

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО РОБОТИКА

Секция „Роботика в енергетиката“

маг. инж. Петър Иванов Петров

ВЛИЯНИЕ НА НАТОВАРВАНЕТО ВЪРХУ РЕАКТИВНАТА
МОЩНОСТ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИ И НЕСИНУСОИДАЛНИ
РЕЖИМИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен „Доктор“
по професионално направление 5.2 “Електротехника, електроника и
автоматика”

Научен ръководител:

Доц. дн инж. Илиян Христов Илиев

София, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от разширен семинар на секция „Роботика в енергетиката“ към Институт по роботика - БАН

Изследванията по дисертационния труд са извършени на територията на завод за производство на стартерни акумулаторни батерии и промишлено предприятие за производство на сода.

Защитата на дисертационния труд ще се състои в зала 427, бл.2 в Институт по роботика - БАН

Материалите по дисертационния труд са на разположение в деловодството на Институт по роботика – БАН

Благодарност: Изказвам уважение и благодарност към научния ми ръководител за ценните указания и практически препоръки при създаването на настоящата дисертация.

Научно жури:

1. Доц. д-р инж. Петко Николов Недялков - ИР-БАН
2. Проф. д-р Сия Вълчева Лозанова - ИР-БАН
3. Доц. д-р инж. Орлин Любомиров Петров - РУ „А. Кънчев“ – Русе
4. Проф. д-р инж. Иван Петров Петров - ВТУ „Тодор Каблешков“
5. Доц. д-р инж. Мартина Райчинова Томчева - ВТУ „Тодор Каблешков“

Резерва:

1. Проф. д-р Снежанка Петрова Костова - ИР-БАН
2. Проф. д-р инж. Иван Стефанов Минин – МГУ „Св. Иван Рилски“

Автор: Петър Иванов Петров

E-mail: p_petrov1977@abv.bg

Заглавие: Влияние на натоварването върху реактивната мощност при несиметрични и несинусоидални режими

А.ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

През последните години, внедряването на нови технологии, при изграждането и реконструкцията на компенсиращи системи, е насочено в следните основни направления:

Използването на високотехнологични сухи или полусухи КБ;

Внедряване на специализирани КБ за тежък режим на работа ($\text{THDi} \geq 30\%$), в случаите на замърсени мрежи;

Внедряване на разстройващи индуктивности, в случаите на замърсени мрежи;

Внедряването на специализирана компенсираща апаратура НН за капацитивен товар;

Внедряване на контактори с елегаз (SF_6) за КБ на СН;

Употреба на мощни специализирани силови електронни комутационни модули, в случаите на нужда от компенсация на бързо променящи се и динамични товари;

Внедряване на микропроцесорни регулатори с еднофазно или трифазно мерене на напрежение. Първите се използват в мрежи с липса на несиметрия (напреженова или токова), като по-ниско ценово решение;

Употреба на микропроцесорни регулатори с резонансна защита, с цел изключване на резонансни процеси;

Използване на регулатори с оптимизирани режими на управление, с цел еднаква средногодишна използваемост на отделните КБ. Този подход увеличава многократно експлоатационния срок на компенсиращите системи (КС), т.к. регулаторът комутира най-малко използваните КБ. По този начин се постига едновременна амортизация на всички елементи на КС.

Цели и задачи на дисертационния труд

Целта на настоящия дисертационен труд е следната:

Да се изследват и анализират процесите на компенсация на реактивните товари при несиметрични и нелинейни режими и при различно натоварване, да се приложат иновативни изчислителни и технологични методи за рационализиране и оптимизиране и се апробират резултатите в подходящи промишлени обекти, като се докаже технико-икономическата ефективност от реализираните решения.

За постигане на тази цел е необходимо да се формират и решат следните задачи:

1. Да се извърши обследване на широко разпространените в страната конвенционални методи за компенсация на реактивните товари с цел да бъдат проучени и обяснени техните експлоатационни особености, да се анализират високо-технологични съвременни решения за компенсация на реактивните товари и се покаже тяхното приложение в ЕСС на промишлени обекти;
2. Да се синтезират съвременни теоретични постановки за изследване, анализ и приложение на методите за компенсация на реактивните товари, с обектно ориентирани, методически обосновани и практически приложни характеристики;
3. Да се проведе изследване на компенсацията на реактивните товари при нелинейно и несиметрично натоварване с използване на адекватно синтезирана методика, апробирана в подходящ за изследване обект;
4. Да се изследват възможностите за оптимизиране компенсацията на реактивните товари в голям промишлен обект с използване на синхронни двигатели и кондензаторни батерии, чрез решаване на оптимизационна задача по критерии „Минимум на приведените годишни разходи“, като се докаже електроенергийната ефективност на технологичното решение.

Методи на изследване

Дисертационният труд се базира на голям обем експериментални изследвания, като всички данни и измервани величини са обработени и анализирани с методите на математическата статистика, теорията на планиране на експериментите и други инструменти.

Апробация на работата

Значителна част от резултатите на работата са представени в дисертацията и публикациите на автора.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационния труд е в обем от 179 стр., структуриран е в 4 глави, съдържа множество формули, 104 фигури, 38 таблици, 129 заглавия на литературни източници от които 84 на кирилица и 45 на латиница. В автореферата номерацията на фигурите, таблиците и формулите съответства на тази от дисертационния труд.

Навсякъде в дисертационния труд основните термини и определения са представени с техните съкращения и обозначения. Те, съответно за улесняване на прочита са изнесени в отделна страница в началото на дисертацията.

Б.КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА

ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР ВЪРХУ КОНВЕНЦИОНАЛНИ И ВИСОКОТЕХНОЛОГИЧНИ МЕТОДИ ЗА КОМПЕНСАЦИЯ НА РЕАКТИВНИТЕ ТОВАРИ

Изброените неблагоприятни положения от нисък $\cos\phi$ налагат, в ЕСС на ПП, да се прилагат мероприятия за подобряване на $\cos\phi$. Тези мероприятия трябва да се провеждат в две насоки – подобряване на $\cos\phi$ без компенсиращи устройства (естествени методи) и подобряване на $\cos\phi$ с помощта на компенсиращи устройства.

Всички тези фактори предвещават, че КС, на база КБ, още дълги години ще бъдат основно техническо средство за компенсация на реактивните товари. Това се потвърждава и от следните дейности:

- Съществуващите КС, на база КБ, за България, с инсталирана мощност стотици MVAr, са огромен брой, като голяма част от тях имат изразходван експлоатационен ресурс. По-голямата част от тях са маслени, с големи диелектрични загуби, работят неефективно и е целесъобразна тяхната подмяна със сухи КБ от полипропиленов тип.
- За разлика от статуквото от преди десет години, в момента, множеството реномирани производители на ел. апаратура имат сериозни позиции на нашия пазар, като почти всички предлагат високо качествени решения за КС, на база КБ. Най-популярните от тях са Schnieder Electric, ABB, Siemens, Legrand и др. Към тях, също така, трябва да се прибавят фирмите, които предлагат оптимизирани ценови решения и които заемат по-нисък клас – ZEZ Sliko, Italfarad, MKS, ChinT и много други. Предвид мащабите на България, това предопределя много сериозни икономически интереси и силна конкуренция, което води до много добри финансови условия при производство, внедряване и експлоатация на КС, на база КБ.
- Развитието на технологиите, както и фактът, че България, като член на Европейския съюз, прие пакети от нормативни мерки, касаещи качеството и безопасността на ел. оборудване, утвърдиха КС, на база КБ, като евтино, надеждно, с висока степен на безопасност и екологично техническо решение при КРТ. В условия на криза и понижено натоварване, това класическо средство с лесна, проста и ефективна експлоатация, е все по-предпочитано, като техническо решение. В това отношение, основна задача на фирмите внедрители е да придадат по-голяма функционалност на тези устройства, като ги интегрират към други системи с висока технологичност и по този начин ги направят по-ефективни и надеждни.

1.1.1 Особенности на КРТ с помощта на КБ

Напречна КРТ

При нея, КБ се включват паралелно на елементите в мрежата. Използва се основно за НН и СН в ПП. Основното предназначение на напречната КРТ (фиг. 1.6) е подобряването на $\cos\phi$ и, на второ място, постигане на регулиране на нивото на напрежението. Мощността на еднофазна и трифазна КБ се определя от изразите:

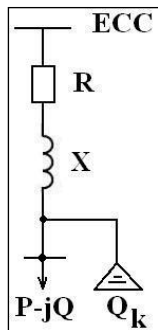
$$Q = \omega C U^2 \cdot 10^{-3} [\text{kVAr}]$$

$$Q = \sqrt{3} \omega C U^2 \cdot 10^{-3} [\text{kVAr}]$$

където: U – фазно напрежение [V]; C – капацитет на КБ [μF].

Загубите на активна мощност до и след КРТ (ΔP_1 и ΔP_2) и тяхното намаляване, след КРТ, се определят от изразите:

$$\Delta P_1 = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \cdot 10^{-3} [\text{kW}]$$



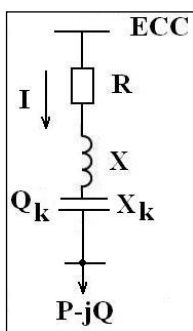
Фиг. 1.6

Надлъжна КРТ

При нея, КБ се включват последователно в мрежата и през тях протича пълният ток на линията. Използва се основно в мрежи ВН, с цел повишаване на тяхната устойчивост, а също и в мрежи СН на ПП, за подобряване на режима на напрежение (намаляване на отклонението и колебанието на напрежението).

За фиг. 1.7 е показана заместващата схема, при надлъжна КРТ. Мощността на КБ се определя от съображението, че токът през нея е равен на пълния ток I , който протича по захранващата линия [82]:

$$Q_K = \frac{I^2}{\omega \cdot c \cdot 10^{-3}} [\text{kVAr}]; I = \frac{U}{X_K} \cdot 10^{-3} [\text{A}]$$



Фиг. 1.7

Следователно, мощността на КБ, при надлъжна компенсация (за разлика от този при напречна компенсация), представлява променлива величина, която се изменя във времето, в зависимост от промяната на тока на товара в линията му.

1.2.1. Съвременни решения за КРТ на база гъвкави променливотокови системи (FACTS)

Уредбите FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) са предложени в края на 1980-те години от EPRI (Electric Power Research institute), САЩ, в резултат от усилията за въвеждане и развитие на постояннотоковите електропренасания ВН, с мощност от стотина до няколко хиляди мегавата. Постояннотоковите въздушни електропроводи с дължина от порядъка на 1000 km и кабелни линии с дължина около 50 km за преодоляване на морски проливи или

за свързване на ЕЕС с различна честота, са обзаведени с т. нар. конвертори (*преобразуватели*) за преобразуване на променливия ток в постоянен и обратно. Сега в света са изградени над 50 кабелни и въздушни електропренасяния с номинално напрежение 110 kV до 1500 kV на постоянен ток, с електропреносна способност общо около 50 000 MW и конвертирана мощност 100 000 MW[127].

Използваните изправители и инвертори в преобразователни системи през последните десетина години са изградени на базата на управляеми компоненти - тиристори ново поколение (GTO, IGBT, IGCT). Конверторите от типа източник на напрежение (*Voltage Source Inverter, VSI*), с широчинно-импулсна модулация (MLI) са реализирани с компоненти IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*). Тези последните са получили сериозно развитие, достигайки граничните 4,5 kV за напрежение и 1,8 kA за токово натоварване. Такива конвертори притежават значими предимства пред традиционните (каквото е и нашият SVC, монтиран в ПС „Добруджа“): не се нуждаят от скъпи филтри за висши хармоници, нито от източник на реактивна енергия, както и от обмен на информация между двата конвертора, ако се касае за постояннотоково електропренасяне. *Генерирайки напрежения с определена честота и регулируеми амплитуда и фаза, те представляват реални статични уредби, способни да доставят или да поемат както активна, така и реактивна мощност, с бързодействие и достатъчна надеждност.*

Първото постояннотоково електропренасяне с конвертори от нов тип е реализирано през 1998 г. в Швеция за пренасяне на електрическа мощност 50 MW посредством подводен кабел на разстояние 70 km от ветроенергиен парк в Gotland до подстанция в основната ЕЕС на тази страна. Малко порено е осъществена една подобна връзка с преносна способност 225 MW между Финландия и Естония. През май 2002 г. е въведено в експлоатация постояннотоково електропренасяне с дължина 40 km, с мощност 330 MW и номинално напрежение 138 kV между Connecticut и Long Island, САЩ.

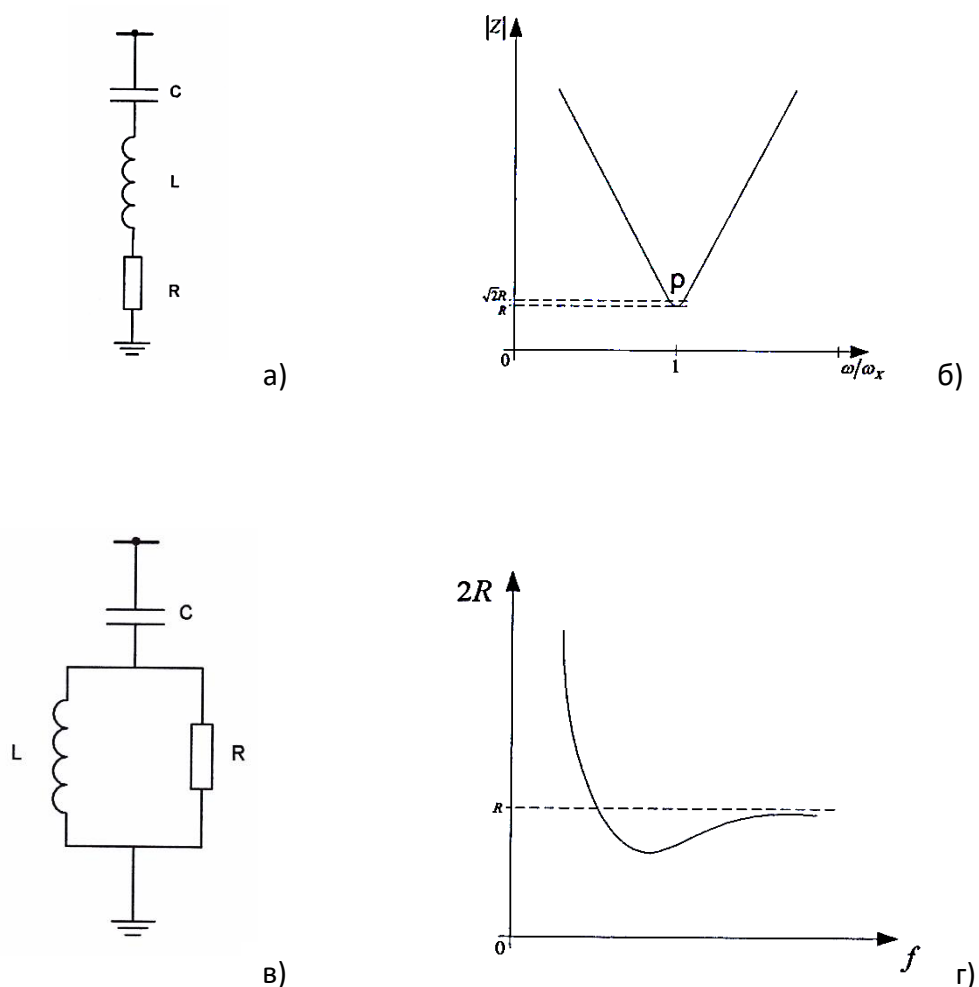
Пасивни филтри

В електрическите мрежи филтрите се използват преди всичко за да намалят амплитудата на тока или напрежението, на една или няколко фиксирани честоти (**паралелни филтри**). Когато е необходимо да се избегне проникването на токове с определена честота в отделни възли на преобразователните станции или части от електрическата система, могат да се използват **последователни филтри**, състоящи се от паралелно включени кондензатори и бобини, създаващи голямо съпротивление за протичащия ток на избраната честота. Въпреки това такова решение не може да бъде използвано за ограничаване на хармониците на самия източник, защото генерациите на хармониците на нелинейните елементи се явяват неотменима черта на тяхната нормална работа. Що се касае до самите статични преобразуватели, то обикновено за тях се вземат мерки за ограничаване на проникването на хармоници на тока в системата с помощта на създаване на къси съединения с малки съпротивления за хармоничните честоти. По принцип е възможно създаването на комбинирани последователни и паралелни пасивни

филтри за намаляване на хармониците на тока и напрежението, въпреки че се получават големи загуби на електрическа мощност и са необходими много средства.

