



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
Факултет ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ
Катедра ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Маг. инж. Никола Неделчев Николов

ТЕОРЕТИЧНИ АСПЕКТИ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕ НА
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ НИСКОПРОВЕСНИ
ПРОВОДНИЦИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Електрически мрежи и системи

Научен ръководител: доц. д-р Димо Стоилов

СОФИЯ, 2017 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електроенергетика“ към Факултет Електротехнически на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 12.06.2017 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-243 / 20.06.2017 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р Васил Агапиев – председател
2. доц. д-р Димо Стоилов – научен секретар
3. Проф. Стоян Стоянов
4. доц. д-р Йончо Каменов
5. доц. д-р Кирил Янев

Рецензенти:

1. доц. д-р Васил Агапиев
2. доц. д-р Кирил Янев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Електротехнически на ТУ-София, блок №12, кабинет № 12222.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Електроенергетика“ на факултет Електротехнически. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора в катедра „Електроенергетика“ и в „ЕЛ-ТЕСТ“ ЕООД. Някои от тях са подкрепени чрез проекти финансирани от „ЕЛ-ТЕСТ“ ЕООД.

Автор: маг. инж. Никола Николов

Заглавие: Теретични аспекти при използване на високотемпературни нископровесни проводници

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В настоящия дисертационен труд е разработен методичен подход за оразмеряване на въздушни електропроводни линии чрез използването на високотемпературни нископровесни проводници (ВТНП). Този подход надгражда класическите методи за оразмеряване чрез отразяване на спецификите свързани с тези технологично по-съвършени проводници.

Към настоящия момент тези конструкции проводници намират приложение в части от електрически мрежи със слабо развити преносни и разпределителни способности. Предвид на преимуществата им спрямо класическите проводници, предвид на факта че електрическите товари нарастват и поради това че все по-трудно изглежда строителството и узаконяването на нови въздушни електропроводи, използването на ВТНП ще намира все по-широко приложение в електрическите мрежи. Това е основна подбуда за разработването на настоящата дисертация.

Все още се наблюдава сравнително слабо познаване на спецификите свързани с принципа на работа на тези проводници, по отношение на механичното им поведение. Поради факта, че електроенергетиката е структуроопределящ отрасъл за икономиката на голяма част от държавите, залегналите изисквания свързани с работата, управлението и надеждността на електроенергийната система (ЕЕС) са изключително сериозни. Все по-бързите и осезаеми процеси на либерализация и децентрализация на ЕЕС, структуриране и администриране на множество електроенергийни пазари внасят допълнителни усложнения в и без това сложната структура. Необходимостта от подобряване на гъвкавостта на ЕЕС и повишаване на преносните и разпределителните възможности на електрическите мрежи нараства, като успоредно с това се налага запазване, а в някои случаи и увеличаване на изискванията към надеждното електрозахранване на потребителите. От една страна, изброените факти подтикват мрежовите дружества да ограничават прилагането на тези проводници поради липсата на достатъчно представителни данни и несигурност относно техните електромеханични параметри и надеждност при експлоатационни условия. От друга страна обаче, именно поради същите протичащи в електроенергийния отрасъл процеси, развитието на електрическата мрежа налага използването на ВТНП, като една добра алтернатива за увеличаване на преносните възможности на съществуващите въздушни електропроводи. Издирените и използвани при разработването на дисертационния труд чуждестранни научни източници могат да послужат като добра основа за запознаване с особеностите на тези нови проводници от страна на специалистите работещи в сферата на механичното оразмеряване на електропроводи.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е разработване на цялостна методика за механично оразмеряване на въздушни електропроводни линии при използване на високотемпературни нископровесни проводници.

Научна новост

Предложен е цялостен подход за механично оразмеряване при използване на високотемпературни нископровесни проводници. Този подход отразява специфичните особености свързани с работата на тези нови конструкции проводници.

Практическа приложимост

Предложен е начин за определяне на температурата на проводниците при тяхната нормална работа. В досегашната практика при механично оразмеряване на въздушни електропроводи се е считало, че приемането за работа на проводниците при температури еднакви с тези на околната среда осигурява достатъчна точност на получаваните оценки. Използването на ВТНП обаче налага изменение в това възприятие.

Предложена е методика за определяне на точката на пречупване в характеристиката на изменение на провеса в зависимост от температурата. Предлаганата методика дава възможност за определяне на температурата, при която токопроводящите слоеве на проводниците, поради по-високия си температурен коефициент на линейно разширение спират да поемат механични усилия.

Разработен и привнесен в българската научна общност сравнителен анализ на най-широко разпространените високотемпературни нископровесни проводници. Анализирани са основните използвани към момента конструкции ВТНП.

Предложени изменения в действащата към момента Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии в частта, разглеждаща въздушни електропроводи с напрежение над 1000V.

Апробация

Дисертационният труд е докладван и обсъден по етапи и в завършен вид на семинари и заседания на катедра „Електроенергетика“ при Технически университет – София, в периода 2013 – 2017 г.

Основна част от теоретичните и експерименталните резултати са представени на ежегодната конференция на Електротехнически факултет и на други престижни научни форуми. Авторът ги прилага интензивно в консултантската и преподавателската си дейности.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в пет броя научни статии, от които една самостоятелна. Четири от статиите са публикувани в реферирани списания, а последната е в сборника на международната конференция ELMA 2017, както и в библиотеката на IEEE eXplore.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 208 страници, като включва въведение, седем глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 132 литературни източници, като 113 са на латиница и 19 на кирилица. Работата включва общо 58 фигури и 43 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА I. ПОДХОДИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ПРОПУСКАТЕЛНАТА СПОСОБНОСТ НА СЪЩЕСТВУВАЩИ ВЪЗДУШНИ ЕЛЕКТРОПРОВОДНИ ЛИНИИ

В целия свят се наблюдава нарастваща необходимост от увеличаване и развитие на преносните способности на съществуващите електроенергийни активи. Основно това се дължи на повишаващите се електрически товари от урбанизация и индустриализация, промяната на производствените ресурси, необходимостта от подобряване на надеждността и справянето с проблемите свързани със сигурността. Нарастващите товари, начина на използване на земята, публичната оценка, разпределението на финансовите ресурси, стандартите за ВИ, видът и местоположението на производителите, цените на горивата – всички тези фактори заедно влияят върху ефективността на развитие на електрическата мрежа. Измененията в загубите на мощност и енергия също оказват влияние при вземането на решенията.

Увеличаването на преносните способности не е свързано единствено с разходите за проводници. Разходите за строително-монтажни дейности, разходите при аварийни ситуации (отпадания), стойностите за учредяване на сервитутни отстояния и разходите свързани с откупуването на инвестициите повлияват значително начина на развитие на електрическите мрежи.

Големите капиталови вложения, необходими за преносната мрежа, все по-трудно се обосновават предвид динамиката на дерегулацията на пазара и увеличаващия се дял на разпръснатото производство. Интеграцията на разпръснатите енергийни ресурси предполага изготвянето на анализ, описващ преносните възможности на съществуващата мрежа. Производителите на електрическа енергия присъединени към разпределителната мрежа могат да повлияят работата на преносната. Заместването на конвенционалните производители и акумулирането на енергията от ВИ присъединени към разпределителните възли от мрежата променят потоците на мощност в ЕЕС като цяло.

1.1. Повишаване на преносната способност на електропроводните линии и свързани с това методи.

Работата и управлението на дългите преносни електропроводи силно се влияят от регулирането на напрежението, като е необходимо в получаващия възел да се осигури то да бъде в допустимите граници на отклонение. По тази причина решението за повишаване на преносната способност е свързано с мероприятията за подобряване на регулирането на напрежението.

Късите преносни линии са ограничени от токовото натоварване на проводниците, както и от необходимостта за осигуряване на безопасни електрически габарити. В тази връзка повишаването на преносната способност на тези електропроводи е свързано с повишаването на допустимото им токово натоварване.

