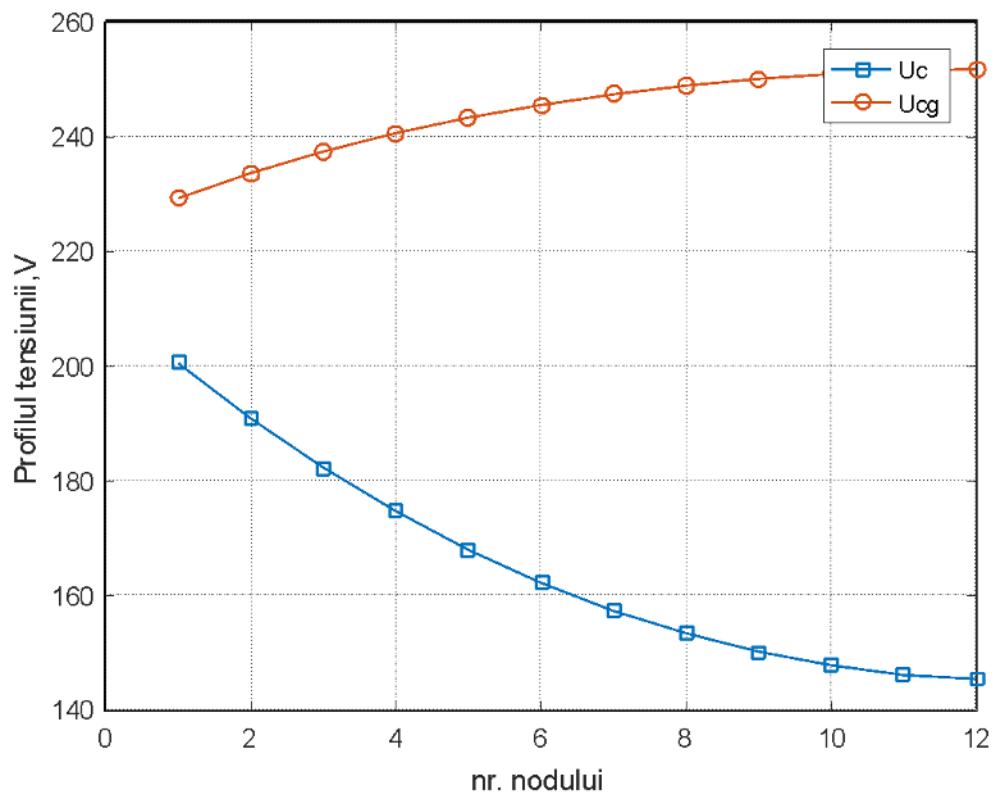


Fig. A5.8. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 13⁰⁰
 ($P_n = 3,284 \text{ kW} < P_g = 5,678 \text{ kW}$)

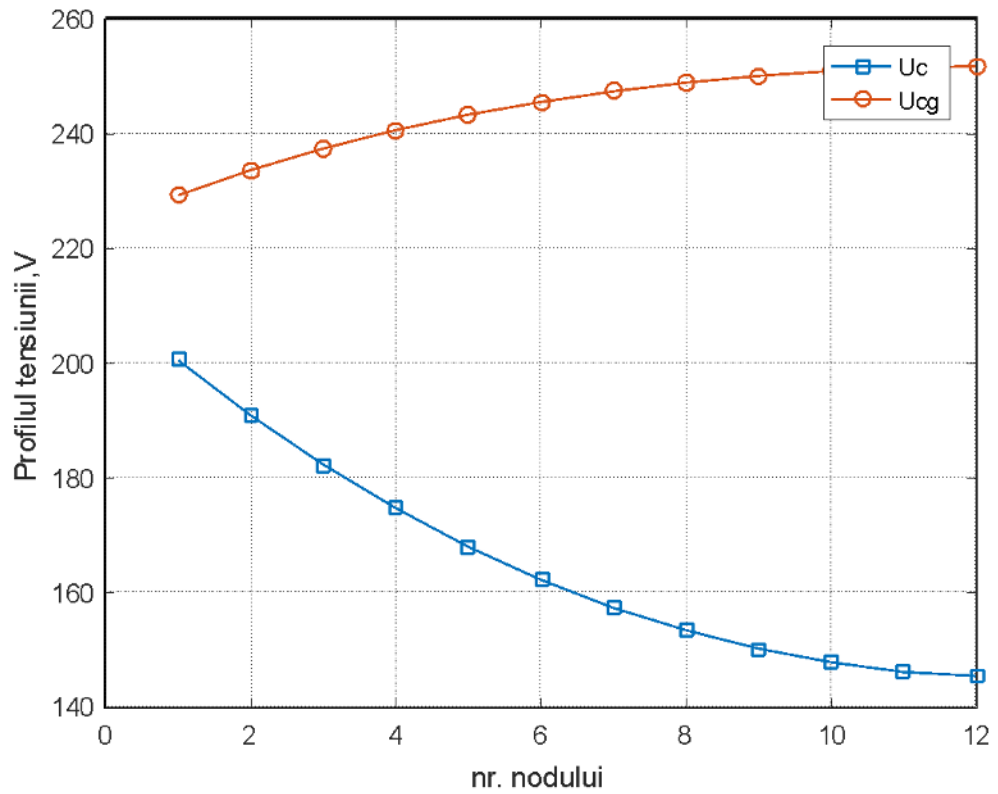


Fig. A5.9. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 14⁰⁰
($P_n=3,284 \text{ kW} < P_g=5,678 \text{ kW}$)

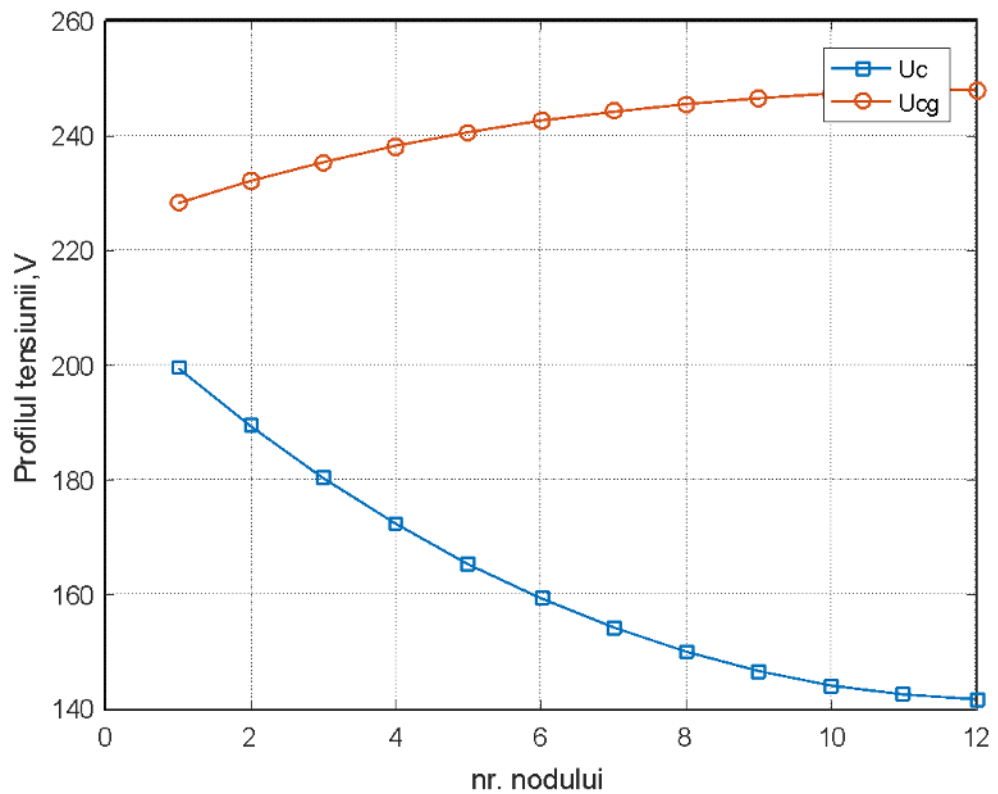


Fig. A5.10. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 15⁰⁰
($P_n=3,518 \text{ kW} < P_g=5,678 \text{ kW}$)

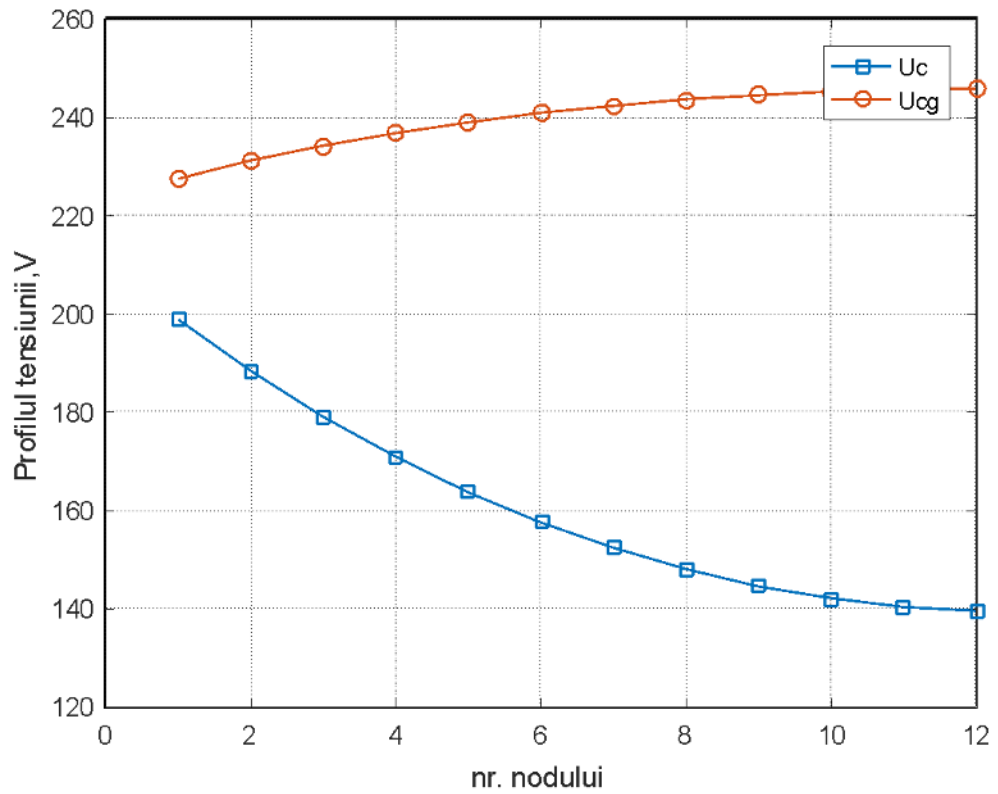


Fig. A5.11. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 16⁰⁰ ($P_n=3,659 \text{ kW} < P_g=5,678 \text{ kW}$)