Паралелният филтър е настроен на определена честота, ако на същата неговото капацитивно и индуктивно съпротивление са равни. **Качествения фактор** на филтъра - Q , определя точността на неговата настройка. Филтри с висок качествен фактор са с $Q = 30 \div 60$. Филтрите с нисък качествен фактор имат малко съпротивление в широки граници, особено в случай, когато $Q < 5$. Ако такъв филтър е настроен на седемнадесетия хармоник, то той може да се разглежда като филтър за високи честоти.

На фиг.1.17а,б,в,г се представят основните схеми на пасивни филтри и съответстващите зависимости на съпротивлението им от честотата.



Фиг.1.17 Схеми и зависимости за пасивни филтри

За настроен филтър, качественият фактор се определя като съотношение на съпротивлението на индуктивността или капацитета при резонанс, към активното му съпротивление.

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (1.33)$$

Както е показано на фиг.1.17б честотната лента е ограничена честота, на която реактивното съпротивление на филтъра е равно на активното му съпротивление (т.е. ъгъла на пълното съпротивление е равен на 45°) и честотата на пълното съпротивление е равна на $\sqrt{2}R$.

Качественият фактор е свързан със широчината на честотната лента и се изразява със следното съотношение:

$$Q = \frac{\omega_n}{p} \quad (1.34)$$

където: ω_n - настроената честота, rad/s ; p - ширина на честотната лента

Точността на настройка на филтъра и пропускането на високите честоти е обратно-пропорционална на качествения фактор, т.е.

$$H = \frac{R}{X} \quad (1.35)$$

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ПЪРВА ГЛАВА

1. Тук подробно са разгледани конвенционални методи за КРТ. Тези постановки са намерили широко приложение в ЕСС на промишлени обекти и комунално-битовия сектор. Тяхното изучаване и познаване е все още актуално поради голямото им разпространение, въпреки тенденциите за постепенен отказ от използването им. Характеризират се с простота на експлоатацията при внедряването им, не изискват високо квалифициран персонал за ремонт и поддръжка и изискват сравнително ниски експлоатационни разходи. Тяхната жизненост се подсилва и от факта, че понастоящем електроенергетиката в страната не е ориентирана към прилагане на иновативни технически решения, поради неразбиране и отказ от страна на административните фактори, които не оценяват ползите от внедряване на такива технологии. Изоставането в това направление в сравнение с европейските стандарти е значително. За преодоляване на това негативно положение са необходими мерки, свързани с промяна на нормативната база и цялостната стратегия на регулаторните органи по отношение на ролята на КРТ за подобряване на енергийната ефективност.

2. *Направен е анализ на високо-технологични иновативни технически решения за КРТ, свързани с прилагане на схемотехнически постановки, изградени на база на силовата електроника, микропроцесорни модули и компютърни системи. Представени са високоефективни схемни решения за синтезиране на пасивни и активни филтри. Анализирани са възможностите за постигане на интелигентни адаптивни технически решения с много висока ефективност. Освен това е обяснено комплексното въздействие на филтро-компенсиращите системи, с помощта на които се минимизират няколко параметъра едновременно, свързани с КРТ.*

ВТОРА ГЛАВА

СЪВРЕМЕННИ ТЕОРЕТИЧНИ ПОДХОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ, АНАЛИЗ И ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДИТЕ ЗА КОМПЕНСАЦИЯ НА РЕАКТИВНИТЕ ТОВАРИ

2.1 Теоретична постановка за определяне ефективните стойности на някои електротехнически величини свързани, с КРТ

Несиметричните и нелинейните режими в ЕСС се оценяват с помощта на два основни подхода - хармоничния анализ на Фурие и метода на симетричните съставящи на Фортеску. През 20 век, различни изследователи (Будеану, Кларк, Парк, Акаги, Фризе, Толберт, Пент и др.) са разработили т нар. Мощностни теории, които създават нов подход за оценка на различните видове мощности, респективно нови технически и технологични решения за КРТ. Известни са няколко мощностни теории, базирани на използването на моментната мощност, или т. нар. “Р-Q теории”. Първоначално те са създадени за трифазни трипроводни мрежи , а в последствие са доразвити за четирипроводни системи с нулев проводник.

Р-Q теорията спада към теориите във времевата област (за разлика от теориите в честотната област, като разложението на Фурие), което позволява тя да бъде използвана както за стационарен режим, така и за преходни. Това я прави една от най-използваната за управление на активни филтри. Предимство на теорията е простотата на изчисленията, които се базират само на аритметични операции. Единственото изключение е разделянето на някои компоненти на постоянни и променливи. Въпреки това, теорията дава възможност да се извършва дефиниране на режимите във всяка електроснабдителна система, като се постига определяне на величините в рамките $1/6$ до 1 период на основната честота. Същността на р-q е трансформация от стационарна система с а-b-c координати в система с координати α - β -0. Тя съответства на алгебричната трансформация, известна като трансформация на Clarke, при която координатите α - β са ортогонални една спрямо друга, а координатата 0 съответства на компонентите с нулева последователност. Компонентите на нулевата последователност се различават от компонентите на нулевата последователност изчислявани по метода на симетричните съставящи (трансформация на Fortescue).

През 1932 г. Fryze [10,12] разширява концепцията за триъгълника на мощностите , като я развива и за несинусоидални условия. Идеята е да се дефинира такъв моментен ток, който съвпада по форма с формата на напрежението. Този ток $i_a(t)$ се нарича моментен активен ток, а произведението от активният ток и напрежението (ако е чисто синусоидално) дава като резултат активната мощност на товара. Токовата компонента - $i_n(t) = i(t) - i_a(t)$, разлика между пълния и активният ток , е наречена от Fryze “wattless current”

или “безмощностен ток”. Интегралът от производението на напрежението и неактивният ток е нула. В резултат на тази концепция, Fryze заключава, че електрически товар, захранван с несинусоидално напрежение може да бъде моделиран използвайки линейна проводимост в паралел с токов източник, чийто ток е равен на i_n . Моделът на Fryze е математически коректен и следва директно от подхода взаимства от синусоидални линейни системи. Но, това е опростен модел който не изследва всички детайли на моментната мощност и не разкрива истинският механизъм на енергийният трансфер между източникът на мощност и товарът. За да може една мощностна теория да обяснява физичните явления, тя трябва да произлиза от електромагнитното поле [18] и да е създадена на базата на вектора на електрическото поле $\vec{E}$ и вектора на магнитния интензитет $\vec{H}$. Векторното произведение на тези два вектора е известно като вектор на Пойнтинг:

$$\vec{\Phi} = \vec{E} \times \vec{H} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

В [18] е показано приложението на тези вектори при изследването на електрически вериги. Много от тези разглеждания са приложени в стандарта IEEE Std 1459-2010, озаглавен “*Определения за измерване на електрическите мощностни величини при синусоидални, несинусоидални, балансиранни, или небалансирани условия.*” [19], които могат да послужат като база при изследването на различните мощности, или при изследването на загубите на мощност и процесите на КРТ.

В табл. 2.1 е направено сравнение на различни мощностни теории в зависимост от това дали използват моментни или средни стойности и от фазността на захранването [25]. Класифицирани са в три категории:

- *Мощностни теории, дефинирани във времевата област ;*
- *Мощностни теории, дефинирани в честотната област ;*
- *Мощностна теория, базирана на оптимизационен подход [22] ;*

Теорията за обобщената моментна неактивна мощност (Generalized Instantaneous Non Active Power- GINAPT) е базирана на идеята на Fryze за неактивна мощност ток и е продължение на теорията предложена в [20]. Тя не използва Фуриеровото преобразуване, като величините (токове, мощности и др.) се пресмятат на база на моментните стойности. Анализът показва, че при пренебрегване импеданса на захранващите линии, дефинициите на Fryze и тези на оптимизационния подход, съвпадат напълно. Всички дефиниции са функция на времето и се представят в таблица 2.2.

Таблица 2.1: Сравнение между някои мощностни теории

Автор(и) на мощностна теория	Година на публикуване	Брой фази в системата			Стойност на величините	
		1	3	Многофазна	Средна и/или еф. ст-ст	Моментна ст-ст
Мощностни теории, дефинирани във времевата област						
Fryze (Мощностна теория на Fryze) ортогонални токове	1931	x			x	
Kusters и Moore - индуктивни и капацитивни токове	1979	x			x	
Depenbrock - първият хармоник на напрежението и тока	1979	x			x	
Akagi, Nabae, Kanazawa - p-q мощностна теория	1983		x			x
Ferrero, Superti- Furga - мощностна теория на Парк	1991		x			x
Willems - обобщение по мощностните теории на Akagi и Ferrero	1992		x	x		x
Depenbrock -FDB(Fryze-Buchholz-Depenbrock) мощностна теория	1993		x	x	x	x
Rosetto и Tenti -моментни ортогонални токове	1994		x	x		x
Nabae и Tanaka -моментен вектор в полярни координати	1996		x			x
Peng -теория за обобщената реактивна мощност	1996		x			x
Peng и Lai -теория на за обобщената неактивна мощност	2000	x	x	x	x	x
Мощностни теории, дефинирани в честотната област						
Budeanu	1927	x			x	
Sheperd и Zakikhani	1972	x				
Czarnecki -теория на физическите токови компоненти	1983 1994	x	x		Хармоничен анализ	
Оптимизационен подход						
Pasko, Siwczynski, Walczak	1985	x	x	x	x	

Таблица 2.2. Определения според теорията за обобщената неактивна мощност [28]

Моментни определения	Ефективни (средноквадратични) определения	Средни мощности	Пълни Мощности
$\mathbf{u}(t)=[\mathbf{u}_1(t), \mathbf{u}_2(t), \dots, \mathbf{u}_m(t)]^T$	$\mathbf{U}(t)=\sqrt{\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{u}^T(\tau) \cdot \mathbf{u}(\tau), d\tau}$		
$\mathbf{i}(t)=[\mathbf{i}_1(t), \mathbf{i}_2(t), \dots, \mathbf{i}_m(t)]^T$	$\mathbf{I}(t)=\sqrt{\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{i}^T(\tau) \cdot \mathbf{i}(\tau), d\tau}$		
$\mathbf{i}_a(t)=\frac{\mathbf{P}(t)}{\mathbf{U}_{ref}^2(t)}$	$\mathbf{i}_a(t)=\sqrt{\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{i}_a^T(\tau) \cdot \mathbf{i}_a(\tau), d\tau}$		
$\mathbf{i}_n(t)=\mathbf{i}(t)-\mathbf{i}_a(t)$	$\mathbf{i}_n(t)=\sqrt{\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{i}_n^T(\tau) \cdot \mathbf{i}_n(\tau), d\tau}$		
$\mathbf{s}(t)=\mathbf{u}^T \mathbf{i}=\sum_{k=1}^m \mathbf{u}_k(t) \mathbf{i}_k(t)$		$\mathbf{P}(t)=\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{s}(\tau), d\tau$	
$\mathbf{p}_a(t)=\mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}_a(t)=\sum_{k=1}^m \mathbf{u}_k(t) \mathbf{i}_{ka}(t)$		$\mathbf{P}_a(t)=\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{p}_a(\tau), d\tau$	
$\mathbf{p}_n(t)=\mathbf{u}^T(t) \mathbf{i}_n(t)=\sum_{k=1}^m \mathbf{u}_k(t) \mathbf{i}_{nk}(t)$		$\mathbf{P}_n(t)=\frac{1}{T_{avg}} \int_{t-T_{avg}}^t \mathbf{p}_n(\tau), d\tau$	
			$\mathbf{S}(t)=\mathbf{U}(t) \mathbf{I}(t)$
			$\mathbf{P}_{app}(t)=\mathbf{U}(t) \mathbf{I}_n(t)$
			$\mathbf{Q}(t)=\mathbf{U}(t) \mathbf{I}_n(t)$

В табл.2.3 са представени обобщен вид разгледаните по-горе величини, характеризиращи нелинейни и несиметрични (небалансиранни) системи.

Таблица 2.3. Величини при несиметрични и несинусоидни режими.			
Величина, Характеристика	Означение и дименсия	Фундаментални мощности	Нефундаментални мощности
Пълна мощност	$S_e(t)[VA]$	$S_{ef}(t)[VA]$ $S_f^+(t)[VA]$ $S_{неб.f}(t)[VA]$ $S_{Uнеб.f}(t)[VA]$ $S_{Iнеб.f}(t)[VA]$ $S_{UIнеб.f}(t)[VA]$	$S_{eN}(t)[VA]$ $S_{eH}(t)[VA]$
Активна мощност	$P(t)[W]$	$P_f^+(t)[W]$	$P_H(t)[W]$
Неактивна мощност	$N(t)[var]$	$Q_f^+(t)[var]$	$D_{eI}(t)[var]$ $D_{eU}(t)[var]$ $D_{eH}(t)[var]$
Фактор на мощността	$PF(t)[-]$	$PF_f^+[-]$	-
Замърсяване от хармоници	-	-	$\frac{S_{eN}(t)}{S_{ef}(t)}$
Небаланс на товара	-	$\frac{S_{неб.f}(t)}{S_f^+(t)}$	-

• **Обобщен критичен анализ на теоретичната постановка:**

Анализа на ефективните стойности на напреженията (U_e, U_{e1} и U_{eH} ф - ли 1.33) показва, че изчислените стойности по тези формули са понижени. В същото време ефективните стойности на токовете I_e, I_{e1} и I_{eH} са с повишени стойности, понеже в изразите за тяхното изчисляване (ф - ли 1.34), са включени ефективните стойности на токовете в неутралата.

Ясно е, че изчислителните мощности, които зависят от токовете ще бъдат със завишени стойности и обратно, тези които зависят от стойността на напреженията, ще бъдат с по-малки стойности. В съответствие с горното, от вторите в [87,88,93], препоръчват ефективната стойност на пълната мощност да се изчислява, без да се включва тока в нулевия проводник във ефективната стойност на общия ток.

2.1 Енергичен подход при оценка на деформацията и дебаланса на токовете и напреженията в ЕСС, свързан с КРТ.

Представените в табл.2.1 мощностни теории на Fryze, Akagi, Peng, Budeanu и др. дават възможност за по точна оценка на различни енергетични характеристики и за по-пълно и прецизно обвързване процесите на КРТ с показателите за качеството на електрическата енергия (ПКЕЕ) при нелинейни и несиметрични режими. Такъв подход е необходим при разработване на

методически указания за реализиране на конвенционално КРТ, но най-вече при прилагане на съвременни методи за високо технологична компенсация при използване на FACTS, Smard grid, пасивни и активни филтри и др.

В нови изследвания [77,78,123], са разработени адаптирани обобщени показатели за оценка на качеството на ЕЕС. Методиката е съчетание на теоретични подходи и практично-приложни постановки. Осигурява възможност за анализ на масиви от данни, записвани от мрежови анализатори. Чрез използване на софтуерно приложение в среда MathCAD, с инструменти на матричното смятане, е възможно да се извърши експресен анализ на новедефинираните величини.