Практическото повишаване на преносната способност на преносните електропроводи е функция от следните условия:

- Терен – електропроводите преминаващи през хълмист и планински терен, при който местата на стълбовете се определят от теренните възможности, а не от допустимите товари, обикновено са изградени със стълбове, които не са натоварени до техните максимално оразмерителни сили;
- Метеорологичните условия и характеристиките на трасето;
- Състоянието на проводника, изолацията и стълбовете;
- Разходите свързани със загуби, които представляват функция от времевия период на работа с големи електрически товари;
- Нормативи и стандарти касаещи, габаритите между въздушната линия и терена;
- Нормативите свързани с натоварването на стълбовете;
- Дължината на електропровода;
- Първоначалните оразмерителни сили на стълбовете.

Повишаването на преносната способност на линиите може да се постигне чрез използването на някой или комбинация от следните възможности:

- i. Увеличаване на токопроводящото сечение на проводника чрез:
 - a. Добавяне на проводници към съществуващите, т.е. формиране на снопови проводници;
 - b. Замяна на съществуващите проводници с нови, със различно сечение или конструкция;
- ii. Повишаване на токовото натоварване на проводника чрез изменения във възприетите критерии за допустимото токово натоварване, което се постига посредством изготвянето на метеороложко проучване за характеристиките на трасето на електропровода;
- iii. Изтегляне и регулиране на специални проводници, предназначени за работа с висока температура и/или с малък провес;
- iv. Повишаване на допустимата работна температура на проводниците. За осигуряването на вертикалния габарит е необходимо:
 - a. Увеличаване на опъновата сила на проводниците (със съответното усиливане на стълбовете);
 - b. Преустройство на стълбовете и изолацията с цел увеличаване на габарита към терен;
 - c. Изправянето на нови стълбове в определящите габарита междустълбия;
 - d. Поставянето на устройства за намаляване на провеса на проводниците;
 - e. Провеждането на изкопни работи на ключови места, така че да се повиши габарита към терен;
- v. Преустройство на електропроводната линия така че да се постигне по-висок характеристичен импеданс;
- vi. Изграждане на системи за активно определяне на натоварването на електропровода (това може да се приеме като метод, който не

увеличава преносната способност, понеже не променя максималната способност на електропровода да пренася мощности, но позволява по-доброто използване на максималното токово натоварване);

- vii. Възможно е повишаване на преносната способност при номинална стойност на разходите чрез подробно проучване относно габаритите на проводника, зададени в стандартите.
- a. Резултатите от проучването може да покажат, че в хълмист терен при изправянето на много малък брой стълбове и съответно минимални изменения в профила на електропровода може да се постигне съществено увеличаване в преносната способност;
 - b. Може да се използват различни комплектовки на носителните вериги, така че да се избегне увеличаването на провеса при определящите междустълбия, макар това да води до увеличаване на провеса в съседните.

ГЛАВА II. ВИДОВЕ ПРОВОДНИЦИ, ИЗПОЛЗВАНИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ПРЕНΟΣНИТЕ СПОСОБНОСТИ НА ВЪЗДУШНИТЕ ЕЛЕКТРОПРОВОДНИ ЛИНИИ

1. Кратко изложение относно ефективността на проводниците при работа с високи температури

Увеличаването на преносната способност на съществуващите електропроводни линии и едновременно с това запазването на съществуващите проводници предлага неоспорими икономически ползи. По този начин се спестяват разходи свързани със закупуването на нови проводници и усилването на съществуващите стълбове.

Електрическият ток протичащ през съществуващ неизолиран проводник използван при въздушна линия е ограничен с цел да се избегнат:

- Трайното намаляване на якостта на опън на проводника поради отвърщането на алуминия;
- Трайното удължаване на проводника (работа в зоната на пластичните деформации което води до постоянно увеличаване на провеса) породено от ускорения процес на пропълзяване на алуминия поради повишената температура;
- Временното нарушаване на нормите относно електрическите габарити, поради увеличаването на провеса (в зоната на еластичните деформации) вследствие на високата температура на проводника.

При доказана необходимост от подмяна на съществуващите проводници за даден електропровод (поради нарушаване на нормираните габаритни разстояния или поради влошено експлоатационно състояние) икономически целесъобразно (а и от екологична гледна точка) е да се използва нов проводник, който позволява запазването на съществуващите стълбове. *Това обикновено налага работа на новия проводник при температури над точката на отвърщане на обикновения алуминий (90°C) и внася изчислителни затруднения, които не се отчитат при класическото механично оразмеряване на въздушните електропроводи.*

Част от тези изчислителни затруднения са свързани с определянето на провеса при температури надвишаващи 100°C. Особена трудност

представяват комбинираните проводници – например стомано-алуминиевите (АС). Грешките при изчисляването на провесите може да се дължат на:

- Неправилно моделиране на удължението на комбинираните проводници над температурата при ТПП;
- Трайното удължение на алуминиевите жички, когато силата и/или температурата които им действат е над тези свързани с режима на средногодишна температура (ср.г.);
- Разлика в температурите в ядрото на проводника и по неговата повърхност при голяма плътност на тока;
- Невъзможност за изравняване на опъновата сила при висока температура на проводниците за въздушни електропроводи, имащи силно различаващи се дължини на междустълбията;
- Повишена стойност на електрическото съпротивление при високи температури, породена от загуби от магнетизъм в ядрото, когато то е направено от стомана.

2. Проводници използвани за повишаване на преносните способности на въздушните електропроводни линии

Проведено проучване доказва, че голямата част от използваните днес проводници са АС проводници (82%), макар в някои европейски държави да навлизат проводници, направени изцяло от алуминиева сплав (All Aluminium Alloy Conductor-AAAC) и алуминиеви проводници усиленни чрез сплави (Aluminium Conductor Alloy Reinforced-ACAR), при изграждането на нови въздушни електропроводи. Съществуват множество специални конструкции проводници, които предоставят конкретни решения на проблеми възникнали на регионално ниво. Една част от тези специални проводници са използвани достатъчно дълго време, така че да се приемат като класически за това регионално ниво.

2.1.Повишаване на пропускателната способност чрез използване на съществуващите проводници

Съществуват два начина за повишаване на пропускателната способност чрез използване на съществуващите проводници: първият е чрез повишаване на максималната допустима температура на проводниците; вторият е свързан с използването на вероятно определено на токовото натоварване на електропроводите.

2.2.Повишаване на пропускателната способност чрез подмяна на съществуващите проводници

Замяната на съществуващите проводници е много ефективен метод за повишаване на пропускателната способност на въздушните електропроводни линии. В зависимост от това какъв е съществуващия проводник, температурата с която е предвидено да работи изначално и новата температура, която ще се получава вследствие на по-големите електрически товари могат да се постигнат значителни подобрения, както по отношение на преносната способност и надеждност, така и по отношение на разходите, които в голяма част от случаите са по-малки спрямо това да се изгради нова ВЛ.

2.2.1. Проводници използвани за замяна на класическите, работещи при умерени температури (<100°C)

Проводниците най-общо са разделени в две категории. Всеки от тези проводници е подходящ за работа при умерена температура (<100°C). В първата категория попадат проводници, които са направени от алтернативни материали, спрямо класическите стомано-алуминиеви. Това са проводници изработени изцяло от алуминиева сплав (All Aluminium Alloy Conductor - AAAC) и проводници използващи алуминий, но усилен от сплави (Aluminium Conductor Alloy Reinforced - ACAR). Втората категория проводници са тези с алтернативна конструкция на жичките спрямо класическите с кръгло сечение. В тази категория попадат така наречените компактни конструкции проводници и тези с подобрена конструкция срещу действието на вятър.

2.2.2. Проводници използвани за замяна на класическите, предназначени за работа с високи температури (>100°C)

Тук е поместена сравнителна информация за четири основни типа проводници използвани в преносните електропроводи – TACSR (или ZTACSR), GTACSR (или GZTACSR), TACIR (или ZTACIR) и ACSS. Всеки от тези проводници се изработва от комбинацията на елементарни жички направени от алуминиева сплав, използвани за проводимост и елементарни жички от стомана, използвани за осигуряване на механична якост. Стоманените жички имат покритие, чиято цел е да ги предпази от корозия. Характеристиките на различните сплави на алуминия и различните якостни характеристики на стоманените жички са посочени в таблици 2 и 3.