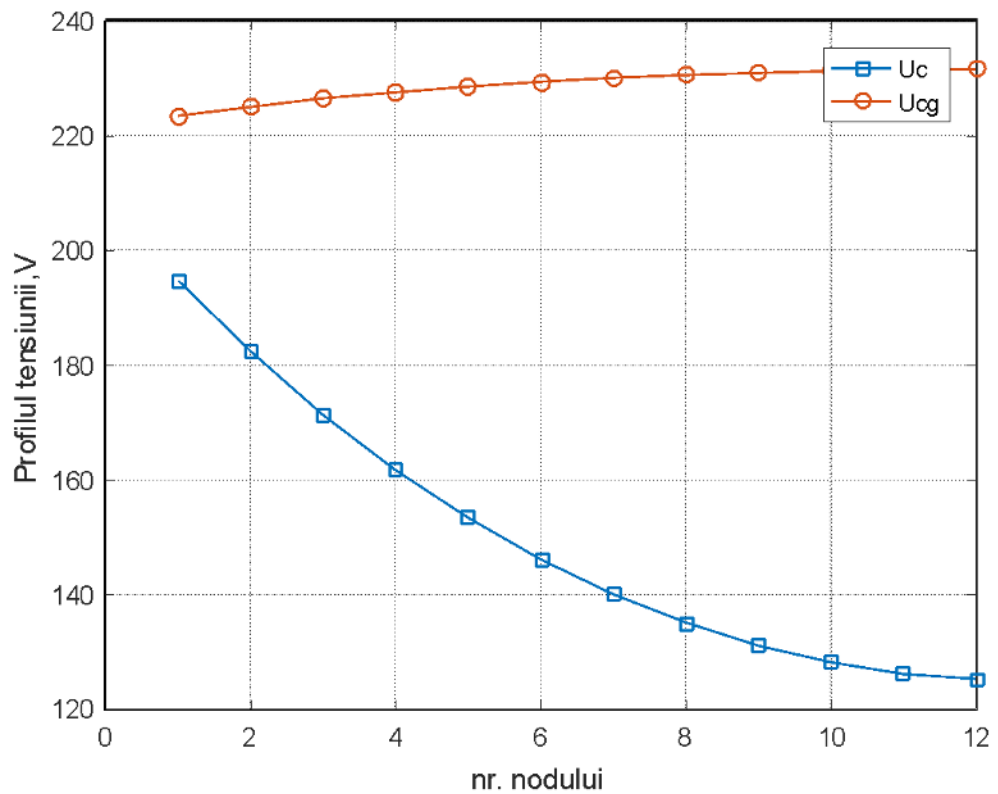


Fig. A5.12. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 17⁰⁰ ($P_n=4,691 \text{ kW} < P_g=5,678 \text{ kW}$)

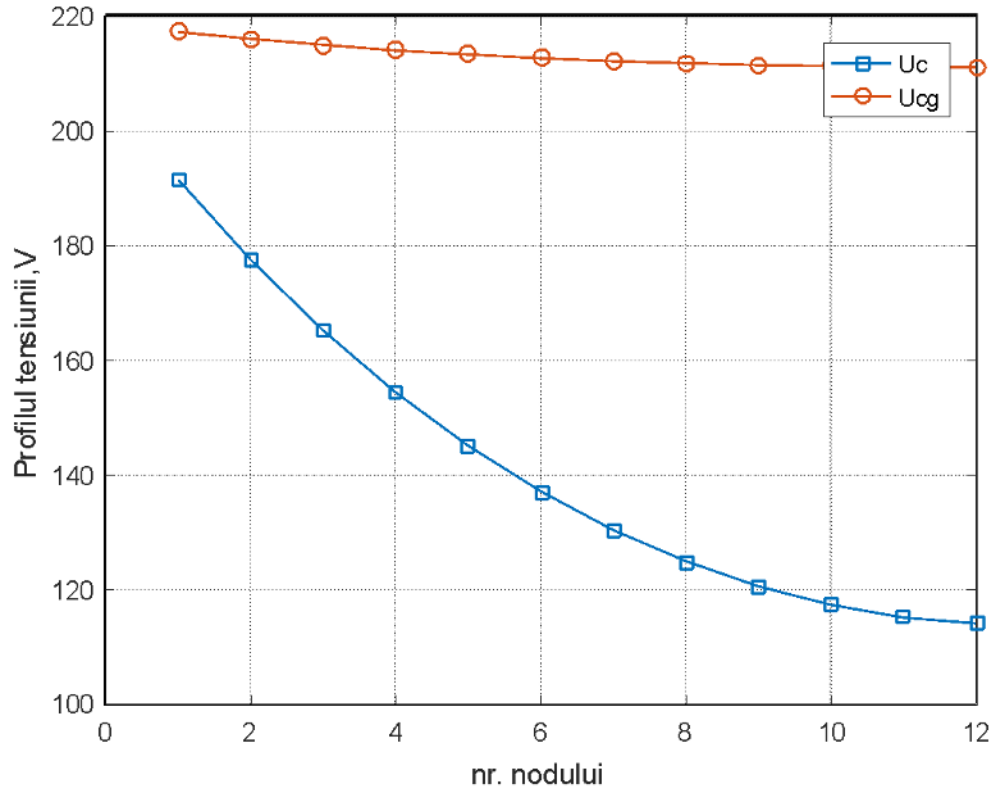


Fig. A5.13. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 18⁰⁰ ($P_n=5,630 \text{ kW} > P_g=4,866 \text{ kW}$)

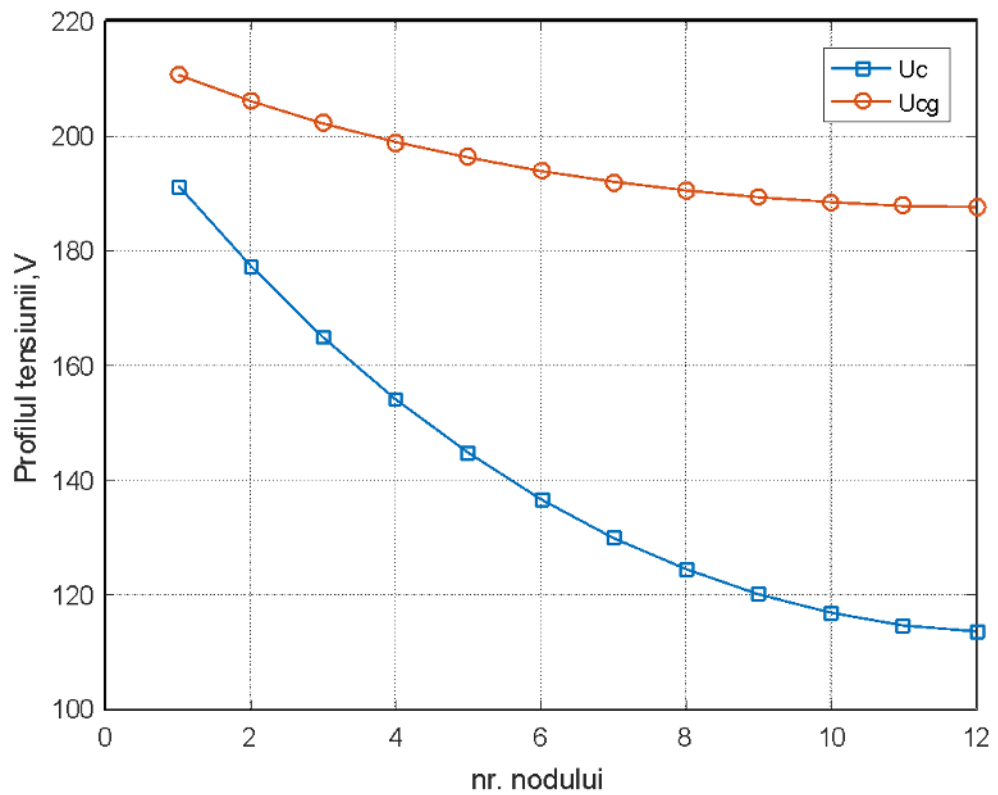


Fig. A5.14. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 19⁰⁰ ($P_n= 5,677\text{kW} > P_g= 3,244\text{kW}$)

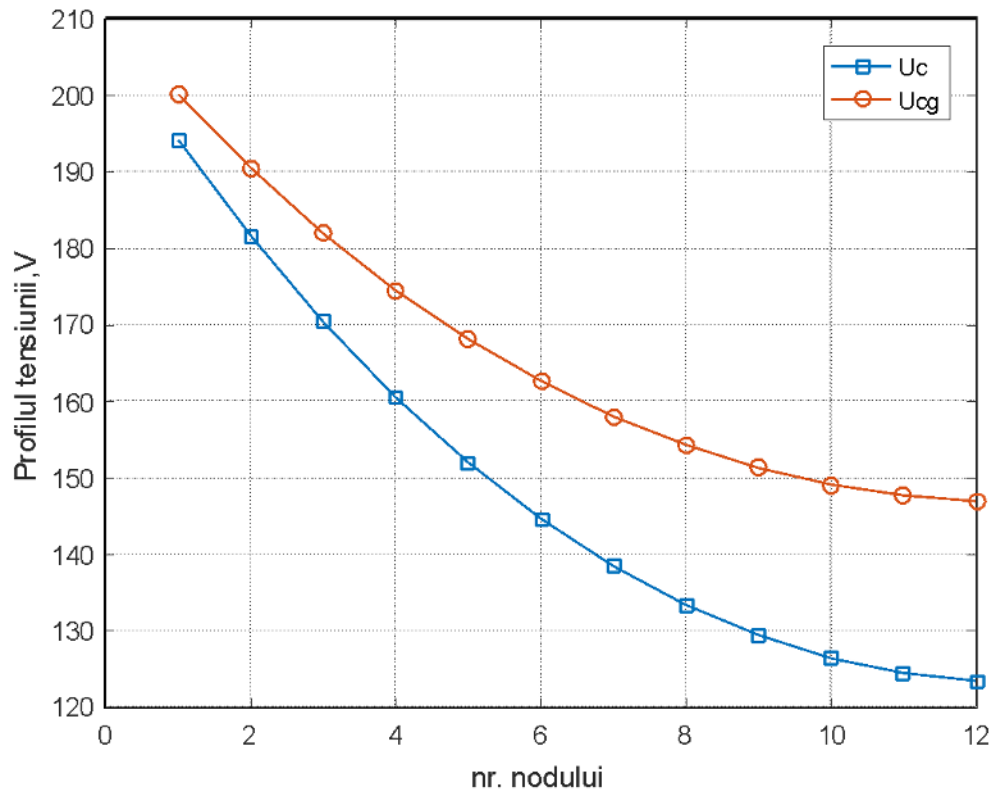


Fig. A5.15. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 20⁰⁰
 (Pn=4,832 kW>Pg= 0,811kW)

**Anexa 6. Modelarea prin metoda curenților de buclă a
impactului consumului și GD în regim normal de
funcționare U=220 V (SDG eoliene)**