Методиката е развита в следната последователност. По аналог на изрази(2.15), (2.16), (2.18) и (2.19), се определят еквиваленти на много (rms) напрежение и ток U_e и I_e чрез линейните напрежения U_{12}, U_{23} и U_{31} и линейните токове I_{12}, I_{23} и I_{31} :

$$U_e = \sqrt{\frac{U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2}{3}} \quad ; \quad I_e = \sqrt{\frac{I_{12}^2 + I_{23}^2 + I_{31}^2}{3}} \quad (2.45)$$

Развитието на изрази (2.14) и (2.16) е дало възможност на авторите [91, 95,97] да предложат практично приложни изрази за определяне на rms на фундаменталните напреженови хармоници $U_{12f}, U_{23f}, U_{31f}$ и чрез фундаменталните хармоници на токовете $I_{12f}, I_{23f}, I_{31f}$.

$$U_{12f} = \frac{U_{12}}{\sqrt{\frac{THDU_{12}}{100} + 1}}; U_{23f} = \frac{U_{23}}{\sqrt{\frac{THDU_{23}}{100} + 1}}; U_{31f} = \frac{U_{31}}{\sqrt{\frac{THDU_{31}}{100} + 1}}$$

$$I_{12f} = \frac{I_{12}}{\sqrt{\frac{THDI_{12}}{100} + 1}}; I_{23f} = \frac{I_{23}}{\sqrt{\frac{THDI_{23}}{100} + 1}}; I_{31f} = \frac{I_{31}}{\sqrt{\frac{THDI_{31}}{100} + 1}} \quad (2.46)$$

В съответствие с IEEE555 е въведен (TDD – total demand distortion) за напреженията и токовете съответно VTDD и ITDD.

$$VTDD_{12} = \sqrt{\frac{U_{12}^2 - U_{12f}^2}{U_{12}^2}}; VTDD_{23} = \sqrt{\frac{U_{23}^2 - U_{23f}^2}{U_{23}^2}}; VTDD_{31} = \sqrt{\frac{U_{31}^2 - U_{31f}^2}{U_{31}^2}}$$

$$ITDD_{12} = \sqrt{\frac{I_{12}^2 - I_{12f}^2}{I_{12}^2}}; ITDD_{23} = \sqrt{\frac{I_{23}^2 - I_{23f}^2}{I_{23}^2}}; ITDD_{31} = \sqrt{\frac{I_{31}^2 - I_{31f}^2}{I_{31}^2}} \quad (2.47)$$

Обобщените трифазни коефициенти $VTDD_{3P}$ и $ITDD_{3P}$ се определят в съответствие с изразите:

$$VTDD_{3P} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^3 THD_{U_i}^2 \cdot \frac{U_{f_i}^2}{U_{e_i}^2}}; ITDD_{3P} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^3 THD_{I_i}^2 \cdot \frac{I_{f_i}^2}{I_{e_i}^2}} \quad (2.48)$$

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ВТОРА ГЛАВА

1. Представени са теоретични постановки за анализ на несиметрични и нелинейни режими абстрахирани от двата основни подхода – хармоничния анализ на Фурие и метода на симетричните съставящи на Фертескю. Направен е сравнителен анализ на различни мощностни теории в зависимост от базисната мощност (средно, ефективна или моментна), а също в зависимост от използваните фундаментални и нефундаментални мощности. Разглеждането има отношение към цялостната концепция за анализ на нелинейни и небалансирани системи и изяснява същността на неактивните мощности (деформационна, пулсираща, скрита).

2. Във формализован синтезиран вид са представени основните изрази, даващи релативната връзка на КРТ с качеството на ЕЕ. На тази база е приложен дуалистичен подход за оценка на КРТ с отчитане влиянието на режима на напрежение. Определено е количествено влиянието на отклонението на напрежението върху компенсиращата мощност Q_k . По аналогичен начин е приложен енергетичен подход за оценка на деформацията и дебаланса на токовете и напреженията в ЕСС свързани с КРТ. Показано е енергетичното въздействие на натоварването върху ПКЕЕ, респективно върху реактивните мощности. Такъв подход е в значителна степен по прецизен, адекватен и тъждествен и създава предпоставки за реализиране на оптимална и ефективна КРТ.

3. Представени са обектно ориентирани, практично-приложни постановки за анализ и приложение на КРТ. Анализирани са приложението на надлъжната КРТ, особеностите на енергетичните процеси при дъгови пейци, прокатни станове, заваръчни агрегати, промишлени електронни преобразуватели и потребители, внасящи съществени смущения в ЕСС. Разработени са методически указания за изчисляване и синтезиране на схемотехнически постановки при прилагане на филтрокомпенсиращи устройства от пасивен и активен тип. Представените постановки имат за цел да характеризират и изяснят прилагане на по-сложни и неспецифични подходи за КРТ при съществуващото голямо разнообразие от потребители в ЕСС.

ТРЕТА ГЛАВА

ИЗСЛЕДВАНЕ КОМПЕНСАЦИЯТА НА РЕАКТИВНИТЕ ТОВАРИ ПРИ НЕЛИНЕЙНО И НЕСИМЕТРИЧНО НАТОВАРВАНЕ В РЕАЛНИ ОБЕКТИ

3.1 Методология при изследване компенсацията на реактивните товари по критерий „Електроенергийна ефективност“

Най-ефективен способ за постигане на електроенергийна ефективност в ЕСС е чрез намаляване на загубите на мощност и електроенергия.

Загубите на активна мощност, могат да се определят чрез следната методика. По принцип е известно, че общите загуби на активна мощност ΔP , са свързани с $\cos\varphi$ чрез съотношението:

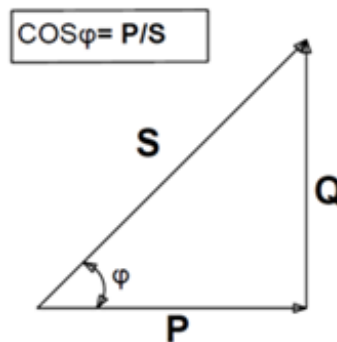
$$\Delta P = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \quad (3.1)$$

А. При напълно симетричен и синусоиден режим в ЕСС.

В този случай, който не е характерен за използваната ЕСС, могат да се запишат следните изрази:

$$\Delta P_a = \frac{P^2}{U^2} \cdot R \quad ; \quad \Delta P_p = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R = \frac{P^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{U^2} \cdot R \quad (3.2)$$

където: ΔP_a – загубите на активна мощност само от активен товар P [kW]; ΔP_p – загубите на активна мощност, предизвикани от P и от реактивния товар $Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi$ (Фигура. 3.1)



Фиг.3.1.

Наличието на реактивна мощност води до допълнителни активни загуби, които могат да се определят чрез коефициента на допълнителните загуби K_d , определени чрез израза:

$$K_d = \frac{\Delta P_p + \Delta P_a}{\Delta P_p} \cdot 100 = \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot 100 [\%] \quad (3.3)$$

Ако например средно дневния $\cos\varphi = 0,87$ т.е. $\operatorname{tg}\varphi_{\text{cp}} = 0,57$, то реактивната мощност Q увеличава с $K_d = 0,572 \cdot 100 \% = 32,5 \%$ загубите на активна мощност общо за системата.

Б. При несиметричен и нелинеен режим в ЕСС.

Такъв режим на експлоатация беше анализиран във втора глава – изрази (2.29 ÷ 2.39). Методиката за изчисляване е следната. Фактора на мощността PF се определя от изразите [76,69]:

$$PF = \frac{P}{S_{ND}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2 + (3n+1)S_0}} = \cos \sqrt{\frac{1 - K_I^2}{1 + \varepsilon_U^2 + (3n+1) \cdot \alpha_U^2}} \quad (3.4)$$

3.2 Характеристика на обекта, особености на изследователския процес и резултат от изследването.

Изследваният промишлен обект произвежда стартерни акумулаторни батерии (АБ). Предприятието се характеризира с непрекъсваемост на производствения процес, а работния цикъл е три сменен. От гледна точка на надеждност на електроснабдяването, обекта се класифицира към II категория, като прекъсване на електроснабдяването е свързано със значително намаляване на производството, престой на много хора, механизми и машини. Електротехническата схема на завода, така е изградена, че при отпадане на основното захранване, превключването към резервен източник се осъществява ръчно.

От районна подстанция (п/ст) „Добрич“ 110/24 kV (2 бр. СТ 2x25 MVA), чрез кабел САХЕКТ 3x1x185 мм² с дължина около 1,2 км се осъществява подаването на ел. енергия към ново изградено ГРУ 20 kV, разположено в съществуващото трансформаторно помещение.

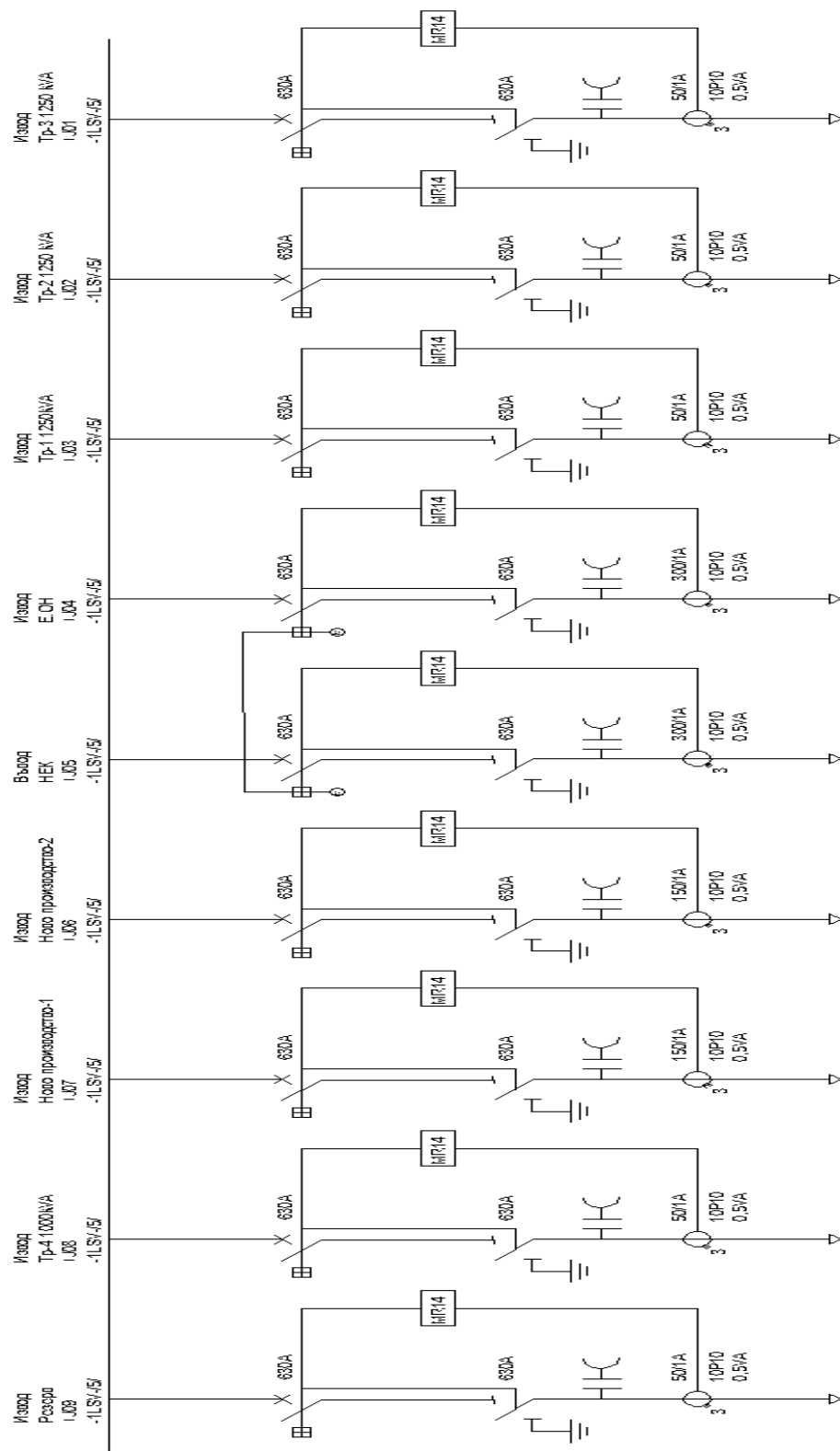
ГРУ е комплектна разпределителна уредба, елегазово изпълнение (SF6) на ф. АBB, серия GAE 630, 24 kV и се състои от 9 секции (фиг.3.3).

Токоизправителните станции, които са най-мощните потребители в завода, се захранват от три броя сухи силови трансформатори (СТ) по 1250 kVA ТП1, разположени в килии съседни на помещението на ГРУ. Друга група токоизправители се захранва от СТ 1600 kVA, разположени в периферията на завода.

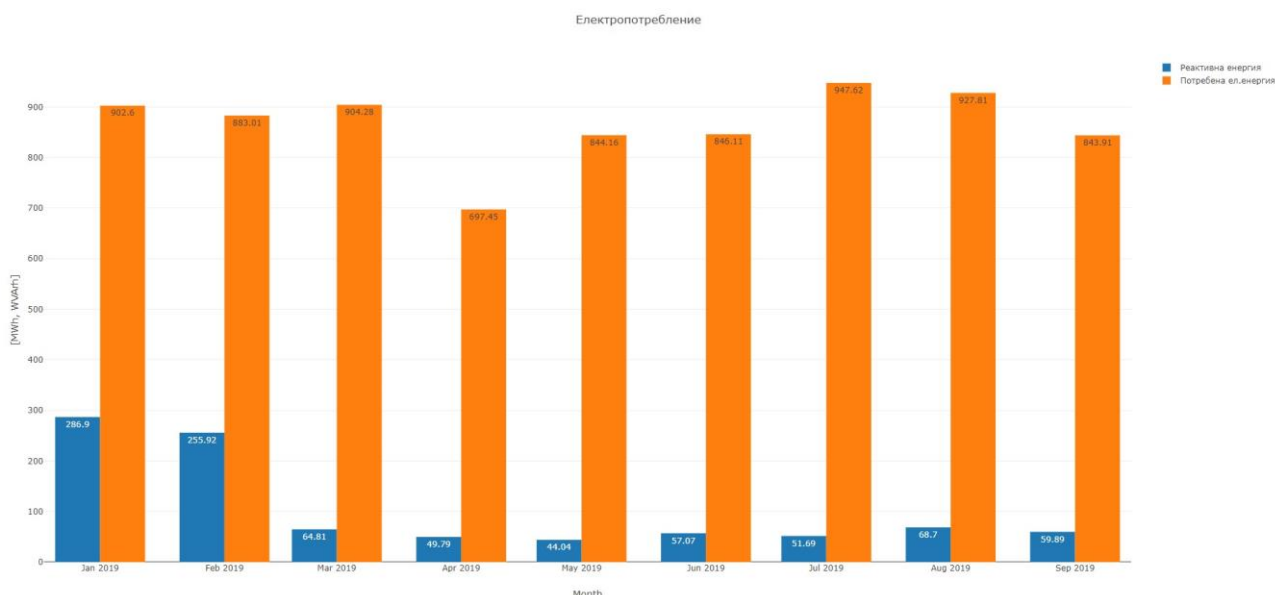
В електроснабдителната система на фирмата има много електрически табла, от които се захранват най-различни съоръжения, като автоматите WIRTZ, CON-CAST, пастир-машините MAC-15; WIRTZ-13-200; MOOJIN-30MV15; COS-автомати тип BATEK, MOOJIN и TBS; машини тип „DAGA“, инсталации за въздух под налягане, за природен газ, за омекотена вода, аспирационни уредби и др. Общата консумирана ел. енергия W [MWh] за деветмесечието на 2019 г. възлиза на 7796,955 MWh, като динамиката на електропотреблението е показан на фиг.3.4.

ABP (1:2)

спотримоси и
спотримоси, ботримоси
на дотримоси на дотримоси



Фиг.3.3 Еднолинейна схема на ГРТ на фирмата



Фиг.3.4 Динамика на електропотреблението

Измерванията се извършени със специализирана преносна измервателна система ISKRA Portable Network Analyzer PNA 760. Чрез присъединяване на специализиран прибор в съответни контролни точки, представляващи удобни места за включване на токови датчици (нормиращи преобразуватели) към шините системи НН на двата изследвани обекта. Токовите датчици са отваряеми и след отварянето им, обхващат съответната шина, като по този начин преобразуват сигнала, които се подава към измервателния прибор в сканиран вид. Определят се следните енергетични характеристики:

- При определена дискретизация зададена от прибора, в динамичен вид се определят ефективните, средните и максимални стойности на фазните токове и напрежение $I_a, I_b, I_c, U_a, U_b, U_c$.
- Чрез разработен специализиран софтуер, с използването на данните от прибора, се определят активната, реактивната и пълната мощности - $P [kW], Q [kVAr], S [kVA]$, а също така допълнителните субстанции на мощността – пулсираща мощност N , свързана с несиметричните режими; „скрита“ мощност S_0 , свързана с неуравновесеността на системата и деформационната мощност D , предизвикана от нелинейността на системата.
- Определят се характеристиките, свързани с качеството на електрическа енергия – отклонение и колебание на напрежението δU и ∇U ; несиметрия на тока и напрежението, оценени чрез коефициентите на несиметрия ε_I и ε_U ; неуравновесеност на тока и напрежението, оценени с помощта на коефициентите α_I и α_U ; несинусоидалността на тока и напрежението оценени чрез коефициентите на хармоника и интегралния коефициент на несинусоидалност $K_{vI}, K_{vU}, THD_I, THD_U$.