2.2.2.1. Материали от които са изработени проводниците

Проводниците създадени за работа при висока температура се състоят от комбинация на металите алуминий и стомана, като техните характеристики са описани в таблици 2 и 3.

Таблица 2. Характеристики на алуминия и алуминиевите сплави предназначени за работа с висока температура.

Вид алуминий		Проводимост (%IACS)	Якост на опън (MPa)	Доп. раб. темп. (°C)	
				Продължителна работа	Аварийна работа*
Твърдо изтеглен	1350-H19 (HAL)	61,2	159-200	90	120
Температурно устойчив	TAL	60	159-176	150	180
Високо температурно устойчив	ZTAL	60	159-176	210	240
Напълно отвърнат	1350-O	63	59-97	200-250**	250**

* Температурата при аварийна работа не е добре дефинирана, но има общо съгласие, че продължителността на аварийни състояния с тази стойност на температурата не трябва да надхвърля 10 часа на година.

** Жичките направени от изцяло отвърнат алуминий могат да работят при температури по-високи от 250°C, но обикновено температурата се ограничава до по-ниски стойности поради опасения свързани със токовете връзки и покритията на стоманените жички.

Съкращенията ZTAL и TAL показват че използваната сплав е алуминиево-циркониева (zirconium aluminium alloy). Жичките от TAL и ZTAL сплав имат приблизително същата проводимост и якост на опън като класически използвания алуминий за направа на електрически проводници, но могат да работят продължително с температури от 150°C до 210°C без загуба на якост на опън във времето. Жичките от изцяло отвърнат алуминий са химически идентични на обикновения твърдо изтеглен алуминий, имат много по-малка якост на опън и могат да работят неограничено време с температури дори по-високи от 250°C без да се наблюдава изменение в механичните и електрическите им характеристики.

Таблица 3. Характеристики на металите използвани за направа на ядрата на проводници за въздушни линии.

	Якост на опън (MPa)	Модул на линейна деформация (GPa)	Темп. коеф. на лин. разширение ($\times 10^{-6}$)
Поцинкована якостна стомана	1230-1320	206	11,5
Поцинкована високоякостна стомана	1765		
Стомана покрита с алуминий 20,3%IACS	1103-1344	162	13
Якостна стомана с мишметал от 5% цинк и алуминий	1380-1450	206(преди пропълзване)	11,5
	1520-1620	186(след пропълзване)	
Поцинкована инварна сплав	1030-1080	162	2,8-3,6

2.2.3. Проводници с ядро изработено от композитни материали, предназначени за работа с високи температури (>100°C)

В тази категория попадат два основни типа проводници използвани в преносните въздушни електропроводни линии – това са ACCS и ACCR.

ACCS проводниците са годни за продължителна работа при температури до 175°C. Максимално допустимата температура за ACCR проводника е 210°C при продължителна работа и до 240°C при кратковременна (аварийна) работа.

2.2.3.1. Материали от които са направени проводниците

Токопроводящата част на проводник ACCS е направена от отвърнат алуминий по стандарт 1350-O. Същата за проводник ACCR е направена от алуминиево-циркоениева ZTAL сплав. Параметрите на тези материали са описани в таблица 2.

Характеристиките на композитите, използвани за направата на ядрата на проводниците са поместени в таблица 4.

Таблица 4. Характеристики на композитните материали, използвани за направа на ядрата на проводници за въздушни линии.

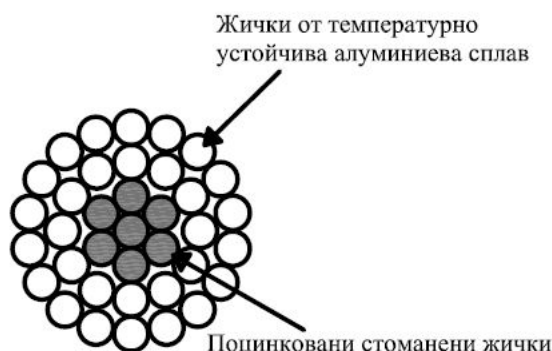
Описание	Специфично тегло (g/cm ³)	Модул на еластичност (МПа)	Якост на опън (МПа)	Темп. коеф. на лин. Разширение (x10 ⁻⁶ /°C)
Карбонова смола (АССС)	0,07	110300 – 144800	2275-2586	1,60
Матрица от композитни нишки с вградени влакна от алуминиев оксид (АССР)	3,33	215000 – 230000	1380	6,00

3. Приложение на високотемпературните проводници

В тази глава са представени преимуществата и недостатъците на всеки от ВТНП.

3.1. Високотемпературен проводник (Z)TACSR

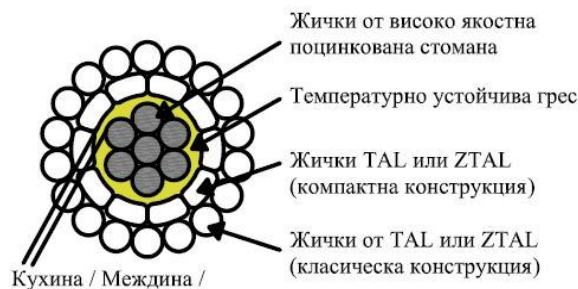
(Z)TACSR проводника има същата конструкция както класическия АС проводник, като е съставен от поцинковани стоманени жички за ядрото и (Z)TAL жички (температурно устойчиви жички от алуминиева сплав с добавен цирконий) които се използват като токопроводяща част. В таблица 2 са посочени основните параметри на жичките от (Z)TAL.



Фигура 6. Напречно сечение на проводник TACSR.

3.2. Високотемпературен проводник G(Z)TACSR

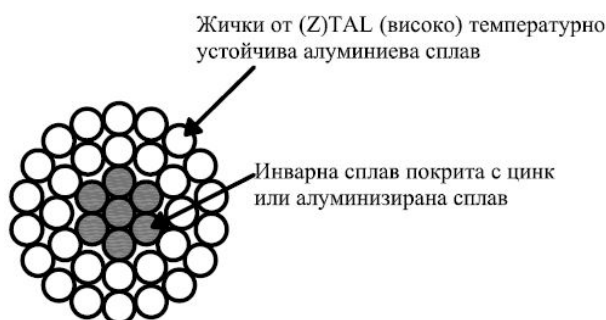
Проводниците с кухина между носещата и токопроводящата част имат специфична конструкция. Тази кухина е изкуствено създадена и е между най-вътрешния слой от токопроводящата част и ядрото на проводника, като целта ѝ е при регулиране на проводника силата която се използва да се поеме изцяло от ядрото. Така по ефективен начин се фиксира температурата в ТПП да отговаря на температурата при изтегляне и регулиране на проводника, което от своя страна осигурява работа с ниски стойности на провесите (защото провесът ще се диктува от температурния коефициент на линейно разширение единствено на стоманата) за голям температурен диапазон.



Фигура 7. Напречно сечение на проводник G(Z)TACSR.

3.3. Високотемпературен проводник (Z)TACIR

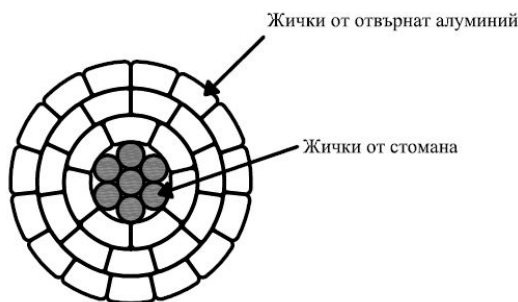
Съкращението ZTACIR произлиза от Super Thermal Resistant Aluminium Alloy Invar Reinforced, което означава проводник от високо температурно устойчива алуминиева сплав усилен с алуминизирани инварни жички. Тази конструкция проводници са широко известни като инварни проводници. Също като проводник (Z)TACSR, ZTACIR има класическа конструкция с усукани жички, използвайки нови материали за направата им, които позволяват на проводника да работи продължително време с високи температури.



Фигура 8. Напречно сечение на проводник (Z)TACIR.