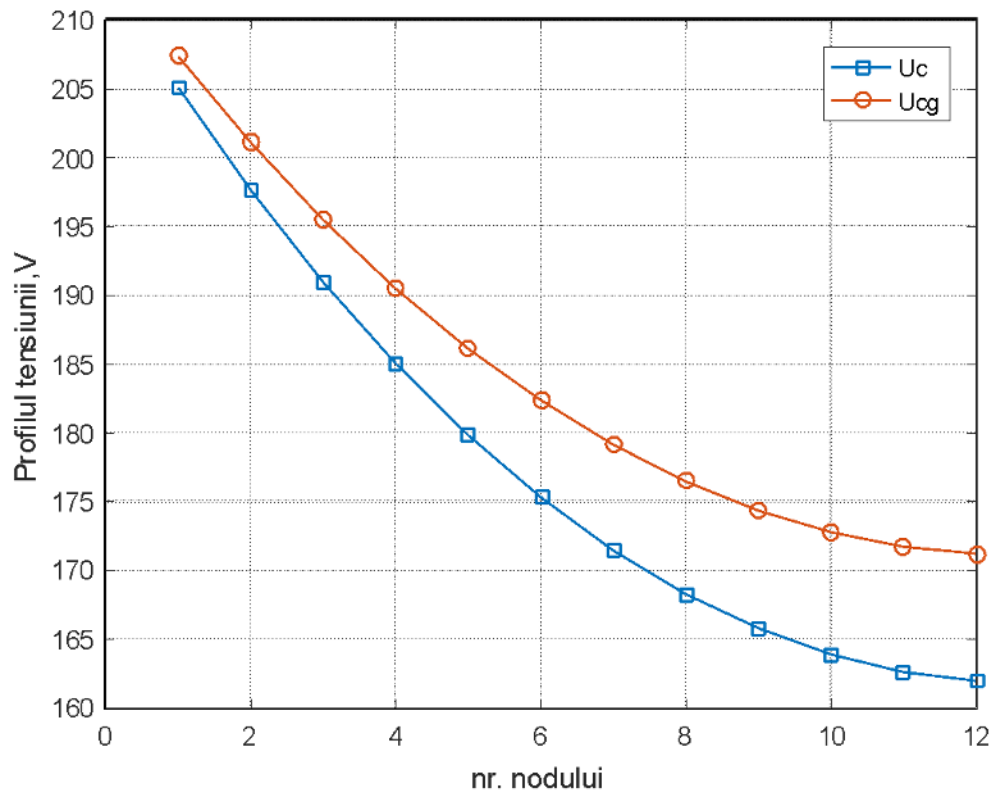


Fig. A6.1. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 00⁰⁰
($P_n=2,34 \text{ kW} > P_g=0,3 \text{ kW}$)

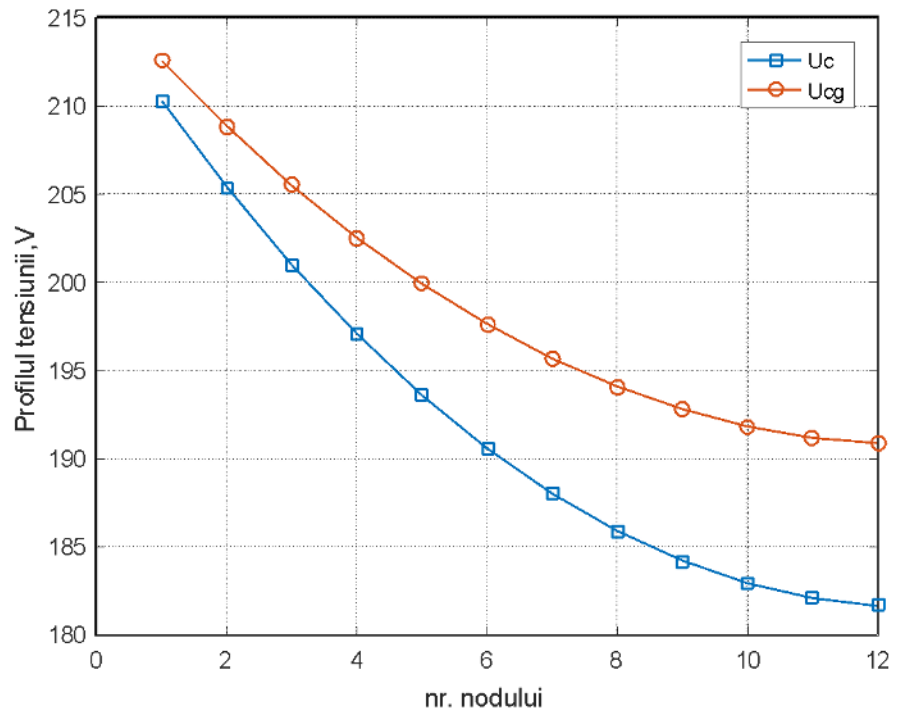


Fig. A6.2. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 1⁰⁰
($P_n= 1,41 \text{ kW} > P_g= 0,3 \text{ kW}$)

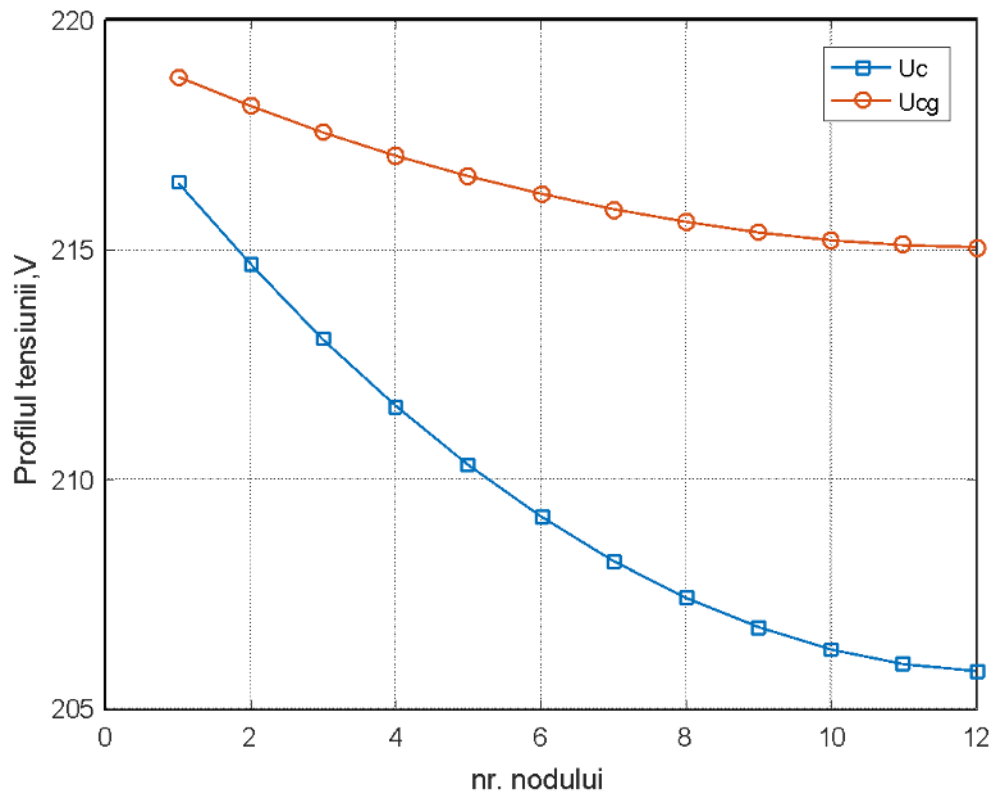


Fig. A6.3. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 2⁰⁰-5⁰⁰ (Pn=0,47 kW>Pg=0,3 kW)

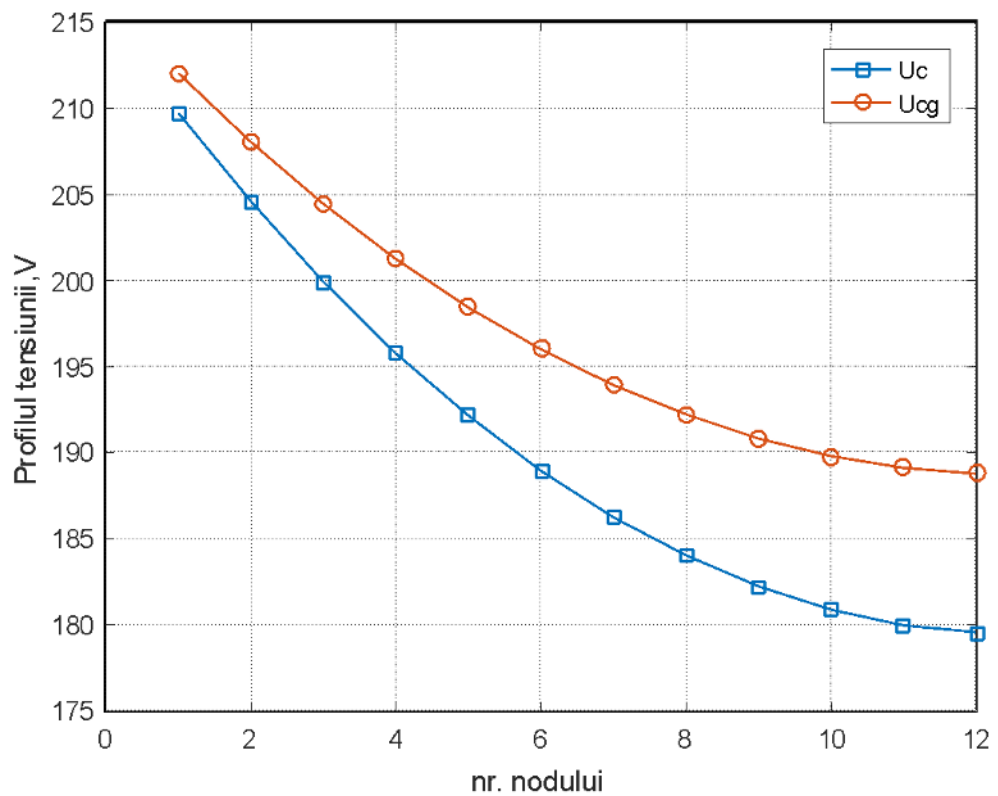


Fig. A6.4. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 6⁰⁰ (Pn= 1,501 kW>Pg= 0,3 kW)