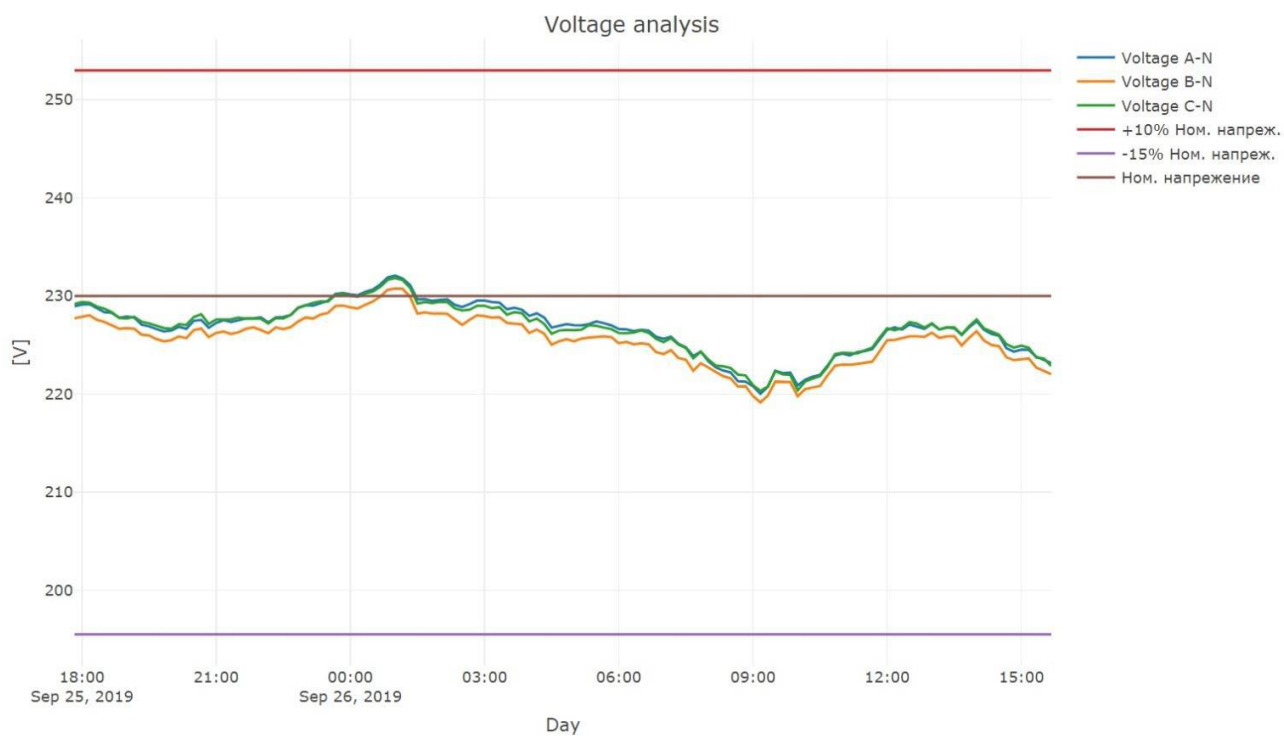
Изхождайки от спецификата и характерните особености на обекта, а също вземането под внимание предварително подготвените мероприятия и създадената

организация за изследване и анализ, могат да се формулират следните цели на изследователския процес:

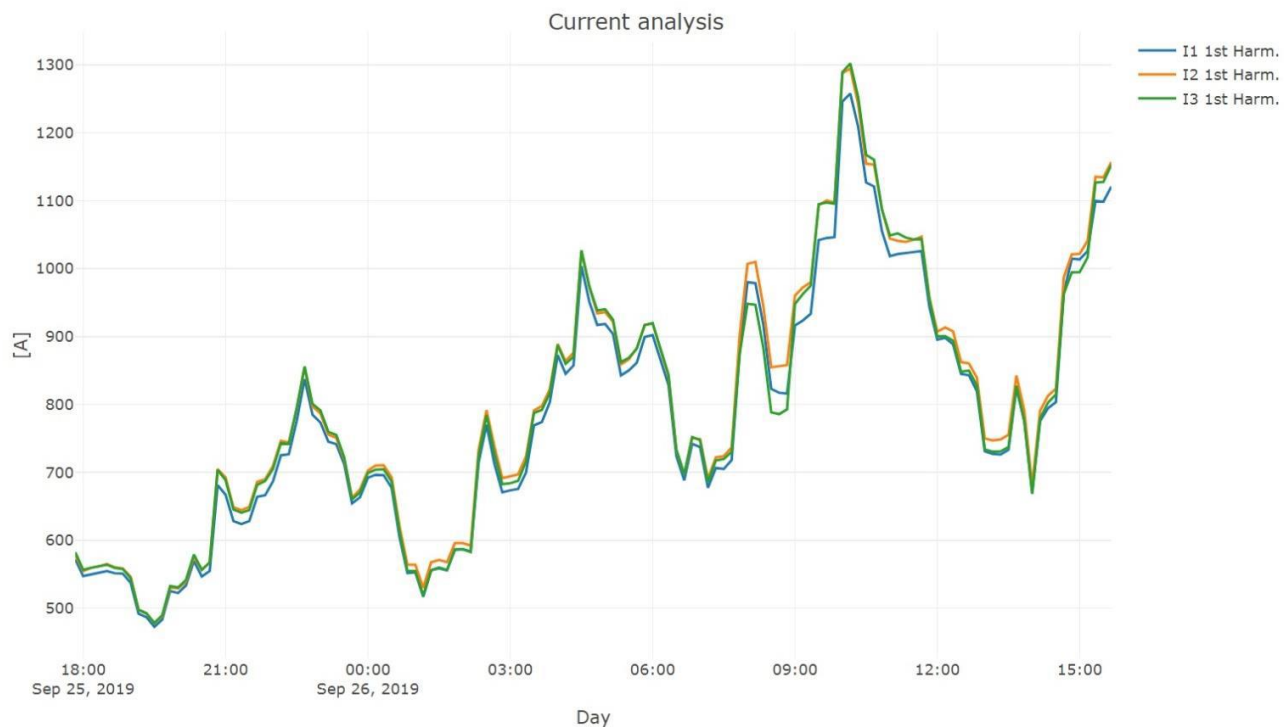
- Да се проведат обективни измервания на електротехническите параметри в маркираните контролни точки с помощта на професионален анализатор PNA 760, термокамера тип HT-02, инфрачервен термометър UT300C, гониофотометър INVENTFINE GPM 1600L, спектрофотометър AsenseTEK Lighting Passport ALP-01 и луксметър Extech HD450, които да послужат за основа на последващи анализи и предложения за рационализиране на ЕСС;
- На базата на предложената методика и целево разработено софтуерно осигуряване, да се определят енергетични характеристики, даващи възможност за оценка на загубите на мощност и ел. енергия и методите за КРТ, респективно електроенергийната ефективност в ЕСС на фирмата;
- Въз основа на резултатите от изследването, да се представят технически решения и подходи за подобряване експлоатацията и рационализиране на електропотреблението, целящо постигане на икономия на ел. енергия;
- Да се оцени ефекта от предложените мероприятия и иновативните постановки, като се определят различни технико-икономически характеристики след внедряване на предложенията, като напр. подобряване на надеждността, ефект от иновацията в паричен еквивалент, сроковете на откупуване на съоръженията, екологичния ефект и др.



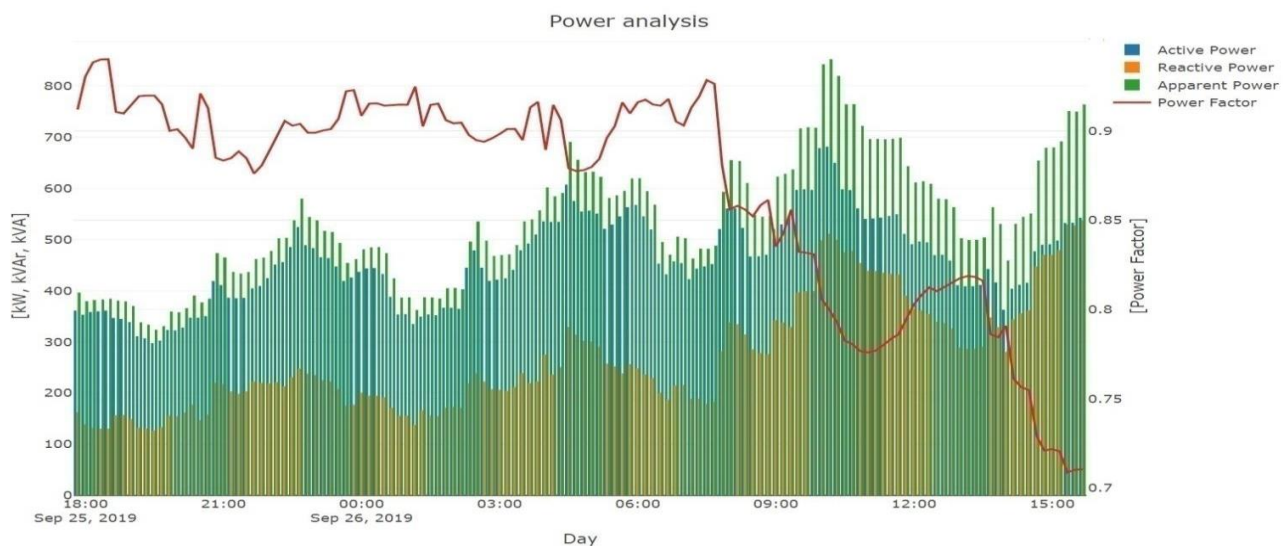
Фиг.3.5 Снимки на измервателната апаратура по време на измерване



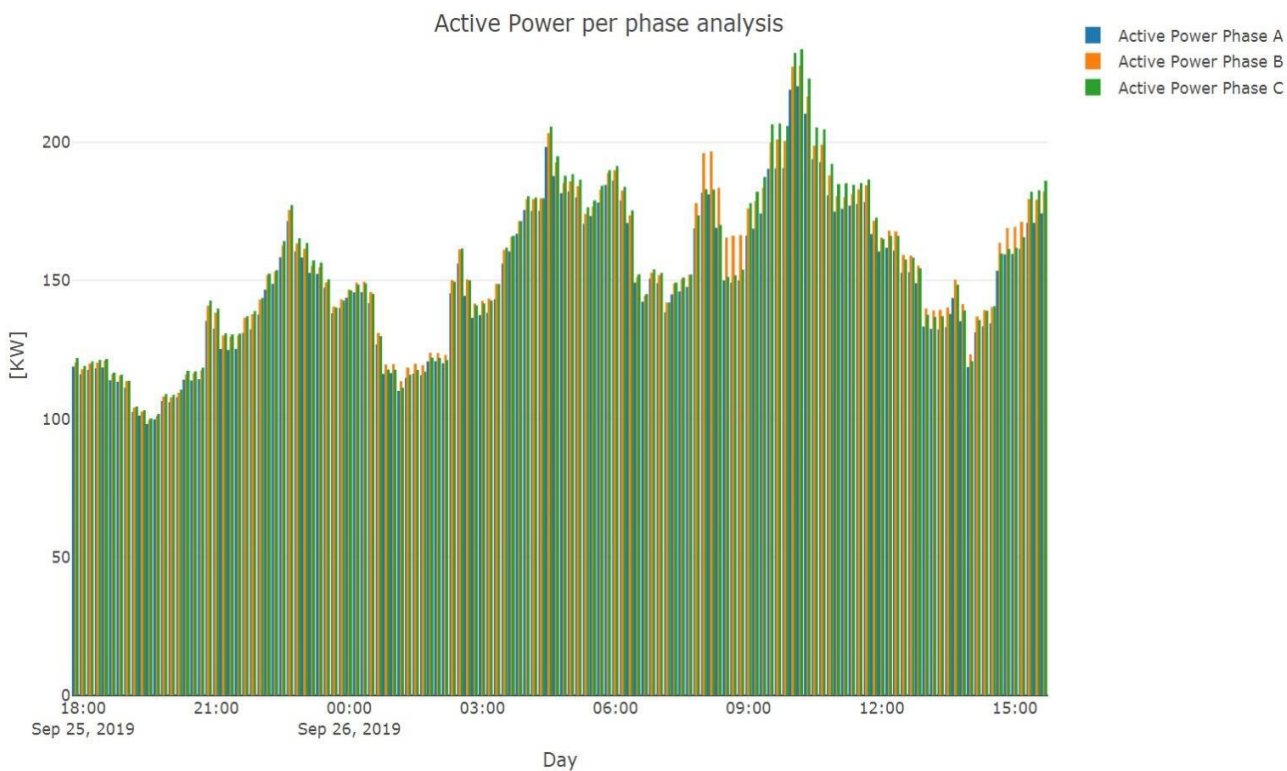
Фиг.3.6. Изменение на напрежението и съответствие с границите със стандарт БДС EN50160.



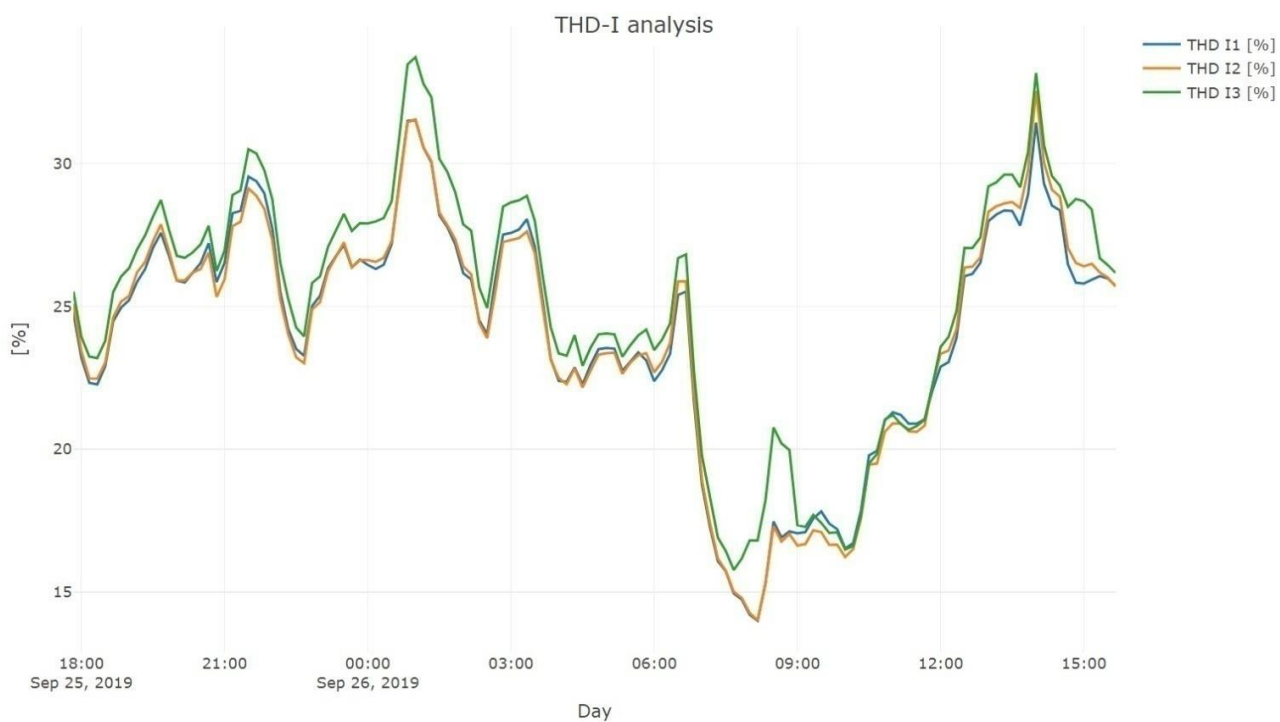
Фиг.3.7. Изменение на токовете по фази.