3.4. Високотемпературен проводник ACSS и ACSS/TW (първоначално обозначавани като SSAC)

Проводникът ACSS се състои от жички от напълно отвърнат алуминий (по стандарт 1350-O), концентрично положени около жички от стомана, формиращи ядрото на проводника. Тези проводници не се произвеждат с единична елементарна нишка за ядрото.



Фигура 9. Напречно сечение на проводник ACSS/TW.

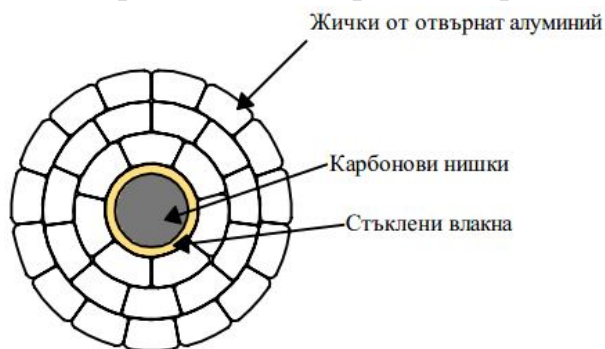
Поради използването на отвърнат алуминий при направата на тези проводници, те имат по-добри механични показатели по отношение на успокояването на вибрациите спрямо еквивалентни класически проводници.

Тъй като якостта на опън на отвърнатия алуминий е по-малка от тази на алуминия произвеждан по стандарт 1350-H19, допустимата якост на опън на проводника АССС е по-малка спрямо проводниците изпълнявани по класическа технология.

3.5. Високотемпературен проводник АССС

Съкращението АССС произлиза от Aluminium Conductor Composite Core, което означава алуминиев проводник с ядро от композитен материал.

Ядрото на този проводник се състои от карбонови и стъклени влакна, свързани чрез високоустойчива на температура смола. По този начин се образува матрица обединяваща хилядите отделни влакна в единна плътна жичка, осигуряваща механичната устойчивост на проводника. Централната част на ядрото е съставена от въглеродни влакна. Тези централна част е обвита от стъклени влакна несъдържащи бор, като по този начин се подобрява гъвкавостта и здравината на ядрото на проводника.



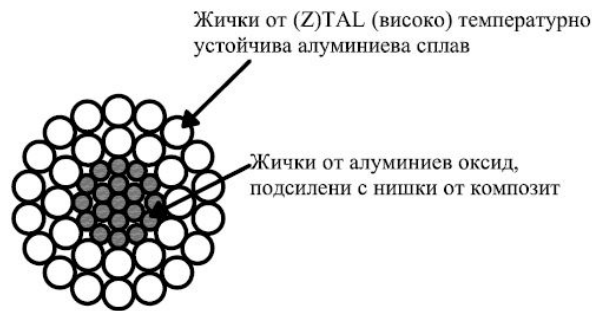
Фигура 11. Напечно сечение на проводник АССС.

Алуминиевите жички са направени от отвърнат алуминий 1350-O, който има по-добра проводимост в сравнение с твърдо изтегления.

3.6. Високотемпературен проводник АССР

Съкращението АССР произлиза от Aluminium Conductor Composite Reinforced, което означава алуминиев проводник усилен с композитен материал.

Проводникът е направен от високо устойчиви на температура жички от алуминиево-циркониева сплав, покриващи ядрото. Ядрото е направено от жички от алуминиев оксид, подсилени с влакна от композитни жички. Характерно за проводника е че ядрото и външните слоеве допринасят за общата проводимост и якост на проводника.

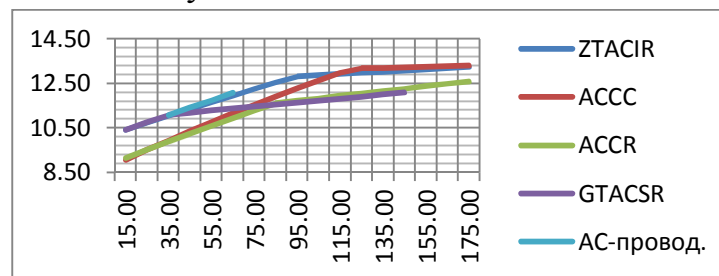


Фигура 12. Напречно сечение на проводник ACCR.

ГЛАВА III. МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТОЧКАТА НА ПРЕЧУПВАНЕ В ХАРАКТЕРИСТИКАТА НА ИЗМЕНЕНИЕ НА ПРОВЕСА В ЗАВИСИМОСТ ОТ ТЕМПЕРАТУРАТА НА ПРОВОДНИЦИТЕ (KNEE-POINT TEMPERATURE)

1. Методика за определяне на точката на пречупване

ВТНП са комбинирани проводници: вътрешният слой (ядрото) е от стомана или други устойчиви на опън материали (например желязо-никелови сплави извесни като инварни сплави). Ядрото на проводника може да бъде и от композитни материали на основата на алуминиеви жички, керамика и въглеродни влакна. Външният слой на тези нови проводници обикновено е от температурно устойчива алуминиева сплав.



Фигура 13. Графика на зависимостта на провеса от температурата при различни видове високотемпературни нископровесни проводници.

1.1. Основни физико-механични показатели на неизолирани проводници, използвани при определянето на точката на пречупване в характеристиката на изменение на провеса в зависимост от температурата на проводниците

1.1.1. Модул на линейна деформация (E)

Проводник с дължина L , подложен на опън под действието на сила F , в областта на еластичната деформация се удължава с:

$$\Delta L = \frac{L \cdot F}{E \cdot S}, \quad (III.1)$$

където S е полезното сечение на проводника, а E е модулът на линейна деформация.

Съгласно закона на Хук относителното удължение на проводника е:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{E \cdot S} = \frac{\sigma}{E}, \quad (III.2)$$

където $\sigma = \frac{F}{S}$ е напрежението на опън в проводника.

Коефициентът на линейно удължение β е:

$$\beta = \frac{1}{E}, \quad (III.3)$$

Ако комбинираният проводник се натовари със сила на опън F , тя се разпределя между токопроводящата и носещата части на проводника:

$$F = F_B + F_{\text{я}}, \quad (III.4)$$

където

F_B – механична сила действаща на външния слой на проводник, N;

$F_{\text{я}}$ – механична сила действаща на ядрото на проводник, N;

Индексът „в“ се използва за токопроводящата част на проводниците и е възприет условно като съкращение за външните слоеве на проводниците, а индексът „я“ представлява съкращение от вътрешните слоеве на проводника или ядро на проводника.

В сила е и равенството (III.5):

$$\Delta L = \Delta L_B = \Delta L_{\text{я}}, \quad (III.5)$$

Където:

ΔL_B – удължение на външния слой на проводник при изменение на температурата и под действие на механично усилие, m;

$\Delta L_{\text{я}}$ – удължение на ядрото на проводник при изменение на температурата и под действие на механично усилие, m;

От закона на Хук (III.2) за относителното удължение на стомано-алуминиевите проводници се получава:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} = \frac{\sigma_A}{E_A} = \frac{\sigma_C}{E_C}, \quad (III.6)$$

където

σ – фиктивно напрежение на опън за целия проводник;

E_0 – модул на линейна деформация за комбинирания (в случая) АС проводник;

σ_A – напрежение на опън за алуминия;

E_A – модул на линейна деформация на алуминия;

σ_C – напрежение на опън за стоманата;

E_C – модул на линейна деформация на стоманата.

Уравнение (III.4) се представя във вида:

$$\sigma \cdot (S_B + S_{\text{я}}) = \sigma_B \cdot S_B + \sigma_{\text{я}} \cdot S_{\text{я}}, \quad (III.7)$$

В равенството (III.7) S_B и $S_{\text{я}}$ са сеченията съответно за външния слой и ядрото, а σ_B и $\sigma_{\text{я}}$ са напреженията в тези съставки на проводника.