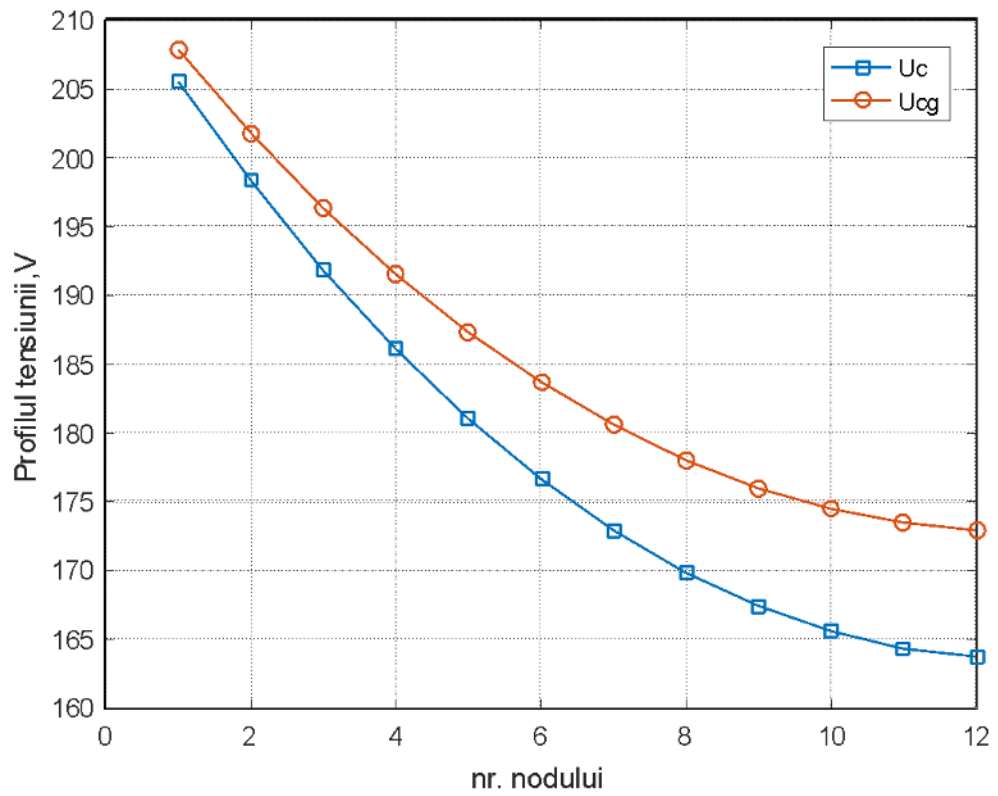


Fig. A6.5. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 7⁰⁰
($P_n=2,251 \text{ kW} > P_g=0,3 \text{ kW}$)

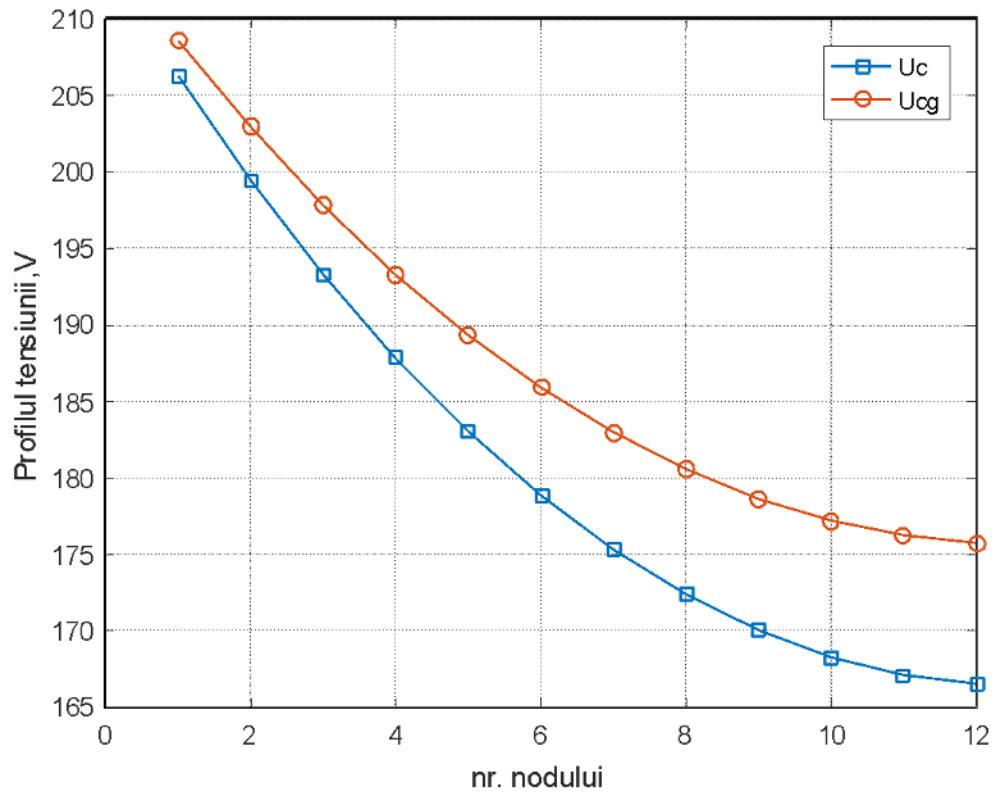


Fig. A6.6. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 8⁰⁰
($P_n= 2,11 \text{ kW} > P_g= 0,3 \text{ kW}$)

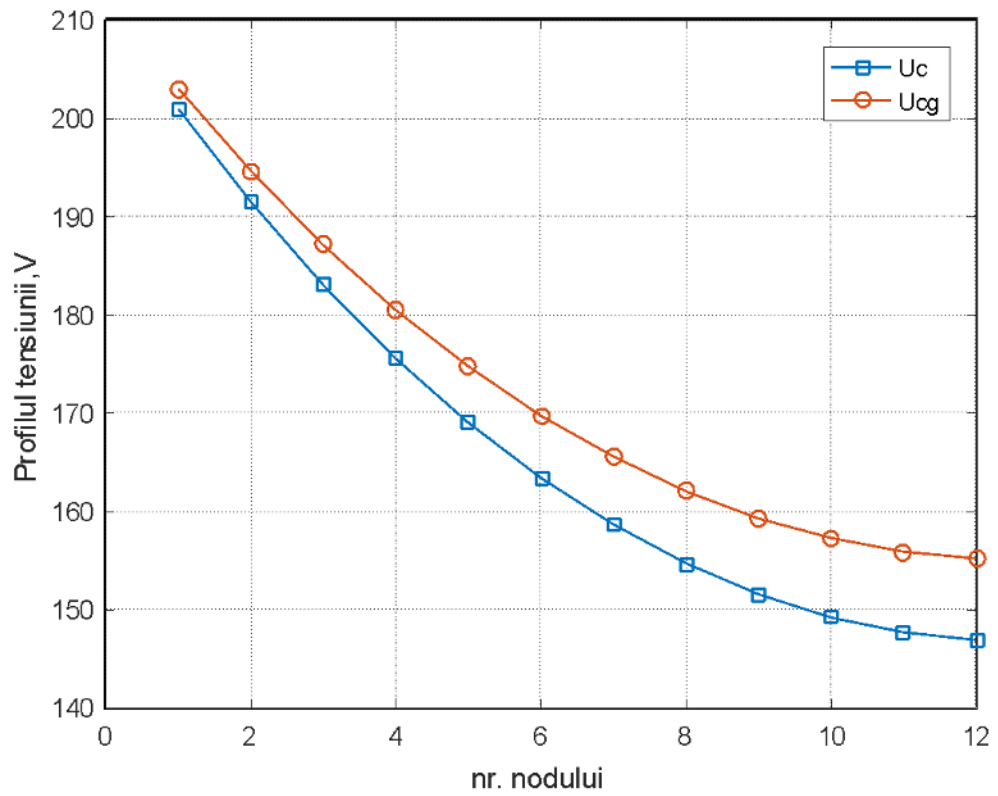


Fig. A6.7. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 12⁰⁰
($P_n = 3,190 \text{ kW} > P_g = 0,27 \text{ kW}$)

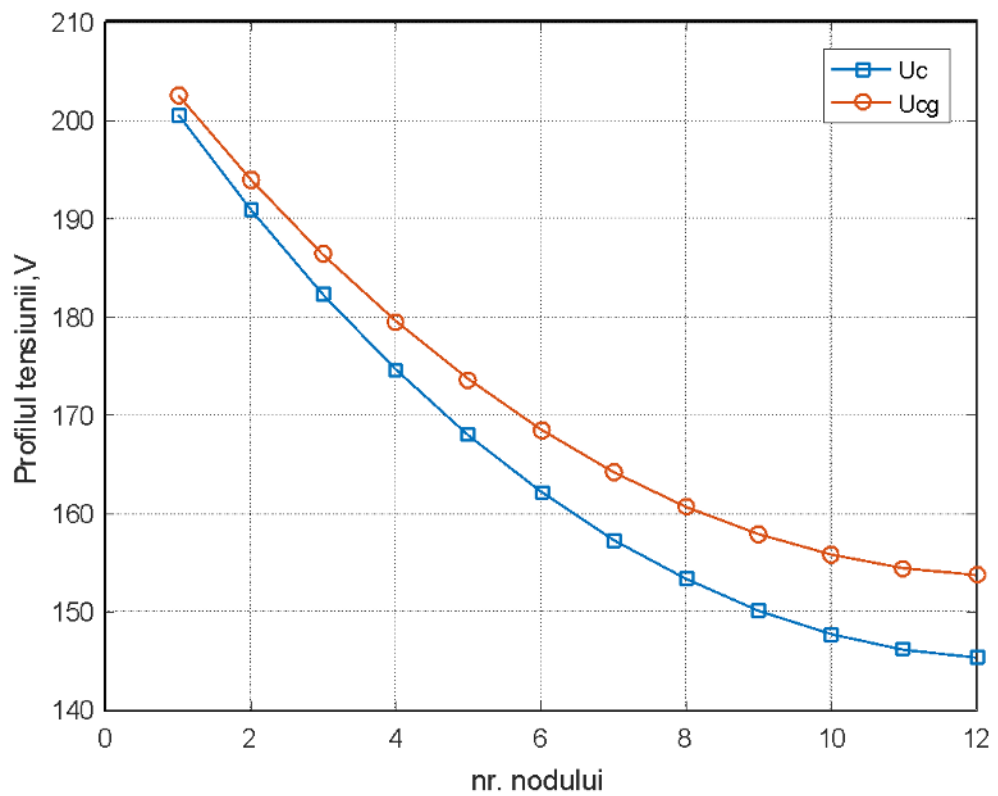


Fig. A6.8. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 13⁰⁰ -14⁰⁰
($P_n = 3,284 \text{ kW} > P_g = 0,27 \text{ kW}$)