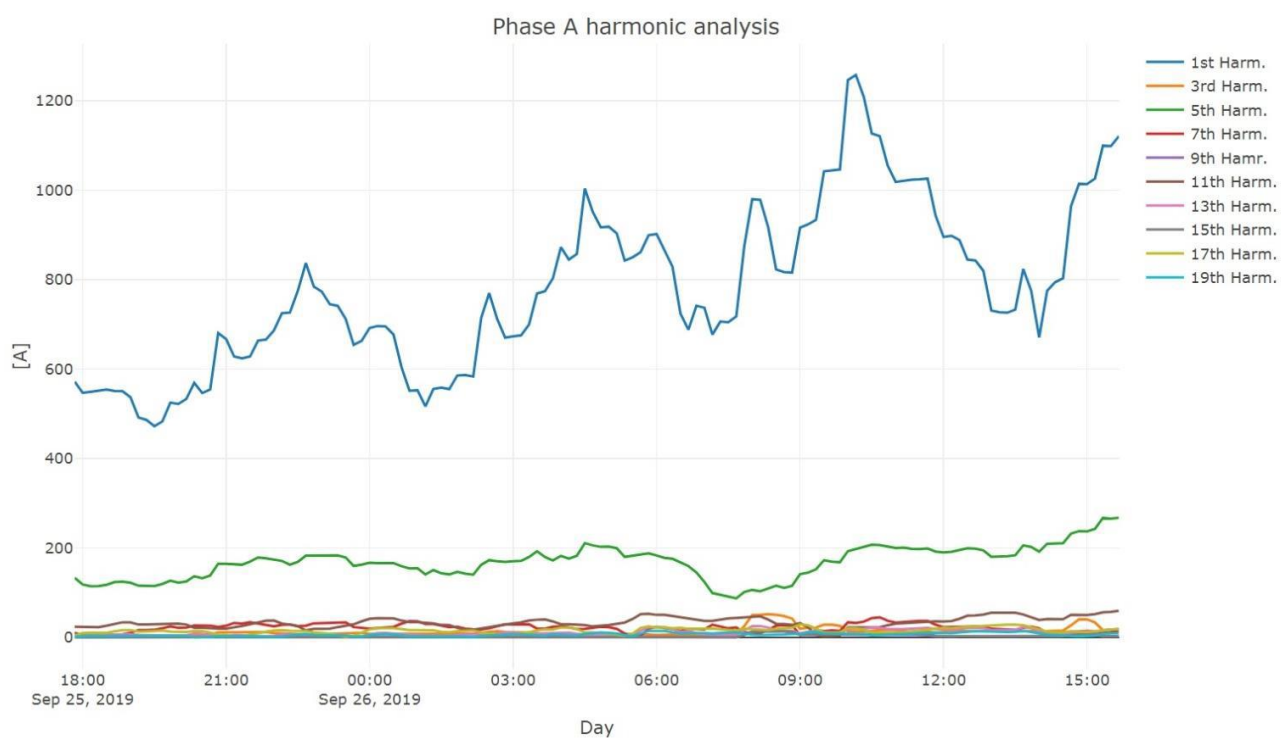
Фиг.3.8. Изменение на активна, реактивна, пълна мощност и фактор на мощността.



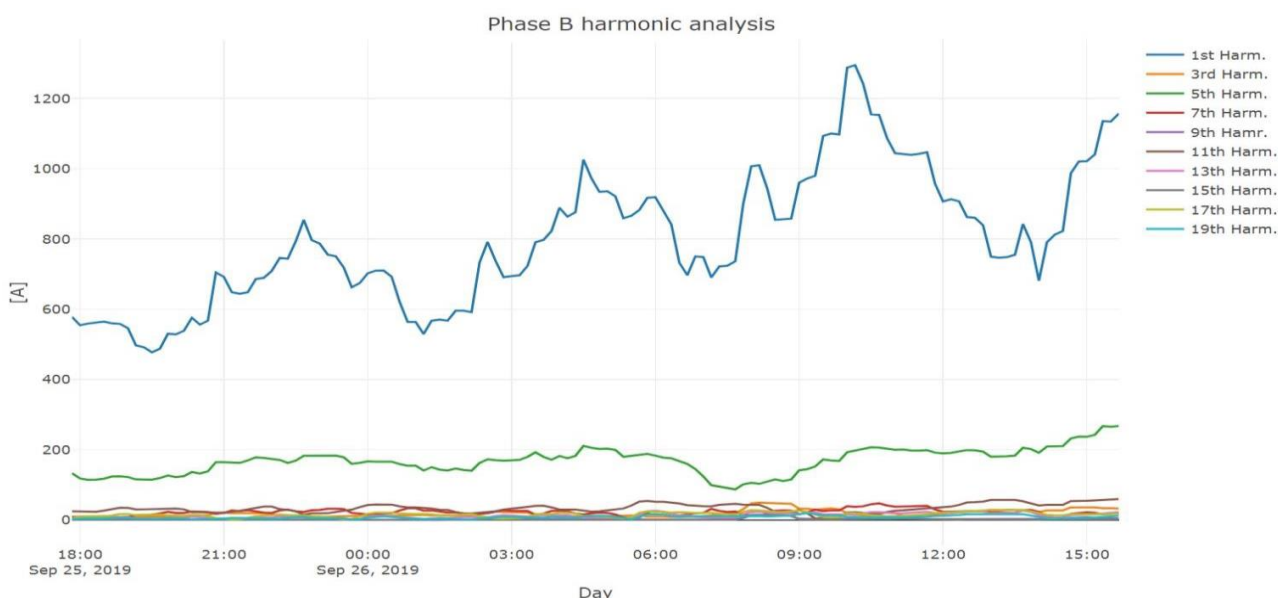
Фиг.3.9. Изменение на активната мощност по фази.



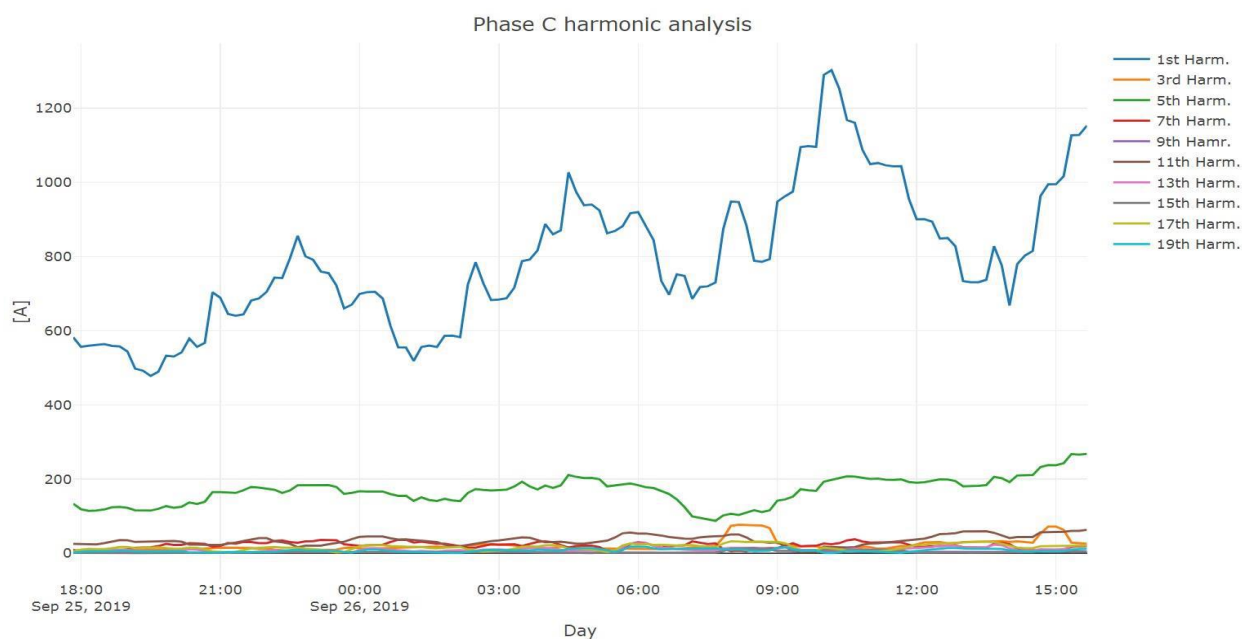
Фиг.3.10. Изменение на коефициента на хармонични изкривявания на тока THD



Фиг.3.11. Изменение на хармоничния състав на тока за фаза А.



Фиг.3.12. Изменение на хармоничния състав на тока за фаза В.



Фиг.3.12. Изменение на хармоничния състав на тока за фаза С.

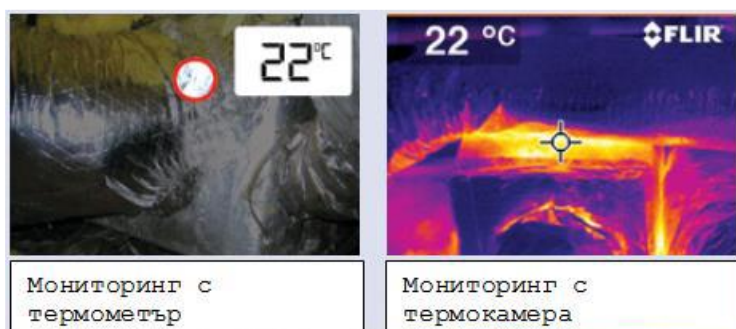
По отношение на ГРТ на ТП 1600 kVA , могат да се направят следните изводи:

- *Налице е ясна изразена динамика в токовото натоварване, като то се изменя от 500 до 1300 A.*
- *При натоварвания от 400 до 600 kVA фактора на мощността е границите (0.87÷0.95) при средна стойност 0.9. При по-големи натоварвания в границите 600 до 1000 kVA, факторът на мощността спада до стойности (0.7÷0.85), което показва недостатъчна инсталирана мощност на компенсиращата система.*

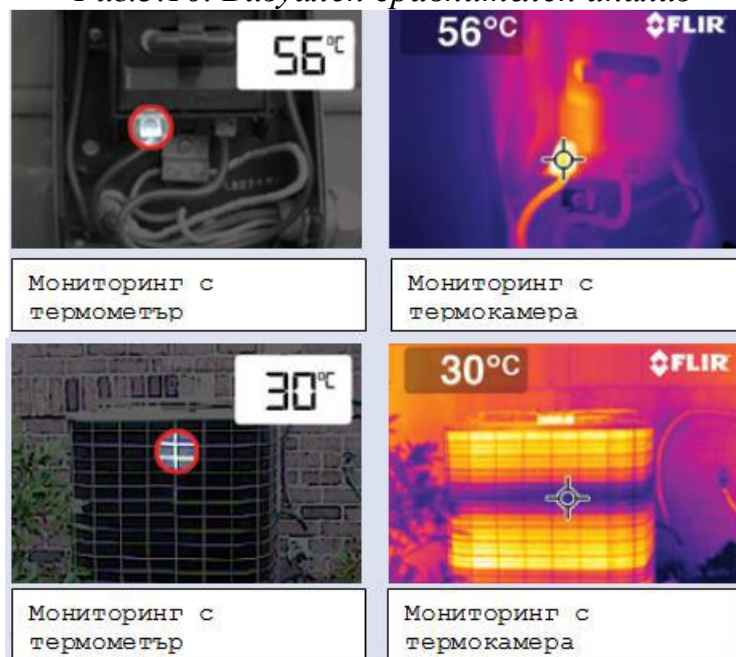
- Нивата на висшите хармоници значително превишават изискванията на стандарта IEC 61000. THDi се изменя в интервала $(12\div 40)\%$, като средната стойност е 30%. Динамиката на изменение на висшите хармоници следва динамиката на товара. Режимът се характеризира с всички неблагоприятни ефекти, предизвиквани от наличие на висши хармоници на тока.

Сравнителен анализ на двата метода

При сравняване на двата метода за диагностика, търсенето на проблеми с термокамера е по-бързо и по-лесно с изключителна точност и ни дава незабавна диагностична представа за пълната степен на проблема. Докато при използването на инфрачервен термометър лесно можем да пропуснем критична точка и проблемна област в даден производствен процес. За достигане ефективността на една термокамера с резолюция на изображението 60x60 пиксела, трябва да използваме 3600 инфрачервени термометъра по едно и също време. Но ако използваме термокамера от висок клас, която има резолюция на изображението от 640x480 пиксела, 307200 пиксела или с помощта на 307200 инфрачервени термометъра ще достигнем стойностите на термокамера.



Фиг.3.16. Визуален сравнителен анализ



Фиг.3.17. Визуален сравнителен анализ

Изследване на ККУ

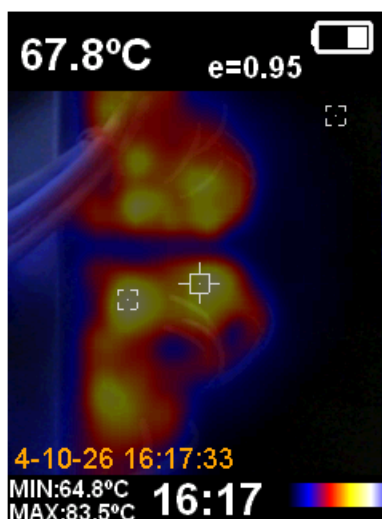
ККУ е инсталирано в помещението на токоизправителите. Разделено е на две секции, като всяка една се защитава от автоматичен прекъсвач CVS630F на ф. Schneider Electric, след което е свързано към захранващия шинопровод на табло РТ 2-1 ББ-3. Проведени са две измервания на температурата с инфрачервен термометър и инфрачервена камера, като по-високите стойности са отчетени с инфрачервения термометър поради факта, че измерванията са проведени в различни периоди и натоварването се е изменило.

На фиг. 3.18 – 3.20 са показани термовизионни екрани от измервания на комутационно-защитни елементи в ККУ. Измерените температури съществено надвишават нормите за този вид защиты. Превишаването на допустимите температури води до отделяне на допълнителна топлина, която всъщност е загуба на активна електроенергия. Допълнително загряване се предизвиква и от неправилния разчет на сечението на присъединяваните проводници – при помалки сечения те стават източник на топлина, какъвто е случая от фиг.3.18, а при по-масивни се отнема топлина от автоматичния прекъсвач и се пренася по дължината на кабела

При увеличаване на тока над номиналния до $I \leq 1,3 I_n$ автоматичния прекъсвач не трябва да изключва, а това причинява значително нагриване на частите на прекъсвача. В такъв режим работят болшинството от комутационно-защитните апарати в ККУ, като причината за повишения ток е генерирането на висши хармоници.



Фиг.3.18



Фиг.3.19



Фиг.3.20

Проведените изследвания върху автоматични прекъсвачи CVS630F (фиг.3.21). Отчетени са прекомерно високи температури на контактните съединения (фиг.3.22 – фиг.3.23), както и висока температура на самите защиты

апарати. Забелязан е също така и нагар по основата на кабелните обувки, където е връзката с кабела.

Комутационната възможност на прекъсвача може да достигне до 150 kA и износоустойчивост до 3000 комутационно цикъла. Прекъсвача защитава срещу претоварване и има термична памет, която може да се използва за анализ на термичните режими.



Фиг.3.21



Фиг.3.22



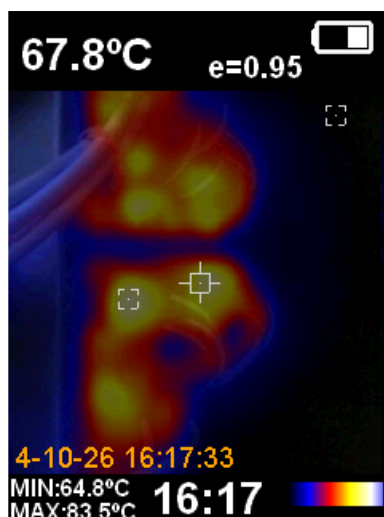
Фиг.3.23

На фиг.3.24 е представен следващия елемент от ККУ, който е изследван, а именно самите кондензаторни батерии и хранящите им кабели. От фиг.3.24 ясно се вижда термолепенката, която индикира номиналната(максимално допустимата) температура на батерията(температурен диапазон -40 +60°C). Проведеното измерване с термокамера (фиг.3.25) и инфрачервен термометър показва, че тя не отговаря на действителната температура, която значително я надвишава (около 84 °C). Също така температурата на хранящите кабели е прекалено висока за такова съоръжение - над 50°C (фиг.3.26). Вероятната причина за това, потвърдено и от предшестващи изследвания е високо ниво на висши хармоници на тока в системата и лошото охлаждане.

Изследваните в ККУ кондензаторни батерии са от пропиленов тип. По принцип се счита, че тези батерии работят „студени“ т.е. със средно денонощни температури по малки от 20[°C] с много по-малки диелектрични загуби в сравнение със маслените (по-малки от 0,003kW/kVAr). Освен това такъв тип батерии са с понижена чувствителност към висши хармоници на тока, т.е. активните загуби от висши хармоници, които се отлагат в тях трябва да са незначителни. На практика, в конкретния случай, това не е така, нещо повече, констатирано, е че част от батериите са дефектни.



Фиг.3.24



Фиг.3.25



Фиг.3.26

Изследване на коефициента на дефектност

В табл.3.2 и табл.3.3 са представени резултатите от извършените изчисления за коефициентите на дефектност на изходящ кабел на ККУ, входящ кабел на табло Компресор, главен прекъсвач на Charging system 2C-RC-220V/150A, захранващ трансформатор на CR800/360V. Всички изчислени стойности за КД се намират в диапазона:

$$1,2 \leq K_d \leq 1,5$$

Такова състояние на изследваните съоръжения е характерно за настъпване на процес с повишена вероятност за дефектиране и е необходимо да се вземат адекватни мерки за подобряване на състоянието им преди да е настъпила аварийната ситуация.