Решават се съвместно (III.6) и (III.7), като индекса на алуминия се замества с този за външните слоеве на проводника, а индекса за стоманата с този за ядрото и се получава:

$$\varepsilon \cdot E_0 \cdot (S_B + S_{\text{я}}) = \varepsilon \cdot E_B \cdot S_B + \varepsilon \cdot E_{\text{я}} \cdot S_{\text{я}} , \quad (III.8)$$

С помощта на (III.8) се определя модулът на линейна деформация за комбиниран проводник във функция от модулите на линейна деформация на материалите, от които е съставен проводника - E_B и $E_{\text{я}}$:

$$E_0 = \frac{E_B \cdot S_B + E_{\text{я}} \cdot S_{\text{я}}}{S_B + S_{\text{я}}} , \quad (III.9)$$

Коефициентът на линейна деформация е равен на:

$$\beta_0 = \frac{1}{E_0} = \frac{S_B + S_{\text{я}}}{E_B \cdot S_B + E_{\text{я}} \cdot S_{\text{я}}} , \quad (III.10)$$

1.1.2. Температурен коефициент на линейно разширение α

Когато температурата t на проводник с дължина L се изменя с Δt , дължината му се изменя с ΔL , като:

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta t \cdot L , \quad (III.11)$$

За да остане проводникът в статично равновесие при изменение на температурата, е необходимо температурните сили в двата съставлящи го метала да са равни и противоположни:

$$\pm F_B^{(t)} = \mp F_{\text{я}}^{(t)} , \quad (III.13)$$

Където $F_B^{(t)}$ и $F_{\text{я}}^{(t)}$ са механични сили, действащи съответно на външните слоеве и ядрото на проводника при изменение на температурата.

Измененията на дължината на проводника при изменение на температурата могат да се определят от:

$$\Delta L^{(t)} = \alpha_0 \cdot (t - t_{\text{пр}}) \cdot L , \quad (III.14)$$

където α_0 е температурният коефициент на линейно разширение за комбинирания проводник.

Удължението на комбинирания проводник $\Delta L^{(t)}$ от (III.14) е равно на удължението $\Delta L_B^{(t)}$ от (III.15) и на $\Delta L_{\text{я}}^{(t)}$ от (III.16). Силите $F_B^{(t)}$ и $F_{\text{я}}^{(t)}$ се определят от съвместното решаване на (III.14) и (III.15) и на (III.14) и (III.16). Като се вземе под внимание (III.12) се получава:

$$F_B^{(t)} = (\alpha_0 - \alpha_B) \cdot (t - t_{\text{пр}}) \cdot E_B \cdot S_B , \quad (III.17)$$

$$F_{\text{я}}^{(t)} = (\alpha_0 - \alpha_{\text{я}}) \cdot (t - t_{\text{пр}}) \cdot E_{\text{я}} \cdot S_{\text{я}} , \quad (III.18)$$

1.1.3. Уравнение за състоянието на проводника, когато провесната крива е приета за парабола

Връзката между дължината на проводника при новия L_n и известния L_m режим е:

$$L_n = L_m \cdot \left[1 + \alpha \cdot (t_n - t_m) + \frac{F_n - F_m}{E \cdot S} \right] \quad (III.19)$$

Дължината на проводника в режим „m“ се замества с:

$$L_m = L + \frac{p_m^2 \cdot L^3}{24 \cdot F_m^2} \quad (III.20)$$

а в режим „n“ - с

$$L_n = L + \frac{p_n^2 \cdot L^3}{24 \cdot F_n^2} \quad (III.21)$$

Замествайки (III.20) и (III.21) в (III.19) се получава:

$$L + \frac{p_n^2 \cdot L^3}{24 \cdot F_n^2} = L + \frac{p_m^2 \cdot L^3}{24 \cdot F_m^2} + \left(L + \frac{p_m^2 \cdot L^3}{24 \cdot F_m^2} \right) \cdot \left[\alpha \cdot (t_n - t_m) + \frac{F_n - F_m}{E \cdot S} \right] \quad (III.22)$$

При наклонени междустълбция, с ъгъл между точките на окачване ψ , уравнение (III.25) получава вида:

$$\frac{F_n}{E \cdot S} - \frac{p_n^2 \cdot L^2 \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot F_n^2} = \frac{F_m}{E \cdot S} - \frac{p_m^2 \cdot L^2 \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot F_m^2} - \alpha \cdot \cos \psi \cdot (t_n - t_m) \quad (III.26)$$

Ако при известния и търсения режим линейните товари са еднакви – тоест $p_m = p_n = p$, тогава уравнение (III.26) може да се представи във вида:

$$\frac{F_n}{E \cdot S} - \frac{p^2 \cdot L^2 \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot F_n^2} = \frac{F_m}{E \cdot S} - \frac{p^2 \cdot L^2 \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot F_m^2} - \alpha \cdot \cos \psi \cdot (t_n - t_m) \quad (III.27)$$

Прехвърляйки дясната част на уравнение (III.27) в ляво и умножавайки с „-1“ се получава:

$$\frac{F_m}{E \cdot S} - \frac{F_n}{E \cdot S} + \frac{p^2 \cdot L^2 \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot F_n^2} - \frac{p^2 \cdot L^2 \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot F_m^2} - \alpha \cdot \cos \psi \cdot (t_n - t_m) = 0 \quad (III.28)$$

Чрез съответни преобразования (III.28) се представя във вида:

$$\frac{(p \cdot L)^2 \cdot \cos^3 \psi}{24} \cdot \left(\frac{1}{F_n^2} - \frac{1}{F_m^2} \right) - \left(\frac{F_n - F_m}{E \cdot S} \right) - \alpha \cdot \cos \psi \cdot (t_n - t_m) = 0 \quad (III.29)$$

Тази форма на уравнението на състоянието ще бъде използвана по-надолу при определянето на ГПП.

1.2. Възприятия свързани с точката на пречупване в характеристиката на изменение на провеса в зависимост от температурата и математическа формулировка

Работата на ВТНП при ниски провеси е функция зависеща от три параметъра:

- Температурен коефициент на линейно разширение;
- Температурен коефициент на линейно разширение за ядрото на проводника;
- Температура при ГПП.

Ако конструкциите на тези нови ВТНП позволяват макар и минимално приплъзване между вътрешните и външните слоеве на проводника, без съществено съпротивление, то могат да се приемат следните три основни хипотези:

- a) Поради поддържането на теглото на проводника, вътрешните слоеве (стоманената сплав или композит) се подложени на механично напрежение във всяко работно състояние; функцията напрежение на опън-удължение за ядрото в зоната на еластичните удължения е линейна;
- b) Обратното, външните слоеве (алуминиевата сплав) не могат да работят при напрежение на натиск: наличието на механично усилие предизвикващо натиск върху външния слой ясно показва, че е започнал процес на разширяване и поради това, че за отделните нишки силата която им въздейства $F_B^{(t)}$ става нула.
- c) Аксиалното удължение на вътрешния и външния слой е винаги равно, тъй като опъвателните клеми на изолаторните вериги не позволяват приплъзване при нормална работа.

Възприемат се две допълнителни хипотези:

- d) Дължината на проводника в междустълбието е сума от следните три компоненти: удължението на проводника в междустълбието под действие на собственото му

тегло, еластичното удължение на проводника и удължението вследствие на температурно разширение; отчитайки равенство (III.6) втората и третата компоненти могат да се свържат със съответните компоненти за материалите формиращи ядрото, чието поведение е линейно;

- е) Силата в проводника F съответства на сумата от силите действащи върху външните слоеве F_B и ядрото $F_{я}$ – по равенство (III.4).

Тези допускания отговарят на следния математичен запис:

$$\frac{(p.L)^2 \cdot \cos^3 \psi}{24} \cdot \left(\frac{1}{F_{я}^2} - \frac{1}{F_0^2} \right) - \left(\frac{F_{я} - F_{я,0}}{E_{я} \cdot S_{я}} \right) - \alpha_{я} \cdot \cos \psi \cdot (t - t_0) = 0 \quad (III.30)$$

$$F = F_{я} + F_B ,$$

където:

p – линейен товар на проводника, N/m;

L – дължина на проводника, m;

ψ – ъгълът, сключен между хоризонталното и наклоненото междустълбие;

$F_{я}$ – сила действаща върху ядрото на проводника, при новия/търсения режим;

F_0 – сила действаща върху цялото сечение на проводника при известния режим;

$F_{я,0}$ – сила действащата върху ядрото на проводника при известния режим;

$E_{я}$ – модул на линейна деформация на ядрото на проводника, МРа;

$S_{я}$ – сечение на ядрото на проводника, mm²;

$\alpha_{я}$ – температурен коефициент на линейно разширение на ядрото на проводника, °C⁻¹;

t – температура при търсения режим, °C;

t_0 – температура при известния режим, °C.