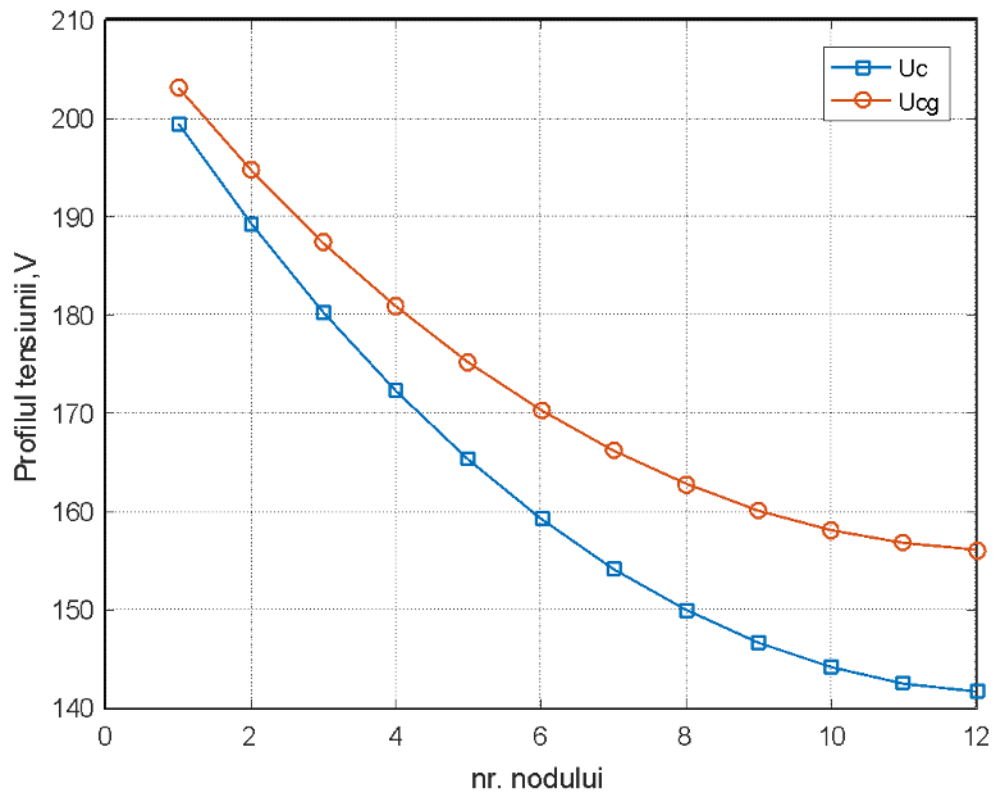


Fig. A6.9. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 15⁰⁰
($P_n = 3,518 \text{ kW} > P_g = 0,48 \text{ kW}$)

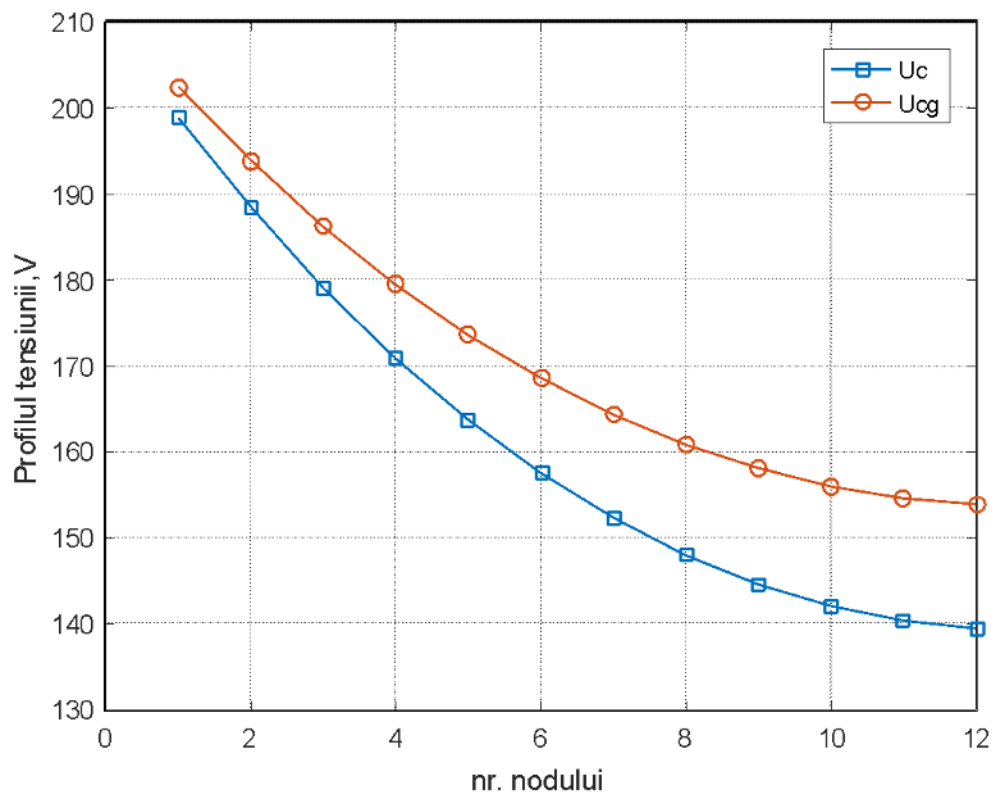


Fig. A6.10. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 16⁰⁰
($P_n = 3,659 \text{ kW} > P_g = 0,48 \text{ kW}$)

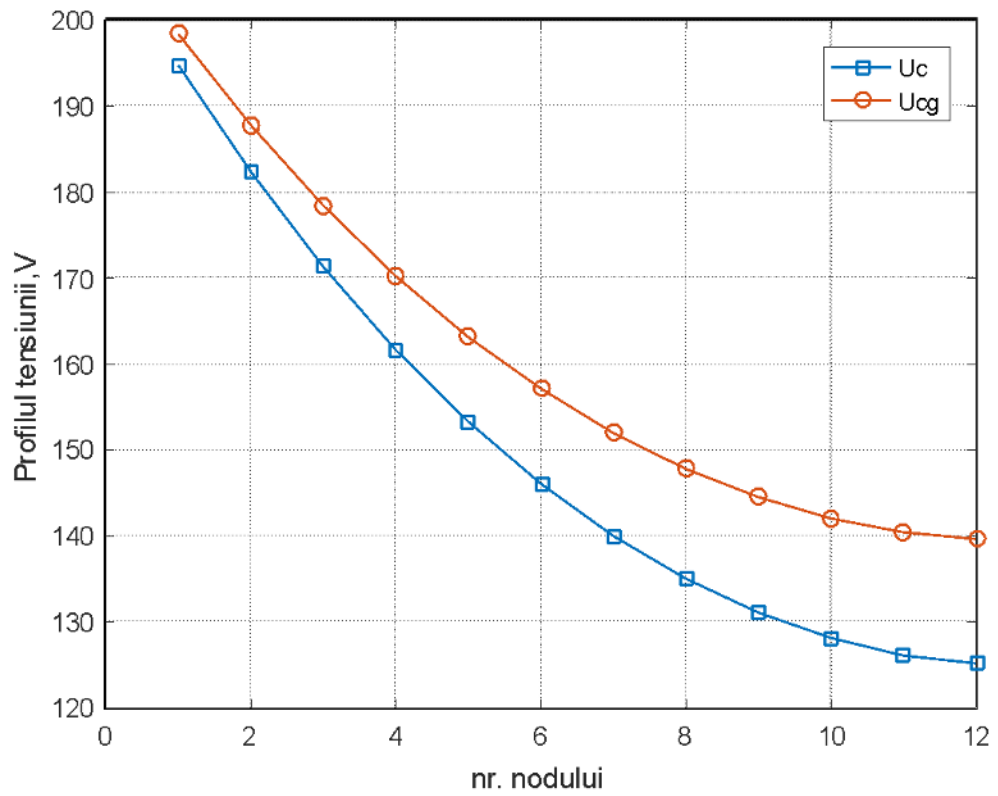


Fig. A6.11. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 17⁰⁰
($P_n = 4,691 \text{ kW} > P_g = 0,48 \text{ kW}$)

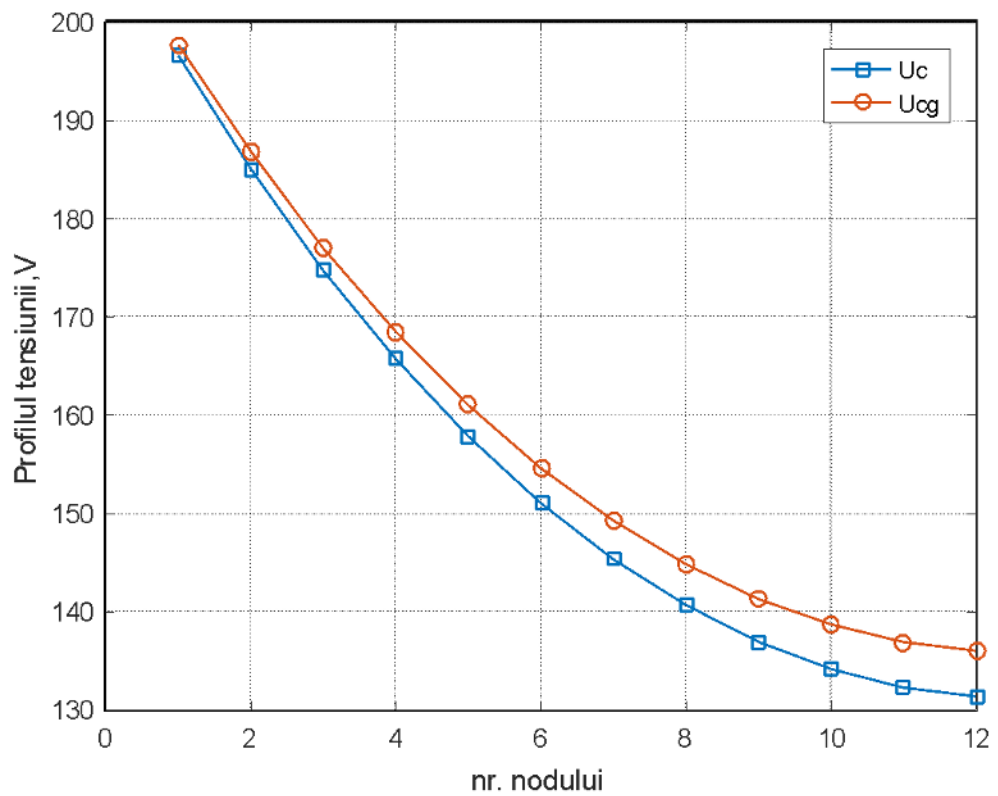


Fig. A6.12. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 21⁰⁰
($P_n = 4,223 \text{ kW} > P_g = 0,15 \text{ kW}$)

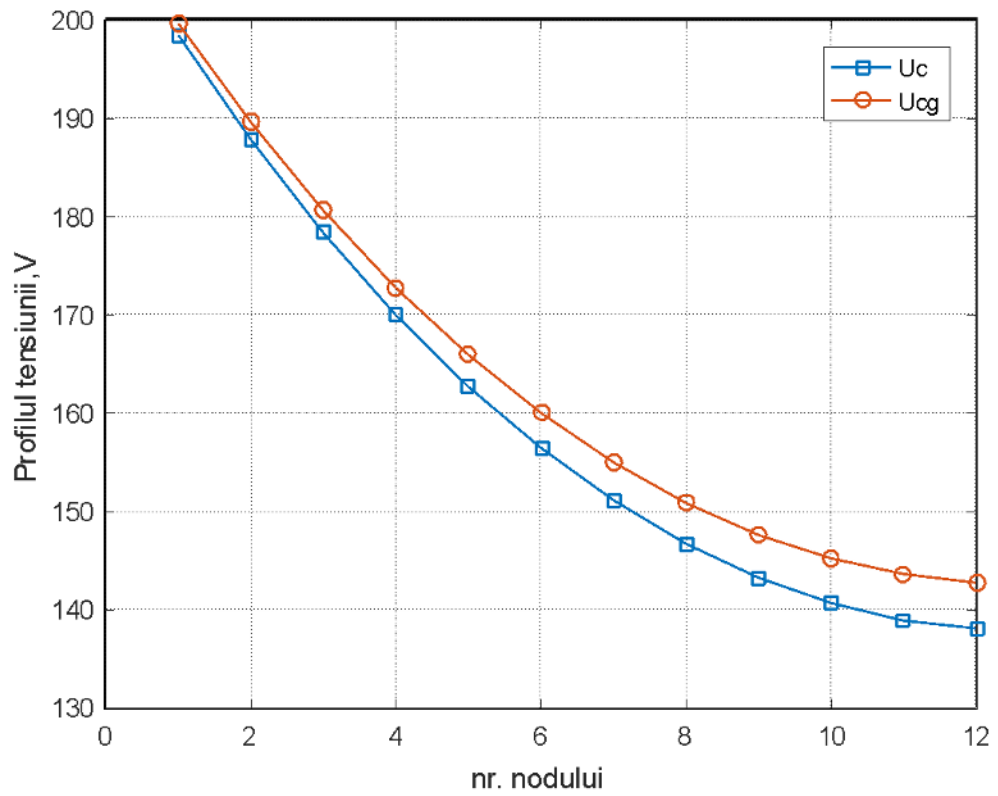


Fig. A6.13. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 22⁰⁰
($P_n = 3,753 \text{ kW} > P_g = 0,15 \text{ kW}$)