Табл.4 стойности на Кд за изходящ кабел на ККУ и входящ кабел на табло Компресор

	Изходящ кабел на ККУ (термометър)			Входящ кабел на табло Компресор		
Фази	A	B	C	A	B	C
$\Delta T_{kc}[^{\circ}C]$	11,3	11,9	12,4	16,5	17,4	18,9
$\Delta T_{np}[^{\circ}C]$	9,65	9,22	9,46	12,5	12,7	13,3
Кд	1,17	1,29	1,31	1,32	1,38	1,42

Табл.5 стойности на Кд за главен прекъсвач на Charging system 2C-RC-220V/150A и захранващ трансформатор на CR800/360V

	Главен прекъсвач на Charging system 2C-RC-220V/150A			Захранващ трансформатор на CR800/360V		
Фази	A	B	C	A	B	C
$\Delta T_{kc}[^{\circ}C]$	18,3	18,9	18,1	15,7	16,1	15,9
$\Delta T_{np}[^{\circ}C]$	12,8	12,8	12,8	12,8	12,6	12,7
Кд	1,43	1,47	1,41	1,23	1,28	1,25

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ТРЕТА ГЛАВА

1. В съвременните промишлени обекти болинството от потребителите имат нелинейни и несиметричен характер, влошават съществено показателите на качеството на ЕЕ и изискват специално отношение към процесите на КРТ. В тази връзка, на базата на съществуващи разработки е предложена методология на изследователския процес при КРТ по критерии „Електроенергийна ефективност“. Постановката утвърждава и анализира не само класическите активни и реактивни мощности, но и възникването, поведението и последствията от допълнителни субстанции на мощността - пулсиращата, скритата и деформационната мощност. За тяхното изучаване е необходимо да се създават адекватни и изчислителни процедури, а в изследователския процес да се използват многофункционални технически средства, притежаващи висока точност и прецизност. Методиката има ясно изразен практично-приложен характер и универсално приложение за обекти от различни отрасли и с различни енергетични характеристики.
2. Извършена е апробация на представената методология в голям промишлен обект, наситен с нелинейни и не балансирани в електрическо отношение потребители. С помощта на специализиран мрежови анализатор в продължение на 35 дни са измерени и анализирани различни енергетични показатели и характеристики при два режима на работа - при понижена и при нормално натоварване. Констатирана е силно проявена несиметрия и несинусиодалност на електрическите величини, като тези показатели са по-силно изразени при режима с понижено натоварване. Анализът дава основание да се приеме, че съществува еквивалентност за прилагане на технически средства за КРТ при двата режима на работа, т.е. тя е необходима и при работа на съоръженията в режим на минимално натоварване.
3. Определени са в диференциран вид парциалните загуби на активна мощност от пулсираща, скрита и деформационна мощност. Сумата на всички загуби от вложени ПКЕЕ е съизмерима с активните конвенционални загуби на мощност, което е една негативна констатация. Факторът на мощността има ниски стойности и се изменя в границите $PF=(0,713\div 0,751)$. Това показва, че е на личната система за КРТ работи крайно неефективно и е наложително изцяло да се промени концепцията за КРТ и се прилагат принципно нови адекватни подходи, съобразени с принципите на предложената методика.
4. За потвърждение на негативни констатации на изследователския процес са проведени диагностични изпитания чрез прилагане на инфрачервена термография с две технически средства - инфрачервени термометри и с

инфрочервена термокамера. Изследвани са различни елементи на компенсиращите системи и се установени дефектирани КБ и повишена вероятност за дефектиране на останалите елементи от ККУ - коефициентът на дефектност се изменя в границите $1,2 \leq K_d \leq 1,5$. В тази връзка са предложени мероприятия за рационализиране КРТ чрез прилагане на антирезонансни защити, управление на системата за компенсиране чрез регулатор на реактивната мощност, работещ по критерии „посока и големина на реактивна мощност“, внедряване на последователни активни филтри и имплантиране на SCADA и други високо технологични средства за монитори, контрол и управление. Това ще доведе до икономия на ел. енергия в рамките на $(3 \div 4)\%$ от общата консумация при срок на откупуване на съоръженията $(3 \div 5)$ години.

5. За изследвания обектите е направена оценка на трифазните, претеглени по отношение на мощността показатели, разработени т. 2.3, във връзка с КРТ. Направен е сравнителен анализ на тези показатели с конвенционалните и е установено, че те имат по-малки стойности от традиционните стандартизирани показатели. Следователно, товара редуцира тези показатели и процеса на КРТ трябва да се съобразява с този факт. В тази връзка, отчитайки силно изразения несиметричен и несинусиодален режим на електропотребление в изследвания обект, е предложено определянето на необходимата компенсираща мощност Q_k да се извършва с помощта на фактора на мощността PF , а не чрез $\cos\phi$. Определянето на PF може да стане както на база на методическите указания, разработени в т. 3.1, така и с помощта на претеглените по отношение на мощността показатели. В тази връзка е представена формулировка за прецизно изчисляване на претоварването на филтрокомпенсиращите системи.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА КРТ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА СД И КБ

1.1. Описание на технологичния процес с технологична схема на изследвания обект

Обект на изследване е голямо промишлено предприятие. Дейността му е свързана с производство и продажба на лека и тежка калцинирана сода. Освен тези продукти се произвеждат и продават сода бикарбонат, очистен разсол и вар. Основните суровини за производството са варовик, разсол, пара и електроенергия, които фирмата доставя чрез дъщерните си дружества.

Производството на калцинирана сода в “Солвей-Соди” АД е разделено на отделни етапи по цехове показани на фиг. 4.1:

Варово производство - състои се от три цеха: **“Въжена линия”**, **“Пещен”** и **“Гасилен”**.

Цех **“Въжена линия”** отстои от завода на 7,2 км. Има производителност - 1,6 млн. тона варовик за година, или 270 тона на час. Към “Въжена линия” спадат малката въжена линия, над бункерите за варовик на варовите пещи; складовото стопанство; дробилно-сортировъчното отделение за кокс; системата от транспортни ленти за кокс и варовик от складовете до бункерите на варовите пещи.

Цех **“Пещен”** е вторият в технологичния порядък на варовото производство. Основното съоръжение на цеха са варовите пещи. Те са най-големите и тежки съоръжения в целия завод. Всяка пещ е с производителност от 300 тона вар на ден. Цех **“Гасилен”** не е голям, в него се получава варното мляко, което представлява водна суспензия на калциев хидроокис.

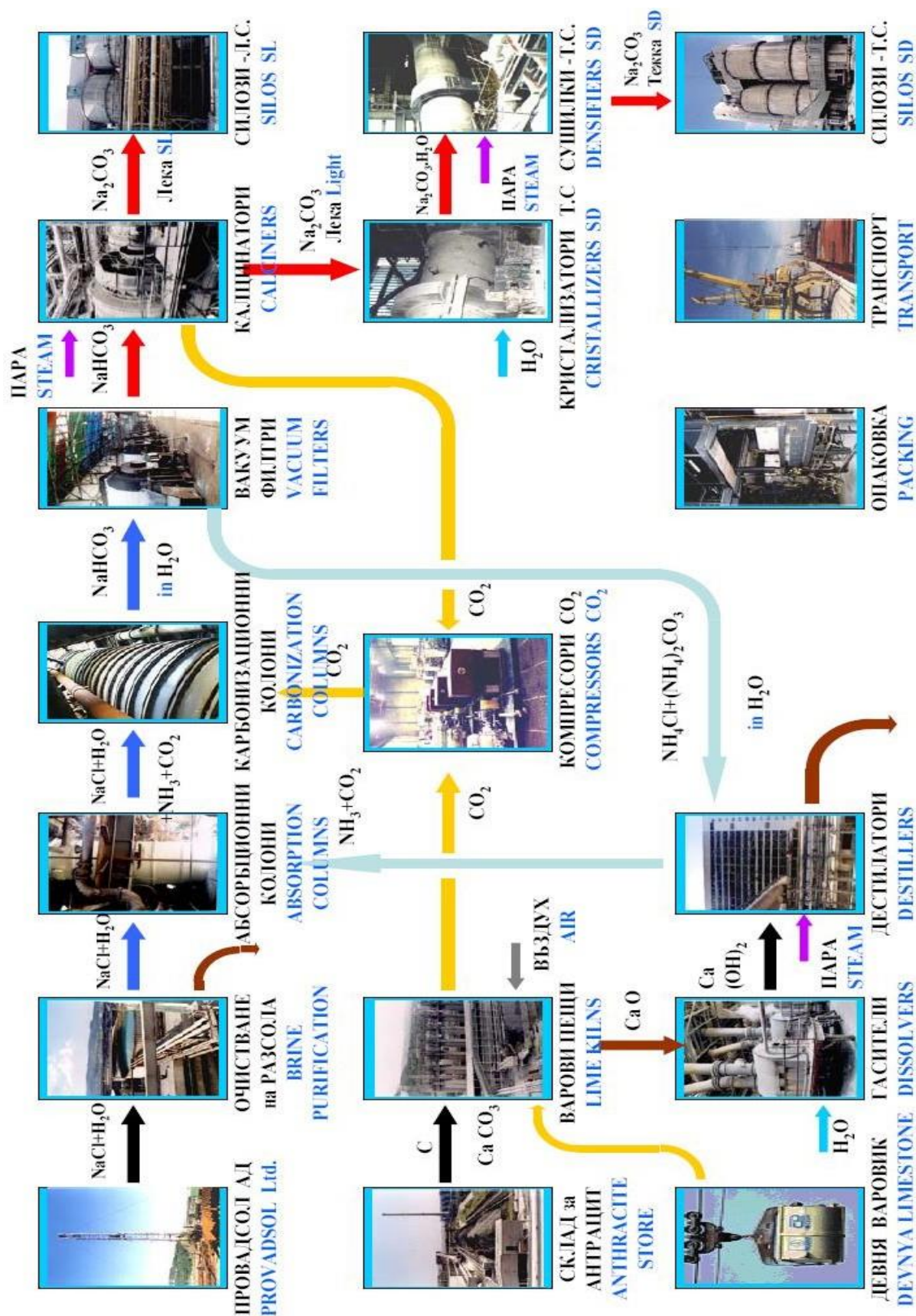
“Абсорбция и дестилация” – най-големият и с най-сложна технология цех. Има три самостоятелни линии, всяка от които е с производителност по 400 хил. тона сода на година. Всяка технологична линия разполага с три дестилационни и три абсорбционни елемента. Към този цех спадат и трите помпени станции – шламопомпено отделение, сборници за амонизиран разсол и филтърна течност и амонячна станция за амонячна вода и сулфид.

“Карбонизация и филтрация” – в този цех се осъществява основния стадий на карбонизационния процес. Образуват се кристали от натриев бикарбонат и последващото им отделяне от матерна луга. В технологично отношение е оформен също от три технологични линии. Всяка от тях включва по две серии карбонизационни колони и пет броя вакуумфилтри.

“Калцинация, тежка сода и охлаждане”:

“Калцинация” означава топлинно разлагане на натриевия бикарбонат.

Това е заключителния етап от производството на калцинирана сода. В цеха са монтирани 7 калцинатора с хидромоторно задвижване.



Фиг. 4.1 Технологична схема на обекта

В цех **“Тежка сода”**, леката сода получена в “Калцинация” се овлажнява с вода и се получава така наречения монохидрат. След изсушаване чрез загряване, при което кристалната структура на содата се запазва, се получава тежка сода. Насипното ѝ тегло е от 0,9 тона на куб. метър. Изградени са три технологични линии, всяка от които с капацитет 400 хил. тона годишно. Тежка сода се складира в два силоза по 6 хил. тона и един за 18 хил. тона.

В цех **“Охлаждане”** содата достига с температура 150-170 °С. Но за да бъде опакована в торби, температурата трябва да се понижи на 40-60 °С. Това става чрез въртящи се охладителни барабани с производителност 50 тона на час. Охладената сода се складира в шест силоза с вместимост 6 хил. тона всеки.

“Опаковка и експедиция” от този цех калцинираната сода се експедира по няколко начина:

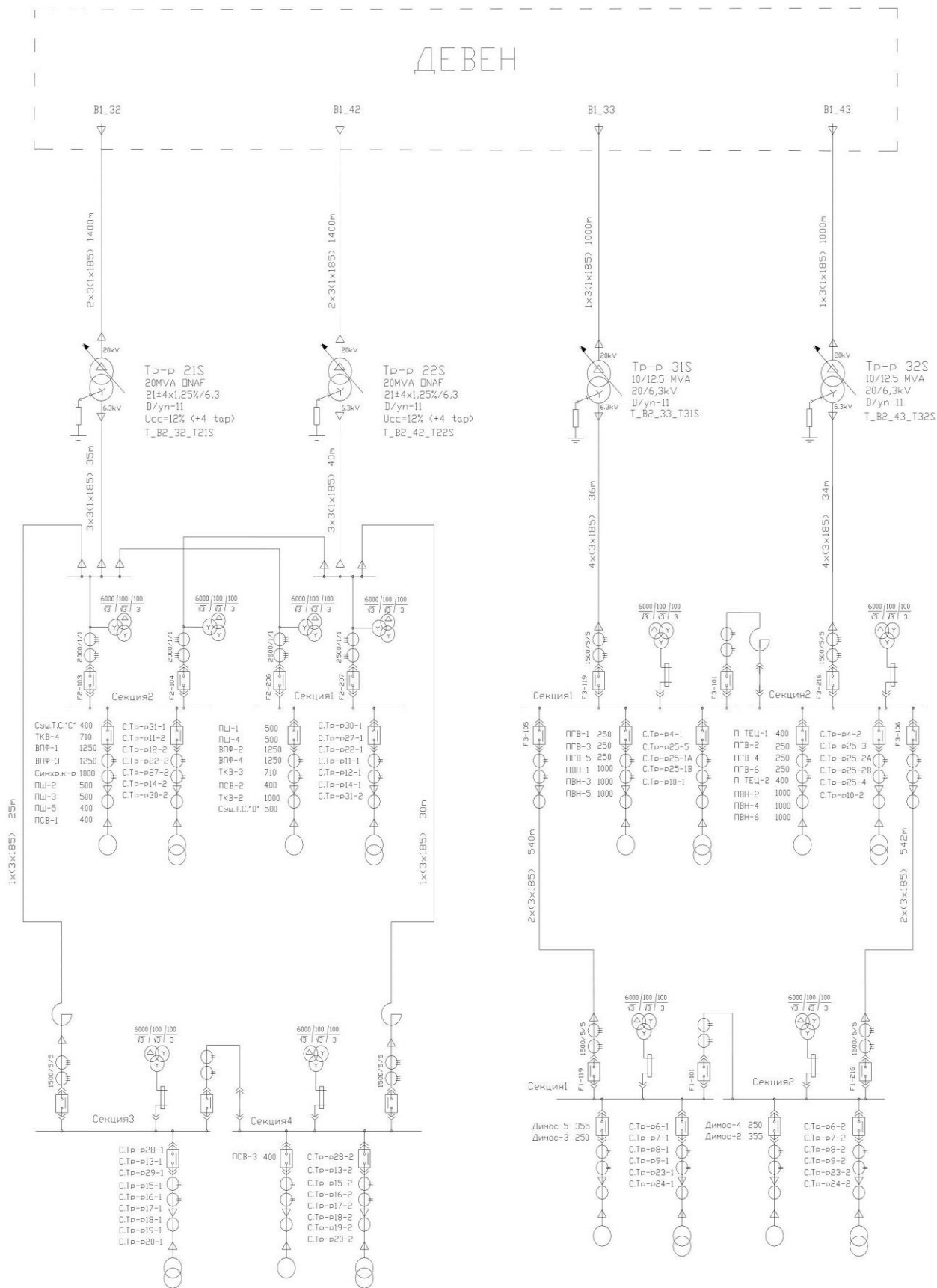
- *в свободни торби;*
- *свободни торби върху палети обвити с термосвиваемо фолио;*
- *свободни торби в самоносещи пакети с термосвиваемо фолио;*
- *насипно в пластмасови контейнери /меки контейнери/;*
- *насипно в автомобилни и жп цистерни;*
- *насипно в 20 футови метални контейнери /ГТК/;*
- *насипно за кораби чрез регионална транспортна система /РТ/;*

1.2. Анализ на ЕСС на обекта

Основното електрозахранване на обекта се осъществява от ТЕЦ „Девен“. Към настоящия момент в ТЕЦ „Девен“ е въведена диспечерска система “SCADA POWER CC” на фирма “Siemens”. Посредством системата се управлява и контролира работата на цялата електроснабдителна система на територията на ТЕЦ „Девен“ и обекта, в това число генератори, силови трансформатори и оперативните превключвания.