Приемайки режим на ср.г. температура, отчитайки уравнение (III.6) със съответно преобразоване, уравнения (III.15) и (III.16) и вземайки предвид, че силата $F_B^{(t)}$ по дефиниция е равна на нула при температурата в ТПП, за ВТНП се получава:

$$\varepsilon_{я} = \frac{\Delta L_{я}^{(t)}}{L} = \varepsilon_B = \frac{\Delta L_B^{(t)}}{L} , \quad (III.31)$$

$$\Delta L_B^{(t)} = \alpha_B \cdot (t - t_{ср.г.}) \cdot L + \frac{F_B^{(t)} \cdot L}{E_B \cdot S_B} , \quad (III.32)$$

$$\Delta L_{я}^{(t)} = \alpha_{я} \cdot (t - t_{ср.г.}) \cdot L + \frac{F_{я}^{(t)} \cdot L}{E_{я} \cdot S_{я}} , \quad (III.33)$$

За относителното удължение на ядрото на проводника може да се запише следната зависимост:

$$\varepsilon_{я} = \frac{\Delta L_{я}^{(t)}}{L} = \frac{\alpha_{я} \cdot (t - t_{ср.г.}) \cdot L + \frac{F_{я}^{(t)} \cdot L}{E_{я} \cdot S_{я}}}{L} = \alpha_{я} \cdot (t - t_{ср.г.}) + \frac{F_{я}^{(t)}}{E_{я} \cdot S_{я}} \quad (III.34)$$

Същото, но за външния слой на проводника е:

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta L_B^{(t)}}{L} = \frac{\alpha_B \cdot (t - t_{\text{ср.г.}}) \cdot L + \frac{F_B^{(t)} \cdot L}{E_B \cdot S_B}}{L} = \alpha_B \cdot (t - t_{\text{ср.г.}}) + \frac{F_B^{(t)}}{E_B \cdot S_B} \quad (III.35)$$

При температурата в ТПП, външните слоеве на проводника, поради разширението си спират да поемат механични усилия ($F_B^{(t)} = 0$). Следователно в ТПП (III.35) има вида:

$$\varepsilon_B = \alpha_B \cdot (t_{kpt} - t_{\text{ср.г.}}) \quad (III.36)$$

Съгласно (III.31) двете относителни удължения са равни, следователно за ТПП се получава:

$$\alpha_{\text{я.}} \cdot (t_{kpt} - t_{\text{ср.г.}}) + \frac{F_{kpt}^{(t)}}{E_{\text{я.}} \cdot S_{\text{я.}}} = \alpha_B \cdot (t_{kpt} - t_{\text{ср.г.}}) \quad (III.37)$$

Преобразувайки (III.37) за температурата в ТПП се получава:

$$t_{kpt} = \frac{F_{kpt}^{(t)}}{E_{\text{я.}} \cdot S_{\text{я.}} \cdot (\alpha_B - \alpha_{\text{я.}})} + t_{\text{ср.г.}} \quad (III.42)$$

В равенство (III.42) неизвестни са както силата в ТПП $F_{kpt}^{(t)}$, така и температурата в ТПП t_{kpt} .

Целта е да се определи силата $F_{kpt}^{(t)}$, откъдето лесно ще може да се определи и температурата в ТПП t_{kpt} .

Чрез заместването на равенство (III.41) в уравнение (III.30) се получава уравнението за състоянието на проводника (УСП) при температурата в ТПП. За улеснение на записа $F_{kpt}^{(t)} = F_{kpt}$. Получава се:

$$\frac{(p \cdot L)^2 \cdot \cos^3 \psi}{24} \cdot \left(\frac{1}{F_{kpt}^2} - \frac{1}{F_{\text{ср.г.}}^2} \right) - \left(\frac{F_{kpt} - F_{\text{я.ср.г.}}}{E_{\text{я.}} \cdot S_{\text{я.}}} \right) - \alpha_{\text{я.}} \cdot \cos \psi \cdot \left(\frac{F_{kpt}}{E_{\text{я.}} \cdot S_{\text{я.}} \cdot (\alpha_B - \alpha_{\text{я.}})} \right) = 0 \quad (III.43)$$

ГЛАВА IV. МЕХАНИЧНО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ЕЛЕКТРОПРОВОДИ С ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ ПРОВОДНИЦИ – МЕТОДОЛОГИЧНИ ОСНОВИ

1. Изходна информация за прилагането на подхода за механично оразмеряване на електропроводи с високотемпературни нископровесни проводници

Всяко мрежово дружество определя максималната работна температура на проводниците, отчитайки няколко фактора. Това са:

- Необходимият вертикален габарит на въздушната линия спрямо земята и други съоръжения;
- Способността на даден тип проводник да работи при съответна температура без това да води до намаляване на допустимото напрежение на опън;
- Способността на даден тип проводник да работи при съответна температура без това да нарушава корозионната устойчивост на проводниците;
- Съвместимост/съгласуваност между допустимата температура на проводника и допустимата температура на арматурата и изолаторите.

Изходните условия (данни) при оразмеряването на новите проводници, чието отразяване осигурява надеждната работа на новопроектирания

електропровод с ВТНП и които са били използвани при проектирането на съществуващия електропровод с класически проводници, са:

- Климатичните условия на които е подложена електропроводната линия;
- Съществуваща стълбовна линия;
- Реализираните опъвателни полета, формиращи електропроводната линия;
- Специфични особености по трасето на съществуващия електропровод;
- Пресичания на въздушната линия с други инфраструктурни съоръжения.

2. Описание на подхода за механично оразмеряване на електропроводи с високотемпературни нископровесни проводници

Тук е обърнато основно внимание върху различията и допълненията към класическите постановки и възприятия свързани с оразмеряването на ВТНП.

Първото съществено допълнение, което трябва да се отчете при оразмеряването на тези нови проводници е именно определянето на температурата на самия проводник, в зависимост от максималната стойност на тока протичащ през него и климатичните условия, при които ще работи даден електропровод.

Два са математическите модели за определяне на температурата на проводниците при тяхната нормална работа, които са намерили най-широко приложение – това са моделът представен в Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE) Brochure 207 и моделът представен в Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) - Standard 738-2006.

И двата модела позволяват определянето на температурата на проводниците като статична (при разглеждане на моментни режими) и като динамично променяща се величина (при разглеждане на режими в течение на определен времеви интервал).

Сходствата и различията между моделите на CIGRE и IEEE са:

- И двата модела отчитат влиянието на атмосферните условия, включващи: посока и скорост на вятъра, температура на околната среда, слънчевата радиация. Използват различни математически зависимости (формули) за изчислението на температурата;
- Нагриването от слънцето се изчислява като се определя положението на слънцето в зависимост от часа и деня в годината. CIGRE използва сложен алгоритъм, включващ пряката, дифузната и отразената радиации;
- CIGRE използва корелации на Морган (Morgan), основани на числото на Нуселт (Nusselt) при определянето на охлаждането чрез конвекция, докато IEEE използва корелации на МакАдамс (McAdams) основани на числото на Рейнолдс (Reynolds).

За определянето на температурата на проводника в дисертацията е използван моделът предлаган от CIGRE Брошура 207. Описание на този модел е представено в приложение №3.

Съществен момент, на който е обърнато внимание, е определянето на температурата, над която механичното поведение на проводника започва да се определя от характеристиките на ядрото му. При изчислителните

процедури по оразмеряването на ВТНП, тази температура е от съществено значение.

3. Математически модел при механично оразмеряване на въздушни електропроводи с високотемпературни нископровесни проводници

Отчитайки изложеното и приспособявайки традиционния подход, при механичното оразмеряване на ВТНП е необходимо да се разгледа тяхната работа веднъж като класически – при работа с ниски температури, по-ниски от температурата в ТПП и веднъж като високотемпературни – когато температурата на проводника е по-висока от температурата в ТПП.