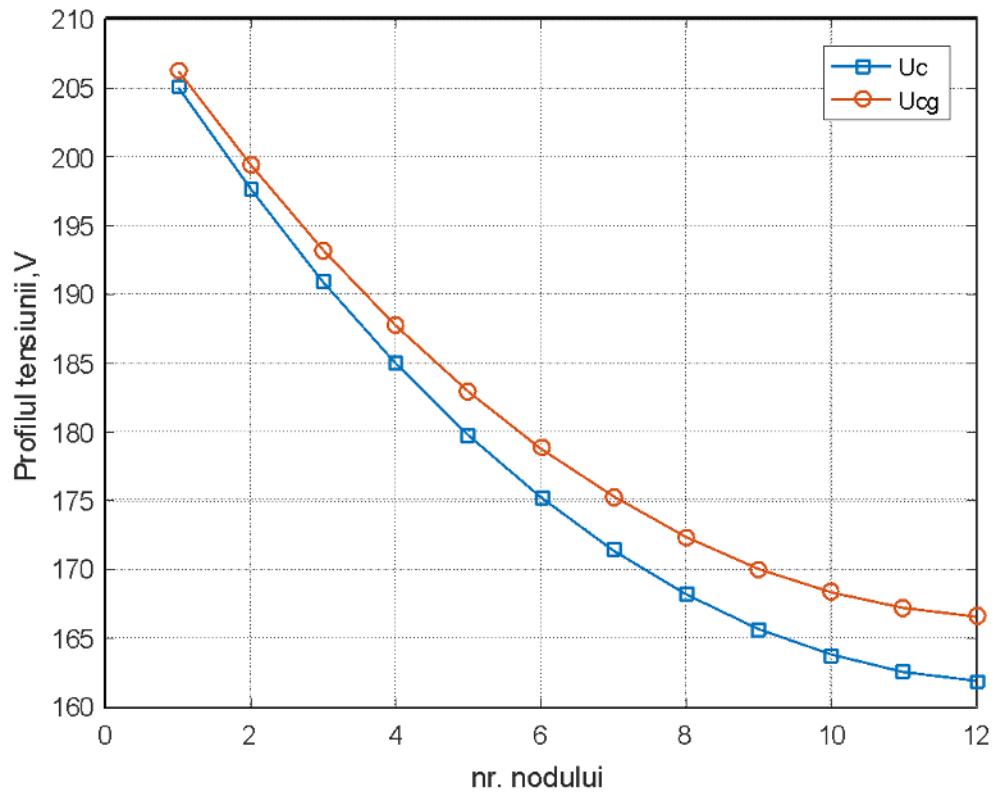


Fig. A6.14. Modelarea prin metoda generalizată a impactului consumului și GD ora 23⁰⁰
($P_n = 2,345 \text{ kW} > P_g = 0,15 \text{ kW}$)

Anexa 7. Algoritm de calcul a parametrilor Transformatoarelor

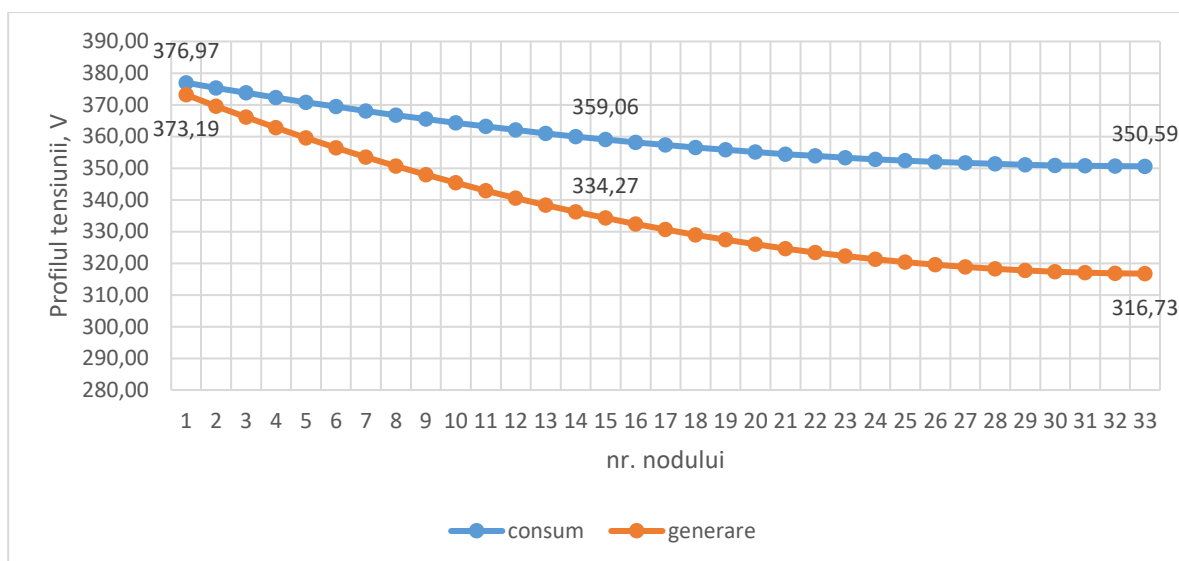


Fig. A7.1. Modelarea GD în REJT cu 33 consumatori și 33 SGD ($U=380\text{ V}$) ($P_g (0,405\text{ kW}) < P_c (1,501\text{ kW})$, ora 6^{00})

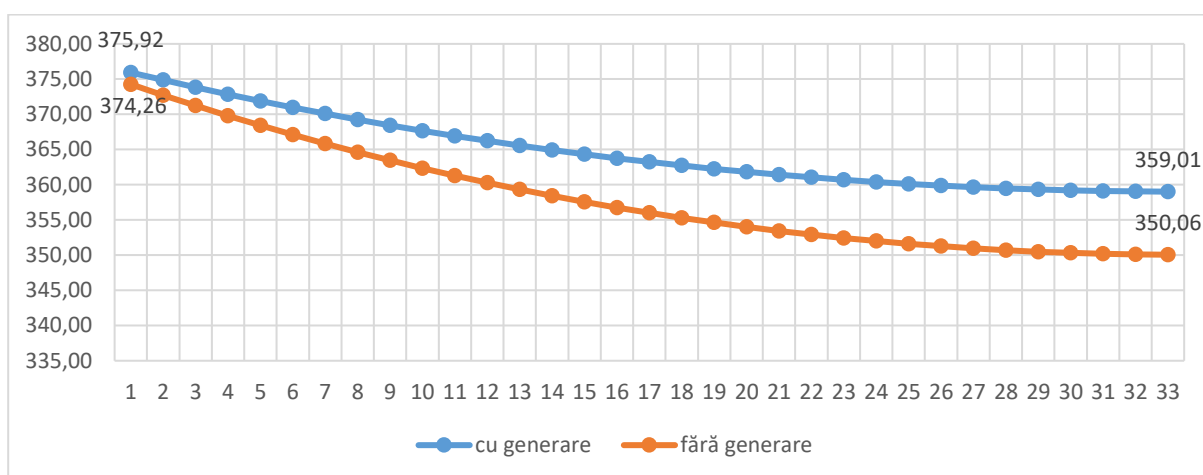


Fig A7.2. Modelarea GD în REJT cu 33 consumatori și 33 SGD ($U=380\text{ V}$) ($P_g (0,405\text{ kW}) < P_c (1,501\text{ kW})$, ora 6^{00}) (RASTR WIN)

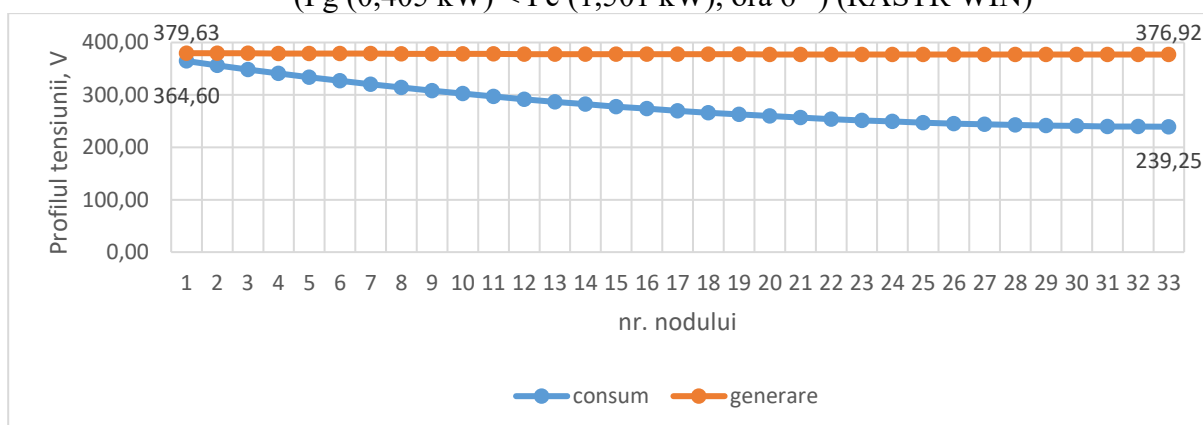


Fig. A7.3. Modelarea GD în REJT cu 33 consumatori și 33 SGD ($U=380\text{ V}$) ($P_g (2,721\text{ kW}) \geq P_c (2,636\text{ kW})$, ora 10^{00})