В ТЕЦ се поддържа ниво на напрежението в рамките на 21,78÷22 kV с честота 50 Hz. Фактора на мощността cosφ се поддържа в рамките на 0,85÷0,90 автоматично или ръчно. На този етап възбуждането на синхронните генератори се извършва ръчно, тъй като автоматичните регулатори за възбуждане са бавно действащи.

Електроенергийната система е реализирана с две ГПП 21/6,3 kV (№2 и №3), една ГПП (№1) и двадесет и пет ЦП. Връзката на ГПП №2, №3 и ГПП №1 със системата “SCADA POWER CC” е осъществена с монтирани във всяка подстанция входно-изходни модули тип 6MD6130 на фирма “Siemens”. Те следят управлението и осъществяват включването и изключването на всички трансформаторни изводи. Управлението на двигателните изводи се осъществява от залите по цехове. Еднолинейна схема на промишленото предприятие е показана на фиг. 4.2.



Фиг. 4.2. Еднолинейна схема на обекта

Силовите трансформатори на ГПП №2 и №3 са захранени с напрежение 20 кV от трета и четвърта секции на ГПП-ТЕЦ “Девен” посредством клетки с елегазови прекъсвачи 1250 А производство на фирма “AREVA”. За защита и управление на трафоизводите са монтирани многофункционални устройства тип SIPROTEC 7SJ635 и 7SJ62 на фирма “Siemens”, които се използват като:

- посочни максимално токови защиты;
- посочни защиты от к.с. към земя, защиты от претоварване;
- максимално токови защиты за токове с обратна последователност;
- защиты от понижено и повишено напрежение;
- защиты от претоварване;
- устройство за резервиране отказа на прекъсвачите /УРОП/;
- контролират пределните стойности на I , U , P , Q , f , $\cos\varphi$ и др;

Връзката на ТЕЦ “Девен” с ГПП №2 и №3 е изпълнена посредством медни кабели 12/20 кV тип N2XSY, 1x185 mm². Захранващите кабели към ГПП №3 са по един брой на фаза, а към ГПП №2 са по два броя в паралел за всяка фаза положени в кабелен тунел.

4.2.1 Главна понижаваща подстанция №2.

ГПП №2 се състои от два двунамотъчни трансформатора (TR21S и TR22S) тип TMRU 20 000/21 с регулиране на напрежението под товар.

За намаляване на площта и обема на подстанцията, тя е изпълнена на базата на КРУ съставено от четири броя секции. За управление и контрол на въводните и секционните килии са монтирани многофункционални защиты тип “SIPROTEC” 7SJ64.

Технически параметри на силовите трансформатори са:

- | | |
|--|--|
| • Схема и група на свързване | <i>Dyn-11</i> |
| • Режим на охлаждане | <i>ONAN/ONAF</i> |
| • Номинална пълна мощност | <i>ONAN 16 000 kVA</i>
<i>ONAF 20 000 kVA</i> |
| • Номинална честота | <i>50 Hz</i> |
| • Напрежение на късо съединение u_k % | <i>12 %</i> |
| • Ток на празен ход i_o % | <i>0,37 %</i> |
| • Загуби на активна мощност в стоманата на трансформатора при празен ход $\Delta p_{cm} = \Delta p_0$ | <i>14 kW</i> |
| • Загуби на активна мощност в медта на трансформатора при номинален товар $\Delta p_m = \Delta p_{kc}$ | <i>ONAN 75 kW</i>
<i>ONAF 116 kW</i> |

Кабелните връзки на трансформаторите са изпълнени с изваждаеми щепселни съединения тип “CONNEX” на австрийската фирма “PFISTERER”.

За защита от повреди в ГПП са монтирани многофункционални защиты тип SIPROTEC 7UT61 на фирма “Siemens” използвани като: диференциална защита; максимално токова защита на 6кV; земна защита; защита от термично претоварване; а в трансформаторите:

газдетектор на разширителния съд тип FS9063-46 с един брой електрически

контакт; температурен индикатор на маслото с възможност за дистанционен контрол и два броя електрически контакти; индикатор за нивото на маслото в разширителния съд с два броя електрически контакти; индикатор за нивото на маслото в разширителния съд за Янсеновия регулатор с два броя електрически контакти; предпазен клапан за налягане с два броя електрически контакти; газова защита изпълнена с газово реле (Бухолцово) тип BR80MA (две системи); “отсечен клапан” с един брой електрически контакт (сработва при рязък разход на масло в казана и не позволява изтичането му от разширителния съд); защитно реле за Янсеновия регулатор тип URF25/10 с един брой електрически контакт; на фаза X2 е монтиран температурен индикатор с възможност за дистанционен контрол и три броя електрически контакти; на първичните намотки H1, H2 и H3 са монтирани токови трансформатори тип TMB-56 за номинален ток 600/1 А, номинална мощност 15 VA, и клас на точност 5P20; на вторична намотка X1 е монтиран токов трансформатор тип TMB-56 за номинален ток 2000/1 А, номинална мощност 15 VA, и клас на точност 5P5 (за автоматичния регулатор на напрежение); на вторична намотка X2 е монтиран токов трансформатор тип TMB-56 за номинален ток 2000/1 А, номинална мощност 15 VA, и клас на точност 5P5 (за защита в комбинация с температурния индикатор); на вторична намотка X3 е монтиран токов трансформатор тип TMB-56 за номинален ток 1800/1 А, номинална мощност 15 VA, и клас на точност 5P20 (за защита).

Регулирането на напрежението под товар на страна 20 kV се осъществява посредством Янсенев регулатор с моторно задвижване тип RS12Δ400 41,5 10 09 1W, ръчно или автоматично чрез контролер тип TAPCON 260 производство на фирма “MR”-Германия. Контролерите за управление са свързани със системата “SCADA POWER CC”. Регулировъчните степени на Янсеновия регулатор са дадени в табл. 4.1.

Таблица 4.1 Степени на Ясенов регулатор за TR21S и TRS22S

Позиция на регулатора	Страна 20 kV			Страна 6 kV		
	U kV	I A		U kV	I A	
		ONAN	ONAF		ONAN	ONAF
1	22,05	419,0	523,7	6,3	1466,3	832,9
2	21,79	424,0	530,0	6,3	1466,3	832,9
3	21,53	428,2	536,4	6,3	1466,3	832,9
4	21,26	434,5	543,1	6,3	1466,3	832,9
5	21,00	439,9	549,9	6,3	1466,3	832,9
6	20,74	445,5	556,8	6,3	1466,3	832,9
7	20,48	451,2	564,0	6,3	1466,3	832,9
8	20,21	457,0	571,3	6,3	1466,3	832,9
9	19,95	463,0	578,8	6,3	1466,3	832,9

4.2.2 Главна понижаваша подстанция №3.

ГПП №3 се състои от два двунамотъчни трансформатора (TR31S и TR32S) тип ТМРУ 12 500/21 с регулиране на напрежението под товар и два броя секции на базата на КРУ.

Технически параметри:

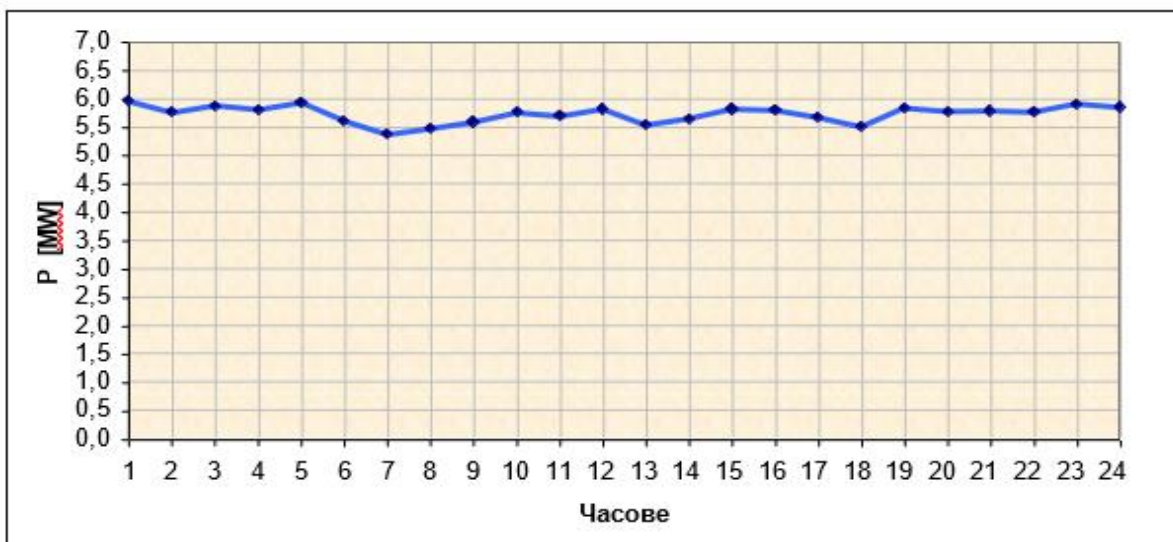
- *Схема и група на свързване* *Dyn-11*
- *Режим на охлаждане* *ONAN/ONAF*
- *Номинална пълна мощност* *ONAN 10 000 kVA*
ONAF 12 500 kVA
- *Номинална честота* *50 Hz*
- *Напрежение на късо съединение u_k %* *7,2 %*
- *Ток на празен ход i_o %* *0,52 %*
- *Загуби на активна мощност в стоманата на трансформатора при празен ход $\Delta p_{ст} = \Delta p_0$* *12 kW*
- *Загуби на активна мощност в медта на трансформатора при номинален товар $\Delta p_{м} = \Delta p_{кв}$* *ONAN 45 kW*
ONAF 69 kW

Регулировъчните степени на Янсеновия регулатор са дадени в табл. 4.2

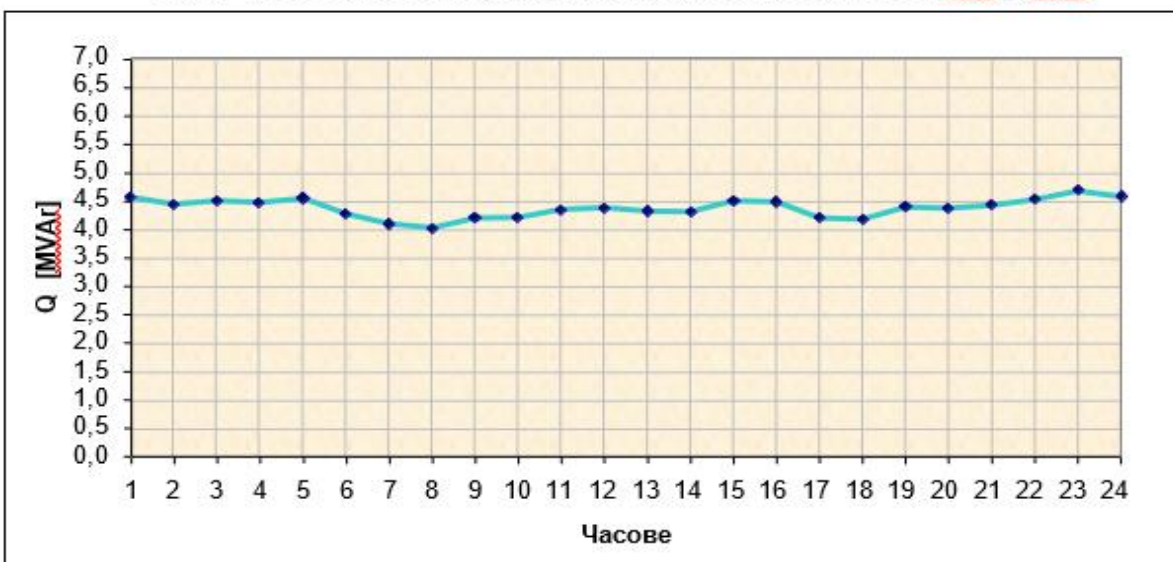
Таблица 4.2 Степени на Ясенов регулатор на TR31S и TR32S

Позиция на регулатора	Страна 20 кV			Страна 6 кV		
	U kV	I A		U kV	I A	
		ONAN	ONAF		ONAN	ONAF
1	22,05	261,8	327,3	6,3	916,4	1145,5
2	21,79	265,0	331,2	6,3	916,4	1145,5
3	21,53	268,2	335,3	6,3	916,4	1145,5
4	21,26	271,5	339,4	6,3	916,4	1145,5
5	21,00	274,9	343,7	6,3	916,4	1145,5
6	20,74	278,4	348,0	6,3	916,4	1145,5
7	20,48	282,0	352,5	6,3	916,4	1145,5
8	20,21	285,6	357,1	6,3	916,4	1145,5
9	19,95	289,4	361,7	6,3	916,4	1145,5

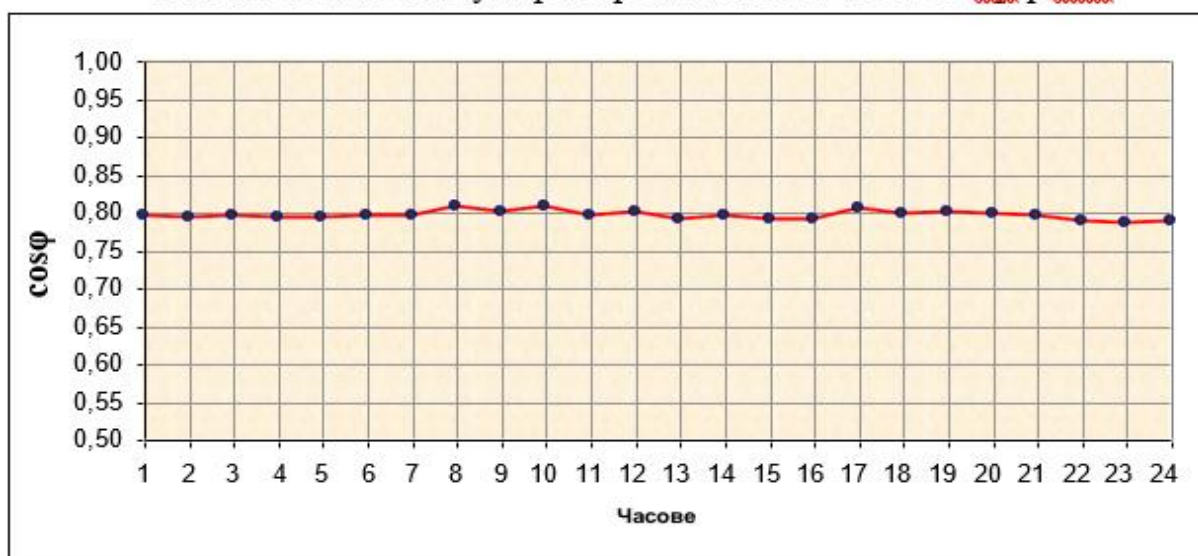
Звездните центрове на вторичните намотки на трансформаторите TR31S и TR32S са заземени през активни съпротивления 40 [Ω]. Трансформаторите имат възможност за паралелна и разделна работа, но в момента работят разделно. За управление и контрол на въводните, изводните /за ГПП №1/ и секционните килии са монтирани многофункционални защиты тип “SIPROTEC” 7SJ64.



Фиг. 4.6 Реално консумирана активна мощност от Tr-p 21S



Фиг. 4.7 Реално консумирана реактивна мощност от Tr-p 21S



Фиг. 4.8 Реален $\cos\phi$ на Tr-p 21S

4.4. Анализ на синхронните двигатели в ЕСС на изследвания обект

4.4.1 Технически данни за СД

На територията на предприятието са монтирани общо 8 бр. синхронни двигатели. Два от тях са монтирани да се използват като компенсатори и са захранени съответно от първа и втора секции на ГПП№2, но към настоящия момент не се използват. Останалите 6 бр. синхронни двигатели са обвързани с технологичния процес и се използват за задвижване на “Помпи за вода високо налягане”. Те са захранени от първа и втора секции на ГРП№3. Броят на работещите помпи се определя в зависимост от технологичните нужди и натоварването на предприятието. По принцип се използват два броя помпи.

Техническите данни за синхронните двигатели и възбудителните им системи са дадени в табл. 4.7 и табл. 4.8

Възбудителите на синхронните двигатели имат възможност за управление на възбудителния ток в автоматичен, ръчен, аварийен и пробен режими. Компенсиращите способности на монтираните синхронни двигатели са дадени в табл. 4.7.