Тогава ясно се забелязва, че отправна точка при оразмеряването на този вид проводници се явява температурата в ТПП.

За да е коректно оразмеряването на тези проводници е необходимо при УСП да се дефинират двете механични поведения – веднъж когато проводника работи като класически комбиниран и веднъж когато поведението му е определено от параметрите на ядрото. Казаното тук води до следното:

Използват се уравнения (III.44), (III.53) и (III.42) за да се определи температурата в ТПП за конкретно опъвателно поле (приведено междустълбие). Използвайки тази температура, работата на проводника, а съответно и прилагането на УСП може да се раздели условно на две:

3.1. При режими на работа на електропровода, при които температурата на проводника е по-ниска от температурата в точката на пречупване.

Механичното поведение на проводника се диктува от параметрите на външния слой и ядрото – проводника работи като класически комбиниран проводник. Тогава за уравнение на състоянието чрез формула (III.26), при която се използва силата на опън в проводника и линейни товари може да се запише:

$$F_n - \frac{p_n^2 \cdot L^2 \cdot E_0 \cdot S_0 \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot F_n^2} = F_m - \frac{p_m^2 \cdot L^2 \cdot E_0 \cdot S_0 \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot F_m^2} - \alpha_0 \cdot E_0 \cdot S_0 \cdot \cos \psi \cdot (t_n - t_m) \quad (IV.5)$$

Отново чрез подходящи преобразования уравнение (IV.5) може да добие вида на уравнения (III.52) и (III.53) откъдето чрез метода на простата итерация да се определи силата при новия търсен режим – F_n .

Параметрите на известния и търсения режим задължително трябва да отговарят на условието температурата в проводника да е по-ниска от тази при ТПП.

3.2. При режими на работа на електропровода, при които температурата на проводника е по-висока от температурата в точката на пречупване.

Механичното поведение на проводника се диктува от параметрите единствено на ядрото – проводникът работи като високотемпературен. В уравнението на състоянието за известен изходен режим задължително се

приема режимът, при който настъпва ТПП, а за неизвесен режим – такъв с по-висока от тази температура. Формула (III.26), при която се използва силата на опън в проводника и линейни товари добива вида:

$$F_g - \frac{p_g^2 \cdot L^2 \cdot E_i \cdot S_i \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot F_g^2} = F_{kpt} - \frac{p_{kpt}^2 \cdot L^2 \cdot E_i \cdot S_i \cdot \cos^3 \psi}{24 \cdot F_{kpt}^2} - \alpha_i \cdot E_i \cdot S_i \cdot \cos \psi \cdot (t_g - t_{kpt}) \quad (IV.6)$$

Обикновено при тази формулировка се проверяват реализираните габаритни отстояния, които са свързани с режими на работа, дефинирани с товари от собствено тегло. Тогава $p_{kpt} = p_g$. Задължително условие за коректността на постановката е $t_g > t_{kpt}$.

ГЛАВА V. СРАВНЕНИЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ПРИ МЕХАНИЧНО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ВЪЗДУШНИ ЕЛЕКТРОПРОВОДНИ ЛИНИИ ЧРЕЗ ПРОГРАМЕН ПРОДУКТ PLS-CADD И ПОСРЕДСТВОМ ПРЕДЛОЖЕНИЯ В ГЛАВА ЧЕТВЪРТА МЕТОД

В тази глава се изследва характеристиката на изменение на провеса при изменение на силата на опън за различни конструкции ВТНП, при използване на програмен продукт PLS-CADD и подхода предложен в предходната глава на дисертационния труд. Анализирани са разликите, които се получават в определения провес. Отново е използван участъка от въздушен електропровод 110kV посочен на чертеж №П6.1.

PLS-CADD е не само изключително полезен инструмент при проектирането на нови електропроводни линии, но и много мощно средство за анализ на съществуващи такива. Възможностите и функциите на PLS-CADD значително повишават производителността на всички специалисти, участващи в проектирането на въздушни линии. PLS-CADD позволява на проектантите бързо да оценяват различни електромеханични решения. Това също така е идеално учебно средство, с което ясно могат да бъдат демонстрирани нови концепции.

PLS-CADD е разработен в съответствие не само с американските норми за проектиране, но и с други международни стандарти като IEC 2003; CENELEC 2001 и др.

PLS-CADD позволява използването на хиперболични или приблизителни параболични зависимости по отношение на изчислителните процедури, свързани с определянето на силата на опън, провеса и дължината на проводника. По-долу са дадени математическите формулировки на тези зависимости, използвани от програмата.

В предложения в глава четвърта подход за оразмеряване на ВТНП са използвани приблизителните параболични уравнения за определянето на силата на опън в проводника, неговия провес и дължина в опъвателното поле.

Построяването на провесните криви по междустъблия, при използването на програмата PLS-CADD и предложения в тази дисертация модел са дадени на чертеж №7.1.

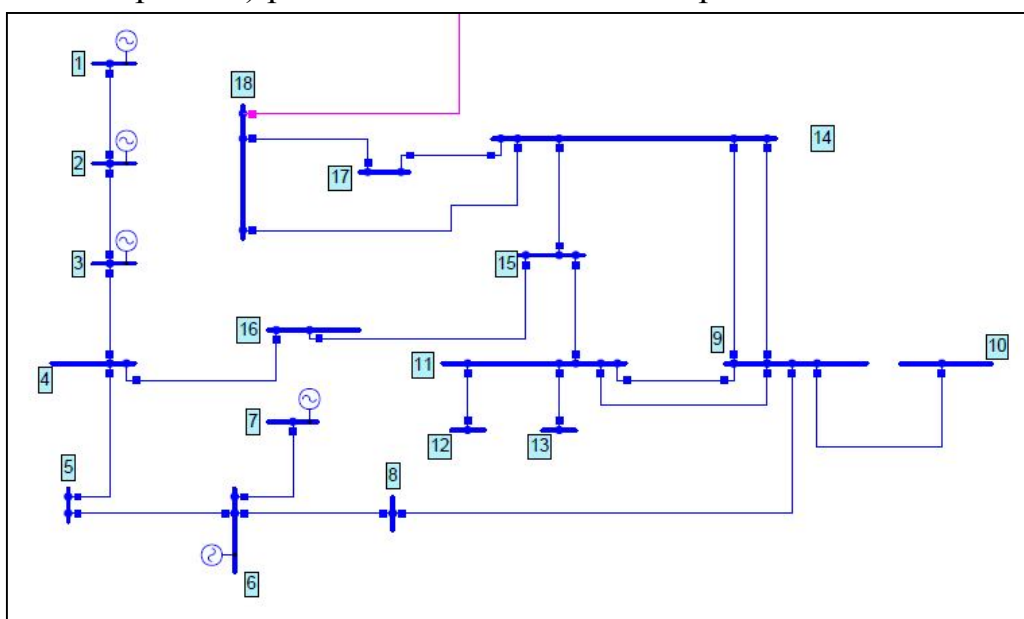
Получените резултати и анализи са в приложение №7 към дисертацията.

ГЛАВА VI. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВАРИАНТИ ЗА РАЗВИТИЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ НИСКОПРОВЕСНИ ПРОВОДНИЦИ

Използването на ВТНП в преносната мрежа може да подобри работата на ЕЕС. Както е описано и в глава втора от настоящата работа основното им предимство е тяхната способност да работят продължително при високи температури без това да води до прекомерното им провисване и нарушаване на електромеханичните им показатели. Чрез вискотемпературните нископровесни проводници се повишава температурната устойчивост на електропроводната линия. Използването на тези проводници може да бъде добра алтернатива при реконструкцията на електропроводи, при които ограничението на преносната способност се диктува от допустимото нагряване. В случаите когато има ограничения, определени от критериите за сигурност, ВТНП не винаги са подходящи.