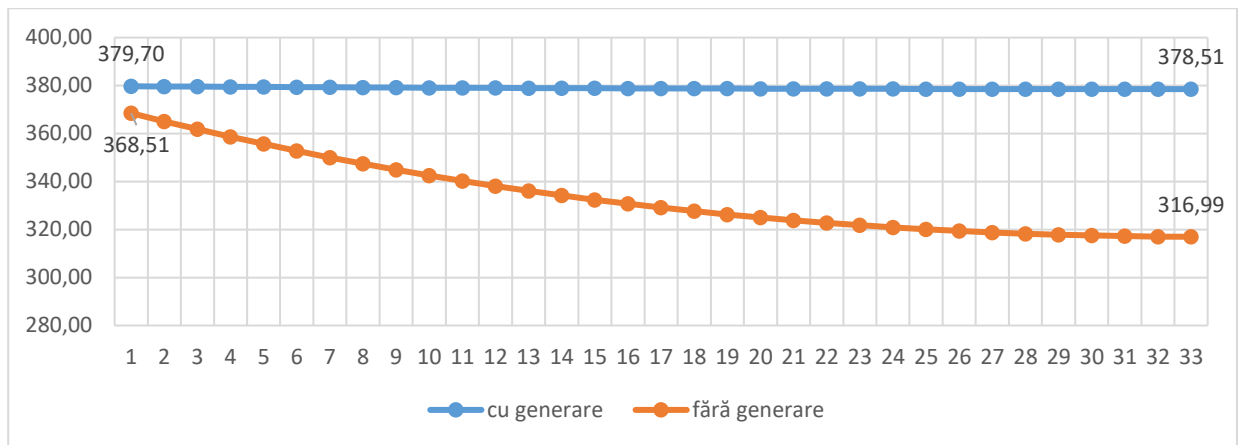


Fig. A7.4. Modelarea GD în REJT cu 33 consumatori și 33 SGD ($U=380\text{ V}$) ($P_g (2,721\text{ kW}) \geq P_c (2,636\text{ kW})$, ora 10^{00}) (RASTR WIN)

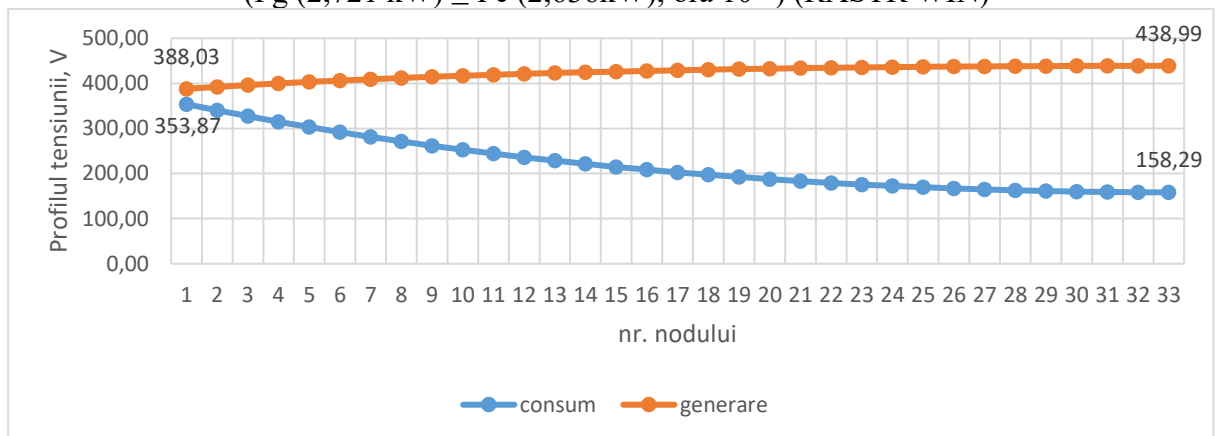


Fig. A7.5. Modelarea GD în REJT cu 12 de consumatori și 12 de SG în ($P_g (5,678) > P_c (3,284)$) ora 14^{00}

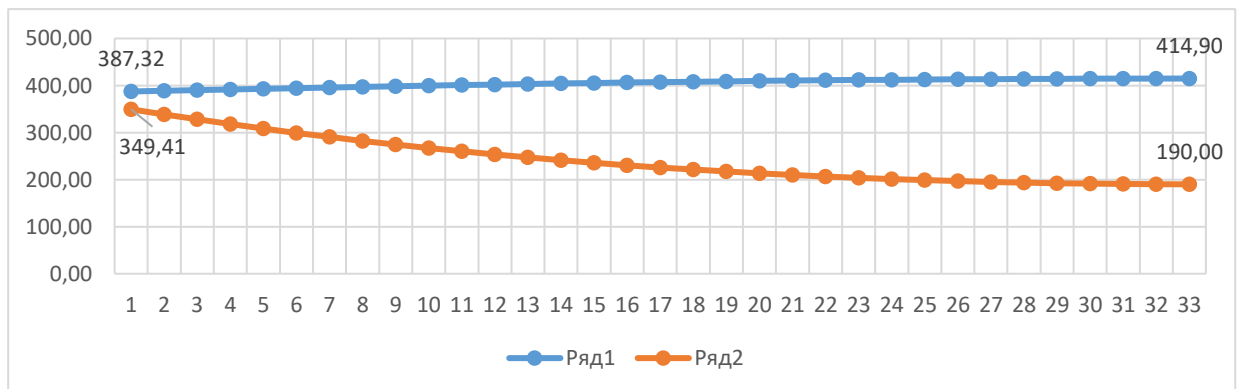


Fig. A7.6. Modelarea GD în REJT cu 12 de consumatori și 12 de SG în ($P_g (5,678) > P_c (3,284)$) ora 14^{00}

Anexa 8. Diplome, certificate
confirmări de participare



Fig. A8.1. Diplomă pentru participare la lucrările celei a 69 Conferințe științifice a studenților și masteranzilor, UASM 2016



Fig. A8.2. Certificat de participare în cadrul Conferinței Științifice a Doctoranzilor „Tendințe contemporane ale dezvoltării științei :viziuni ale tinerilor cercetători” UnAȘM, 2016



Fig. A8.3. Diploma de participare în cadrul conferinței UASM, 2017



CERTIFICAT DE PARTICIPARE

la Conferința Științifică a Doctoranzilor
(cu participare internațională)

*„Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători”
ediția a VI-a*

se acordă

Vieru Drita

dnui (dlui)

15 iunie 2017

Rector

Chișinău

acad. Maria DUCA

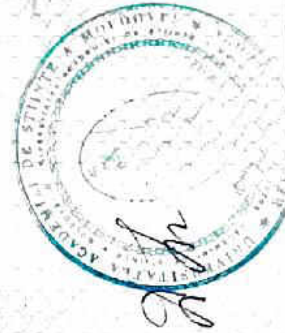


Fig. A8.4. Certificat de participare la conferința Științifică internațională UnAȘM, 2017

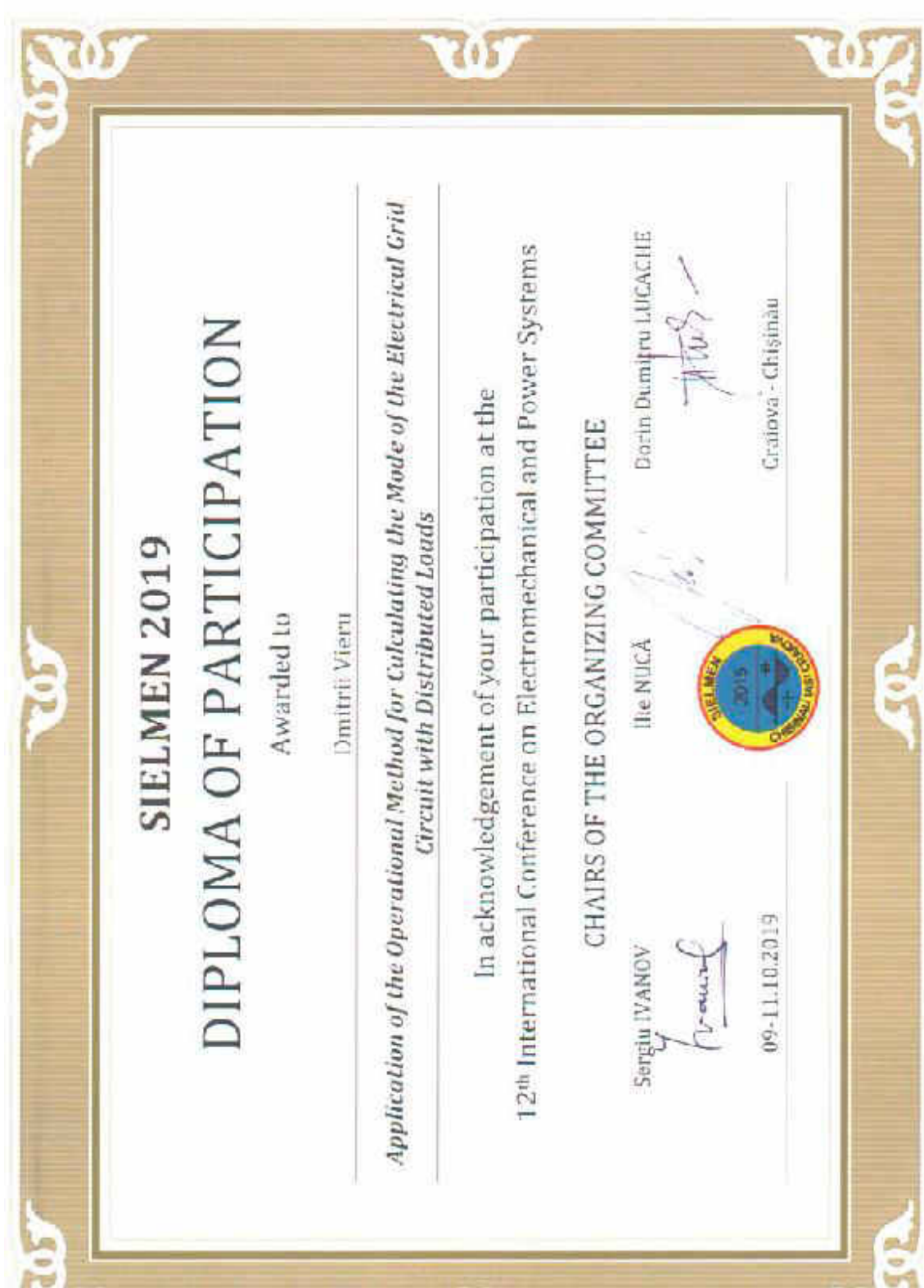


Fig. A8.5. Certificat de participare în cadrul conferinței internaționale SIELMEN, 2019

ACT
de implementare

mun. Chișinău

08.02.2021

La etapa de elaborare a compartimentelor de proiect „Rețele electrice externe” al zonelor rezidențiale și anume la proiectarea „Întovărășirilor pomicole” s-a aplicat „Modelul de calcul al rețelei electrice de joasă tensiune cu receptori distribuți” propus de către doctorandul VIERU Dmitrii care reprezenta I.P. „Institutul de Energetică”. În urma aplicării modelului s-au analizat cu ușurință pierderile de tensiune pentru un fider cu 27 de consumatori prin aplicarea modelării în mediul Matchad. În baza rezultatelor obținute, SRL „ELEMAG” a permis utilizarea datelor la publicarea rezultatelor la Conferința "Tendențe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători" Chișinău, Moldova, 15 martie 2016.

Aplicarea metodei este la moment utilizată la efectuarea studiilor de fezabilitate privind proiectarea Întovărășirilor Pomicole.