Таблица 4.7 Технически данни за СД

Технолог. позиция	Тип на СД	P_n kW	Q_n kVAr	U_n kV	I_n A	КПД η %	$\cos\phi$	Обороти s^{-1}	q %
Помпа високо налягане №1	СДН 15-39-10	1000	511	6	113	94,6	0,9	600	45,5
Помпа високо налягане №2	СДН 15-39-10	1000	511	6	113	94,6	0,9	600	45,5
Помпа високо налягане №3	СДН 15-39-10	1000	511	6	113	94,6	0,9	600	45,5
Помпа високо налягане №4	СДН 15-39-10	1000	511	6	113	94,6	0,9	600	45,5
Помпа високо налягане №5	СДН 15-39-10	1000	511	6	113	94,6	0,9	600	45,5
Помпа високо налягане №6	СДН 15-39-10	1000	511	6	113	94,6	0,9	600	45,5
Синхронен компенсатор	ДСП-140-74-4У4	3150	1610	6	350	96,6	0,9	1500	45,5
Синхронен компенсатор	СДН-2-16-56-10У3	1000	511	6	113	95,1	0,9	600	45,5

Таблица 4.8 Технически данни за възбудителна система

Технолог. позиция	Възбудителна система	U _н възб. [V]	I _н на възб. нам. [A]
Помпа високо налягане №1	Тиристорна ТВЕ-320/75 Т-6 УХЛ4	59	320
Помпа високо налягане №2	Тиристорна ТВЕ-320/75 Т-6 УХЛ4	59	320
Помпа високо налягане №3	Тиристорна ТВЕ-320/75 Т-6 УХЛ4	59	320
Помпа високо налягане №4	Тиристорна ТВЕ-320/75 Т-6 УХЛ4	59	320
Помпа високо налягане №5	Тиристорна ТВЕ-320/75 Т-6 УХЛ4	59	320
Помпа високо налягане №6	Тиристорна ТВЕ-320/75 Т-6 УХЛ4	59	320
Синхронен компенсатор	Тиристорна ТВ-630 У4	30	500
Синхронен компенсатор 1MW	Тиристорна ТВЕ-320/48 Т-6 УХЛ4	48	232

4.4.2 Определяне загубите на активна мощност на синхронните двигатели.

Загубите $\Delta P_{сд}$ зависят от номиналната активна мощност на синхронния двигател и честотата на въртене: колкото са по-малки мощността $P_{н\ сд}$ и честотата на въртене, толкова са по-големи загубите в двигателя за генериране на реактивна мощност.

За група паралелно работещи еднотипни синхронни двигатели с еднакъв режим на работа големината на сумарните загуби $\Delta P_{сд}$, определени за генериране на реактивна мощност Q е равна на :

$$\Delta P_{сд} = \frac{D_1}{Q_{нсд}} \cdot Q + \frac{D_2}{Q_{нсд} \cdot N} \cdot Q^2 \quad (4.1)$$

където: Q – сумарна реактивна мощност, генерирана от група от N на брой двигателя; D_1 и D_2 – постоянни коефициенти, зависещи от техническите параметри на синхронните двигатели. Стойностите на коефициентите D_1 и D_2 за различни типове двигатели са показани в табл.4.9.

Таблица 4.9 Коефициентите D₁ и D₂ за СД

Тип на двигателя	Номинална мощност		КПД %	Коефициент, kW	
	P _n , kW	Q _n , kVAr		D ₁	D ₂
1000 об/мин					
СДН-14-49-6	1000	511	95,37	5,09	3,99
СДН-14-59-6	1250	633	95,95	4,74	4,42
СДН-15-30-6	1600	812	95,75	6,65	6,8
СДН-15-49-6	2000	1010	96,06	8,06	7,53
СДН-15-64-6	2500	1260	96,5	8,13	7,74
СДН-16-76-6	3200	1610	96,75	10,3	8,91
СДН-16-69-6	4000	2000	96,43	14,1	11,8
СДН-16-84-6	5000	2500	96,9	13,8	11,5
СДН-16-104-6	6300	3150	97,22	14,6	13,1
600 об/мин					
СДН-14-44-10	630	325	93,98	5,6	4,06
СДН-14-56-10	800	410	94,65	5,76	4,63
СДН-15-39-10	1000	511	94,68	7,66	5,38
СДН-15-49-10	1250	637	95,16	7,54	6,56
СДН-15-64-10	1600	812	95,78	7,79	6,99
СДН-16-54-10	2000	1010	95,66	10,7	8,68
СДН-16-71-10	2500	1265	96,22	10,9	8,46
СДН-16-86-10	3200	1651	96,58	11,6	10,5
СДН-17-59-10	4000	2010	96,67	12,9	12,7
СДН-17-76-10	5000	2510	97,06	14,6	11,7
СДН-17-94-10	6300	3150	97,24	17,1	14,4
СДН-18-71-10	8000	4000	96,94	22,3	20,1
СДН-18-91-10	10 000	5000	97,26	22,7	22,1

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

1. Извършена е оптимизация на КРТ в ЕСС на мощен промишлен обект. За целта е проведен задълбочен анализ на схемотехническите особености на обекта даващ възможност за създаване на адекватна концепция на оптимизационния процес. Анализът на натоварването е направен в денонощен и месечен разряд, като са определени характеристикните коефициенти за четири значими звена на ЕСС. Основните констатации на изследването са свързани с незадоволителния режим за натоварване на съоръженията и

активна мощност и влошените показатели на реактивните субстанции на товара. Констатира се, че промишленият обект се експлоатира с влошени енергетични показатели и нисък $\cos\varphi$, устойчив характер в границите $\cos\varphi = 0,77 \div 0,86$.

2. *Анализирана е работата и параметрите на основните съоръжения в обекта – източници на реактивна мощност (синхронни двигатели, силови трансформатори, кабелни линии, асинхронни двигатели, кондензаторни батерии). Направена е количествена оценка на генерираната реактивна мощност, а също така са определени и активните загуби при трансфера на реактивна енергия. Маркирани са основните технически характеристики на посочените съоръжения и е прогнозирано тяхното участие в баланса на реактивната мощност на обекта. Направена е констатация за съществуване на реални възможности за използване на СД като компенсатори, извършена на базата на предварителна оценка на работоспособността, функционалността и възможностите за оптимална експлоатация на тези съоръжения.*
3. *Дефинирана е оптимизационна задача по критерий „**Минимум на приведените годишни разходи**“ и четири ограничителни условия. Екстремума на целевата функция е определен с помощта на метода на Лагранж. Определени са експлоатационни и икономически характеристики при КРТ със СД, като загубите на мощност се представят като полином от автора степен с три члена – първият е пропорционален на Q , вторият на $Q_0 \cdot Q$ и третият на Q^2 . Съставена е целева функция за ПГР, състояща се от три съставлящи (Z_0 , Z_1 и Z_2), представени в табулиран вид за различни видове СД. По аналогичен начин е дефинирана на целевата функция за КБ, като ПГР са представени като полином от първа степен. Формулирана е словесна дефиниция на оптимизационната задача по следния начин: „Да се определи кои СД и в каква степен да се използват за КРТ и каква икономически целесъобразна оценка може да се направи на варианта за съвместна КРТ на СД и КБ.“ Синтезираната методология за оптимизиране на реактивните мощности е в максимална степен адаптирана към възможностите на схемотехническите дадености на обекта и е пригодена за едновременно използване на СД и КБ при провеждане на КРТ.*
4. *Извършена е апробация на синтезираната методология за първа и втора секция на ГПП 3 на изследвания обект. Решението на оптимизационната задача изисква извършване на съвместна КРТ на ниво средно напрежение с използване на СД и на ниво ниско*

напрежение с използване на КБ. Получените резултати потвърждават работоспособността на предложения оптимизационен подход в реални условия на експлоатация на промишлени обекти. Доказано е технико-икономическата ефективност на представената методика и е обоснована възможността за нейното мултиплициране в сходни промишлени обекти.

ОБЩИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

В работата подробно са анализирани конвенционални и високо иновативни постановки за КРТ. Понастоящем масово в индустрията на страната се прилага първия вид методи за компенсация, поради своята простота при приложение и експлоатация, което е и основание тези методи да бъдат задълбочено изучени. Такива са и предпочитанията на болшинството от фирмите, продиктувани основно от икономически съображения. Освен това методологията на нормативната база е адаптирана към изграждане на този тип КРТ, което я прави предпочитана и от тази гледна точка. Маркирани са и основанията за прилагане на иновативни технически решения, базирани на интелигентни технически постановки. Препоръчват се за внедряване високо ефективни схемни решения, изградени като адаптивни филтрокомпенсиращи системи, минимизиращи едновременно няколко негативни енергетични смущения. Посочено е, че този подход е без алтернатива при изграждане на интелигентни електро-снабдителни системи.

КРТ се разглежда в условията на нелинейни и небалансирани системи, оценката за които е представена с помощта на различни мощностни теории в зависимост от натоварването на системата. Релативната връзка между КРТ и качеството на ЕЕ е доказана с помощта на аналитични зависимости, отразяващи адекватно енергетичното въздействие на натоварването му върху ПКЕЕ и реактивните мощности, с които се повишава вероятността за реализиране на оптимална КРТ. В работата е потвърдена приложимостта на такъв комплексен подход за постигане на ефективни КРТ в различни мощни промишлени обекти, работещи в условията на силно променливо натоварване, а също така внасящи съществени смущения на качеството на ЕЕ в ЕЕС. Разработени са методически постановки за синтезиране на ФКС, които отчитат и преценяват вероятността за възникване на резонансни явления и способстват за тяхното минимизиране. Целта на представените методиките да се характеризират и изяснят възможностите за внедряване на по – сложни и неспецифични подходи за КРТ при съществуващото голямо разнообразие от потребители в ЕЕС, работещи при несиметрични и несинусоидални режими и голяма динамика на натоварване.

С помощта на разработената методика по критерий „Електроенергийна ефективност“ е проведено апаратурно изследване върху КРТ в голям промишлен обект със силно изразени нелинейни и небалансирани режими при две нива на натоварване. Доказана е целесъобразността от компенсация и при ниски натоварвания, т.к. регистрираните загуби на мощност от неактивните субстанции на

мощността (N, S_0 и D), са съизмерими с тези, предизвикани от активната мощност P . Установена е неефективна работа на съществуващата система за КРТ, потвърдени и с помощта на проведени диагностични изпитания чрез прилагане на инфрачервена термография. Във връзка с това е предложен нов подход за КРТ чрез управление на компенсиращите мощности по критерий „Посока и големина на реактивната мощност“, прилагане на антирезонансни защиты, внедряване на последователни активни филтри и изграждане на SCADA за мониторинг, контрол и управление на електроенергийните процеси. Прогнозата е, че тези мероприятия ще осигурят икономия електрическа енергия в границите $(3 \div 4)\%$ от общата консумация при срок на откупване на съоръженията $(3 \div 5)$ г.

С помощта на изследователския процес е доказано влиянието на товара върху енергетичните характеристики на обекта, имащи отношение към КРТ. Определени са трифазни, притеглени по отношение на мощността показатели и е направен сравнителен анализ с конвенционалните, непритеглени показатели. Определена е степента на редукия в посока намаляване на стойностите на притеглените показатели и е предложено необходимата компенсираща мощност Q_K да се изчислява с помощта на фактора на мощността PF , а не чрез $\cos\phi$. При определянето на PF трябва да се прилагат разработените методически указания, а така също да се използват и притеглените по отношение на мощността показатели. Последните е задължително да се използват при определяне на претоварването на ФКС.

В голям промишлен обект от химическата промишленост е направен анализ на схемотехническите особености и апаратурно са изследвани енергетичните характеристики на ЕСС с цел създаване адекватна концепция за КРТ. Установени са незадоволителен режим на натоварване на обекта и работа с нисък $\cos\phi$. Анализирани са източниците на реактивна мощност и техните експлоатационни характеристики и е прогнозирано участието им в баланса на реактивните мощности на обекта. Направена е констатация за съществуване на реални възможности за използване на СД в процеса на КРТ, извършена на базата на предварителна оценка на работоспособността, функционалността и възможностите за оптимална експлоатация на тези съоръжения. Определени са експлоатационни и икономически характеристики при КРТ със СД, като загубите на мощност се представят като полином от втора степен с три члена, пропорционално съответно на $Q, Q_0 \cdot Q$ и Q^2 .

Дефинирана е оптимизационна задача по критерий „Минимум на ПГР“ и четири ограничителни условия. Съставяна е целева функция за ПГР на СД, представляваща полином от втора степен по отношение на Q . По аналогичен начин е дефинирана целева функция за КБ, като ПГР представляват полином от първа степен по отношение на Q . Извършена е

апробация на синтезираната методология за ГППЗ на обекта, като решението на оптимизационната задача изисква извършване на съвместна КРТ на СН с използване на СД 6,3kV и на НН с използване на КБ 0,4kV. Предложеният оптимизационен подход е с висока работоспособност и доказана технико-икономическа ефективност и може да бъде мултиплициран в други промишлени обекти.

В. АВТОРСКА СПРАВКА ЗА ПРИНОСИТЕ НА РАЗРАБОТКАТА

НАУЧНИ ПРИНОСИ

1.Формулирана е иновативна теоретична постановка по критерии “Електроенергийна ефективност” с прилагане на диференциран подход за определяне на съставлящите на активните загуби от неактивните субстанции на мощността (N , S_o и D) при несиметрични и несинусоидални режими. Аprobацията на методиката е осъществена в мощен обект при изследване ефективността на КРТ в условията на експлоатация.

2.Формулирана е методическа постановка за определяне на трифазни, притеглени спрямо мощността показатели, които с висока степен на адекватност, достоверност и тъждественост е целесъобразно да се използват при изчисляване на фактора на мощността PF и при определяне на претоварването на ФКС от в.х. Аprobацията на постановката е извършена за четири нива на трифазната пълна мощност на изследвания обект $S_{зр}$, като са определени редуцирани трифазни притеглени коефициенти, сравнени с традиционно използваните.

НАУЧНО - ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1.Представени са практически-приложни постановки за КРТ на мощни популярни потребители (електродъгови пещи, промишлени електронни преобразуватели, прокатни станове, потребители от трети клас по отношение на ЕМС), внасящи съществени смущения в ЕСС на промишлените обекти- генериране на в.х., дебаланс на тока и напреженията, ударни натоварвания и др. Анализирана е вероятността за настъпване на резонансни явления при неразчетена КРТ и средствата за потискане на тези негативни явления. В практически-приложен аспект са разработени методически указания за изчисляване и синтезиране на ФКУ от пасивен и активен тип.

2.Проведените изследвания за КРТ дават основание да се твърди, че съществува еквивалентност при реализиране на този процес в условията на различно натоварване. От изследванията е установено, че коефициента на допълнителни загуби при несиметрични и несинусоидални режими при понижено натоварване K_D е с около 20% по-висок от този при нормално натоварване и това е още един факт в подкрепа на необходимостта от прилагане на КРТ при понижено натоварване.

3.Проведената оптимизация на КРТ в ЕСС на мощен промишлен обект от химическата промишленост по критерий “Минимум на ПГР” представлява реализирано техническо решение на съвместна КРТ със СД и

КБ, приложена на две нива на напрежението- СН и НН. Оптимизационната задача дава възможност да се определи броя и мощността на СД и да се прогнозира в каква степен е икономически целесъобразно използването на КБ.

ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА ВЪВ ВРЪЗКА С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Илиев И., Петров П., Делчева Д., Оптимално разпределение и разположение на компенсиращите мощности в международен аспект Енергиен форум 24-27 юни 2025., София. ISSN 1313-2962, стр. 525–535
2. Петров П., Водноелектрически централи - основен компонент на съвременните енергийни системи Енергиен форум 24-27 юни 2025., София. ISSN 1313-2962, стр. 570– 582
3. Илиев И., Петров П., Определяне зоната на разсейване на център на електрическите товари Енергиен форум 24-27 юни 2025., София. ISSN 1313-2962, стр. 561– 569
4. Илиев И., Петров П., Определяне ориентацията на координатните оси и построяване на зоната на разсейване на център на електрическите товари Енергиен форум 24-27 юни 2025., София. ISSN 1313-2962, стр. 552– 560
5. Илиев И., Петров П., Анализ на ЕЕЕф на помпени станции Енергиен форум 24-27 юни 2025., София. ISSN 1313-2962, стр. 544– 551

Автор: Петър Иванов Петров

E-mail: p_petrov1977@abv.bg

**Заглавие: Влияние на натоварването върху реактивната мощност при
несиметрични и несинусоидални режими**