L. Ș

Director SRL „ELEMAG”



MIHAILIUC VLADIMIR



Fig. A9.1. Act de implementare „Modelul de calcul a rețelei electrice de joasă tensiune cu receptori distribuți”

DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII

Subsemnatul Vieru Dmitrii, declar pe răspundere personală că materialele prezentate în teza de doctorat sunt rezultatul propriilor cercetări și realizări științifice. Conștientizez că, în caz contrar, urmează să suport consecințele în conformitate cu legislația în vigoare.

data

Semnătura autorului _____

CURRICULUM VITAE



Nume	VIERU Dmitrii
Adresă	str. Livezilor, 2, or. Șoldănești
Telefon	068465570
E-mail	vierudmitry@gmail.com
Naționalitate	Moldovean
Data nașterii	01.12.1987
Experiență Profesională	2010-2013 – proiectant rețele electrice edilitare; 2017-2022 – lector universitar, Universitatea de Stat de Educație Fizică și Sport, (electrotehnică, Securitatea la incendii în instalațiile electrice și Automatizarea instalațiilor);
Educație și formare	1994-2003 - Școala medie de cultură generală nr.1 din or. Șoldănești; 2003-2007 - Colegiul Politehnic Bălți, specialitatea electromecanica – tehnician – electrician; 2007-2011 - Universitatea Tehnică a Moldovei, specialitatea electroenergetica – inginer – electrician; Universitatea Tehnică a Moldovei, specialitatea electroenergetica – masterat, inginer – electrician (2011-2013); 2013-2017 – Universitatea Academiei de Științe a Moldovei (Institutul de Energetică al Academiei de Științe al Moldovei (Specialitatea 221.01 „Sisteme și tehnologii energetice”)).
Starea familiala	Căsătorit
Competențe	Programarea în MATLAB; Modelarea în RastrWin3; Proiectarea asistată la calculator în AutoCAD; Modelarea în mediul MATCHAD.
Limba maternă	Limba română
Limbi străine cunoscute	Limba rusă-(C2). Limba Engleza (B1).

Lista lucrărilor științifice, științifico-metodice:

Articole în diferite reviste științifice (în reviste din Registrul Național al revistelor de profil, cu indicarea categoriei):

- **categoria A**

1. **VIERU D.** Cercetarea impactului generării distribuite asupra modificărilor lente de tensiune în rețelele electrice de joasă tensiune. Problemele energeticii regionale, 2020, no. 3(47), pp.20-28. ISSN 1857-0070. DOI: 10.5281/zenodo.4028507.(Baza de date WoS)

- **categoria B**

2. BERZAN, V., POSTORONCĂ, SV., **VIERU, D.**, TINTIUC, IU. O tratare generalizată a procedurii de calcul a regimului permanent și tranzitoriu a rețelei de distribuție. Problemele Energeticii Regionale. Institutul de Energetică al Academiei de Științe, Chișinău, Republica Moldova. 2015, 29(3), 25-32. ISSN 1857-0070.

Articole în culegeri științifice.

- **culegeri internaționale**

1. БЕРЗАН, В.П.; ПОСТОРОНКЭ, СВ.А.; **ВИЕРУ, Д.** Расчет методом контурных токов режима сети с распределенными нагрузками типа RLC. “Электротехнические и компьютерные системы”, Общая электротехника, №22 (98), 2016. –p.101-105. ISSN 2221-3805, ISSN 2221-3807 (Ucraina).

- **culegeri ale conferintelor naționale**

1. **VIERU Dumitru**, TATIAN, Ivan, POSTOTONCA, Sveatoslav. Procedeu de calculul al regimului staționar a rețelei electrice arborescente. In: Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei, 20 – 21 octombrie, 2014. Chișinău, 2015, vol. 1, pp. 353-356. ISBN 978-9975-45-249-6. ISBN 978-9975-45-381-3 (Vol.1).

2. ERMURACHI Iu., BERZAN V., **VIERU D.**, MORARU Larisa, ERMURACHI Iu.Iu. , CABAC S.. Convertor de curent continuu în curent continuu. *Conferința Științifică Jubiliară a studenților și colaboratorilor UTM*, 20 octombrie, 2014, Chișinău. Secțiunea EIE-3. Electrotehnica, Electromecanica și Metrologie.4p.

3. **VIERU Dumitru**. Analiza regimului nesimetric în rețelele electrice de joasă tensiune asupra calității energiei electrice. In: Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei, 1-14 decembrie, 2016. Chișinău, 2017, vol. 1, pp. 373-375. ISBN 978-9975-45-500-8. ISBN 978-9975-45-501-5 (Vol.1).

4. POSTORONCĂ Sveatoslav, **VIERU Dmitrii**. Calcularea regimului tranzitoriu în circuitul cu sarcini distribuite de tip rL și rC. Culegere a lucrărilor conferinței UASM 65 ani ai Facultății Inginerie Agrară și Transport Auto. Ch.: Ed. UASM, 2015. – 6p.

5. BERZAN, Vladimir, POSTORONCA Sveatoslav, **VIERU Dmitrii**, TINTIUC, Iurie. Calcularea regimului circuitului cu sarcini distribuite. In: Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei, 26-28 noiembrie, 2015. Chișinău, 2016, vol. 1, pp. 395-398. ISBN 978-9975-45-440-7. ISBN 978-9975-45-441-4 (Vol.1).

6. **VIERU, Dmitrii**. Calculul regimului rețelelor electrice de joasă tensiune cu surse de energie regenerabilă distribuită. Materialele Conferinței Științifice a Doctoranzilor. Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători. Ediția a V-a, 25.05.2016, UnAȘM, Ch.: 2016. 229-232.

7. **VIERU, D.**; TATIAN, I. Modelarea regimului de funcționare a micronețelei cu diferite tipuri ale surselor de generare de mică putere. Teze a 69-a Conferință științifică a studenților și masteranzilor UASM, 23 martie 2016, Chișinău. Ch.: Editura UASM. –pp.85-87.ISBN 978-9975-64-281-1.

8. Cojocari Marian, **VIERU Dumitru**. Modelarea matematică a creșterii temperaturii în circuitul R, L, în regim tranzitoriu. Materialele conferinței științifice a studenților și masteranzilor USEFS din 15 martie 2017, Chișinău. Culegere de articole științifice, 84 pagini, 50 exemplare.

9. Țurcan Irina, **VIERU Dumitru**. Calculul probabilității de apariție a incendiilor în turbinele eoliene de puteri mari. Materialele conferinței științifice a studenților și masteranzilor USEFS din 15 martie 2017, Chișinău. Culegere de articole științifice, 84 pagini, 50 exemplare.

10. **VIERU Dmitrii**, TURCULET Ștefan, GRAPĂ Doina. Modelarea matematică a riscurilor de incendiu în instalațiile eoliene. [Resursă electronică]. In: Conferința Tehnico-Științifică a

Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei, 16-18 noiembrie, 2017. Chișinău, 2018, vol. 2, pp. 207-208. ISBN 978-9975-45-545-9 (Vol.2).

11. **VIERU D.**, POSTORONCA SV., BERZAN V., GARȘTEA V. Utilizarea procedurii de decompoziție la calcularea regimului rețelelor electrice. Сборник Трудов «Энергетическая безопасность и управляемые электропередачи» за 2020. Выпуск No.11 (26).Кишинэу, СЕРУСМ, 2020, с.85-108.

- **Materiale/ teze la forurile științifice**

1. **ВИЕРУ ДУМИТРУ**, БЕРЗАН ВЛАДИМИР. Расчет стационарного режима радиальной сети с распределенными нагрузками и источниками генерации. Belorusia, Minsk. Conference „Integrating science and technology for a sustainable and secure future: energy, environment, informatics and human health. SSF-2014”, 18-21 septembrie 2014.Minsk/Alexander von Humboldt Foundation/Humboldt Kolleg Book of abstracts.-P.43-46. ISBN 978-985-6456-92-6.

2. ЕРМУРАКИ, Ю.В.; ЕРМУРАКИ, Ю.Ю.; **ВИЕРУ**, Д. Моделирование работы инвертора PV модулей при их параллельной работе с электрической сетью. Belorusia, Minsk. Conference „Integrating science and technology for a sustainable and secure future: energy, environment, informatics and human health. SSF-2014”, 18-21 septembrie 2014.Minsk/Alexander von Humboldt Foundation/Humboldt Kolleg Book of abstracts.-P.46-48. ISBN 978-985-6456-92-6

- **conferințe internaționale în republică**

1. **VIERU D.** Particularitățile racordării surselor regenerabile distribuite la rețeaua electrică de joasă tensiune. Conferința științifică Internațională a Doctoranzilor. Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători, 10 martie 2015, Chișinău, UnAȘM. Resp.ed. M. DUCA. Ch.: Artpoligraf, 2015, 45. ISBN 978-9975-3036-4-4.

2. **Dmitrii Vieru.** Application of the Operational Method for Calculating the Mode of the Electrical Grid Circuit with Distributed Loads. Chisinau, 2019 1-6. 10.1109/SIELMEN.2019.8905864.

SCRISOARE DE MULȚUMIRE

Doresc să îmi exprim mulțumiri colectivului Institutului de Energetică pentru suportul acordat în elaborarea și susținerea tezei de doctorat, precum și angajaților laboratorului „Modelarea și diagnoza echipamentului energetic”.

Apreciez cu desăvârșire acordarea suportului metodic-practic și participarea activă în dedicarea și profesionalismul fiecărui angajat a Institutului de Energetică, dar în special aș dori să mulțumesc persoanele care au contribuit semnificativ la pregătirea, ea ca cercetător și anume: Dl. Tirșu Mihail, Dl. Zaițev Dmitrii, Dl. Șit Mihail, Dl. Juravliov Anatolii, Dl. Daud Vasile, Dna Bîcova Elena, Dna Golub Irina, Dl. Olesciuc Valentin, Dl. Anisimov Vladimir, **Dl. Postolati Vitalie** și Dl. Boșneaga Valeriu. Expertiza și practica în cercetare pe care o posedă aceste persoane mi-au fost folositoare în elaborarea tezei, iar rezultatele acestei teze de doctor au o parte și din experiența dumneavoastră.

Apreciez dedicarea, implicarea și suportul acordat a regretatului profesor cercetător, doctor habilitat, **Berzan Vladimir**, care a participat la formarea mea în calitate de specialist la toate etapele în domeniul de cercetare a sistemelor și tehnologiilor energetice și mi-a lăsat moștenire cunoștințe care mi-au acordat posibilitatea de a elabora această teză ca continuitatea domeniului de cercetare pe care la dezvoltat dumnealui pe parcursul ultimilor ani.

În special, aduc mulțumiri colectivului Universității Tehnice a Moldovei, care au pus baza cunoașterii domeniului de cercetare, fără care nu aș putea să scriu această lucrare. Aici pot menționa următoarele persoane: Dl. Stratan Ion, Dl. **Macovei Ilie**, Dl. **Mogoreanu Nicole**, Dl. Ilie Nucă, Dl. Gropa Victor și Dl. Potingă Arhip.

VĂ MULȚUMESC încă o dată pentru suportul neprețuit și pentru contribuția excepțională de care ați dat dovadă.