1. Изследвани варианти на развитие на преносната електрическа мрежа

Представен е подход за определяне на оптимално решение за развитие на регионални мрежи 110kV чрез вариантно изследване въз основа на критерия за условни годишни разходи. Този критерий представлява класически статичен метод за икономическа оценка на инвестиционния процес. Освен с този критерий различните варианти за развитие на мрежата са оценени икономически и чрез динамичен метод – този на нетната настояща стойност (Net Present Value). Като илюстративна мрежа е използвана реална регионална мрежа – част от националната ни ЕЕС, дадена на фигура 22. Резултати за мощностните баланси за определения изходен (преди присъединяване на новите производители и при съществуващото състояние на мрежата) режим на максимални товари са дадени в таблица 6.



Фигура 22. Илюстративна регионална мрежа - част от ЕЕС на РБ. Тази мрежа е използвана като пример в приведените изследвания и анализи.

Моделирането на регионалната мрежа 110kV, определянето на режимните параметри при всеки от разгледаните варианти и систематизирането на получените резултати е извършено с помощта на софтуерен продукт NEPLAN.

За определянето на температурата на проводниците за гореописаните електропроводи е използвана методиката на Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE), касаеща термичното повлияване на проводниците при тяхната нормална работа – моделирана в приложение №4 от глава четири на дисертационния труд. В приложение №4 е използван математическия модел за определяне на температурата на проводника при установени режими. Участват следните параметри:

- Слънчева радиация – 900W/m^2 ;
- Скорост на вятъра – $0,6\text{m/s}$;
- Ъгъл на атака на вятъра спрямо проводника - 45° ;
- Температура на околната среда - 40°C ;
- Абсорбционна способност на повърхността на проводника – $0,5$;
- Плътност на въздуха за конкретния район – $1,00\text{kg/m}^3$;
- Плътност на въздуха на морското равнище – $1,225\text{kg/m}^3$.

Съгласно методиката, при определяне на температурата на проводника участват и параметри свързани с неговите електромеханични показатели. Те са:

- Външен диаметър на проводника, mm;
- Вътрешен диаметър на проводника, mm;
- Диаметър на жичката на външния слой, mm;
- Стойност на активното съпротивление на километър, Ω/km – задава се стойността при производствена температура (обикновено 20°C);
- Големина на тока протичащ през проводника, A.

Разглежда се постановка, при която в два от възлите No4 и No16 на регионалната мрежа се присъединяват нови производствени мощности от ВИ, съответно 70MW и 50MW. Факторът на мощността $\cos\phi$ е приет за постоянен и е със стойност 0,9.

Предлаганите и оценени варианти за примерната мрежа са следните:

1. Конструкцията и топологията на мрежата не се изменят. Посъщественото нарастване на УГР се получава от разходи по ограничаване на производството на ВИ (плащане на неустойки при невъзможност за пренасяне на енергията) за да не се допусне претоварване на съществуващата мрежа.
2. Изграждане на паралелни електропроводи на тези, които ще се претоварват при новите условия. В този случай нараства капиталовата съставка на УГР поради учредяване на допълнителни сервитутни площи и изграждане на паралелни ЕП, но намалява оперативната съставка на УГР (намалени загуби, поради два пъти по-малко съпротивление, въпреки повишението на продължителността на максималните загуби на мощност).

3. Изграждане на двойни електропроводи (две тройки на стълб) по съществуващите трасета на единичните електропроводи, които ще се претоварват при новите условия. Тук нараства капиталовата съставка на УГР – има частично учредяване на допълнителни сервитутни площи, поради по-големите хоризонтални габаритни отстояния, проектира се и се изгражда електропровод с нови по-тежки стълбове, съществуващият електропровод се демонтира (проводници, фундаменти и стълбове). Намалява се оперативната съставка на УГР (намалени загуби, поради два пъти по-малко съпротивление, въпреки повишението на продължителността на максималните загуби на мощност).
4. Реконструкция на съществуващите електропроводи, които ще се претоварват при новите условия. Тези електропроводи ще се изградят за работа с проводник АСО-400. Капиталовата съставка на УГР нараства – проектира се и се изгражда електропровод с нови по-тежки стълбове, използват се нови по-тежки проводници, съществуващият електропровод се демонтира (проводници, фундаменти и стълбове). Намалява се оперативната съставка на УГР (намалени загуби поради по-малко съпротивление).
5. Монтаж на високотемпературни нископровесни проводници на тези електропроводи, които ще се претоварват при новите условия. Тук нараства капиталовата съставка на УГР поради закупуването и монтажа на новите проводници и частичната подмяна и усилване на съществуващите стълбове. Увеличена е и оперативната съставка на УГР (поради повишените потоци, които се пренасят без ограничаване и повишаването на съпротивлението на проводника поради по-високата му температура, повишаването на часовата използваемост, съответно нарастнала продължителност на максималните загуби на мощност).

2. Резултати и анализи

Резултатите и анализите са основани на възможните варианти на развитие на мрежата след присъединяването на производителите от ВИ, представени в т. 1 от тази глава.

От таблица 9 се вижда, че е необходимо да се изследват възможностите за развитие на мрежата във връзка с преодоляване на претоварванията при отпадане на електропроводите 4 – 5 (№ 1 от таблица 9); 15 – 16 (№ 8 от таблица 9) и 4 – 16 (№ 9 от таблица 9).

Таблица 9. Резултати от проверка по критерий N-1 на регионалната мрежа след присъединяване на новите производители от ВИ.

№	Отпаднал елемент (електропровод)	Нарушени граници	Претоварени елементи (електропроводи)
1	4 - 5	Да	15 – 16
2	5 - 6	Не	-

3	6 - 8	Не	-
4	8 - 9	Не	-
5	9 ¹ - 11 ¹	Не	-
6	9 ² - 11 ²	Не	-
7	11 - 15	Не	-
8	15 - 16	Да	4 – 5
			5 – 6
9	4 - 16	Да	4 – 5

Таблица 12. Обобщени резултати за всеки от изследваните варианти за развитие на регионалната мрежа.

No	Характеристика на варианта	Постоянни разходи, хил. лв./год.	Оперативни разходи, хил. лв./год.	Неустойки, хил. лв./год.	УГР, хил. лв./год.	ΔУГР, хил. лв./год.	
0.	Съществуващо състояние	89,367	433,024	-	522,392	-	
1.	Без развитие на мрежата – ограничаване на ВИ. Вариант 1.	89,367	1791,200	2635,000	4515,567	3993,175	
2.	Реконструкция с паралелни електропроводи. Вариант 2.	2322,925	1360,347	-	3683,272	3160,88	
3.	Реконструкция с двойни електропроводи. Вариант 3.	2771,969	1339,472	-	4111,441	3589,049	
4.	Реконструкция с проводник АСО-400. Вариант 4.	2191,980	1317,438	-	3509,418	2987,026	
5.	Реконструкция на мрежата с използване на високотемпературни нископровесни проводници	ZTACIR-19.04 Подвариант 5.1	1167,241	2251,589	-	3418,83	2896,438
		АССС – Copenhagen Подвариант 5.2	1261,328	1821,914	-	3083,242	2560,85

Вижда се, че най-малка стойност на оперативната съставка на УГР има вариантът с реконструкция на съществуващите електропроводи с използване на класически проводник АСО-400 – вариант 4. Най-голяма компонента по отношение на необходимите капитални вложения има вариант 3, при който се предвижда изграждане на двойни електропроводи на местата на съществуващите. При вариант 1, при който се ограничават производителите, не се налагат капиталовложения за развитие на мрежата. Поради заплащаните неустойки обаче, това е най-неблагоприятният вариант, имащ най-голяма стойност на нарастването на условните годишни разходи.

В таблица 23 са поместени обобщените резултати за всеки от изследваните варианти.

Таблица 23. Обобщени резултати за всеки от изследваните варианти за развитие на регионалната мрежа – при прилагане на метода на нетна настояща стойност.

No	Характеристика на варианта	Икономия на ел. енергия, MWh./год.	Необходими инвестиции, хил. лв./год.	Нетна настояща стойност, хил. лв.	NPV / Ки	
1.	Реконструкция с паралелни електропроводи. Вариант 1.	18 034,43	13 138,57	10 606,51	0,81	
2.	Реконструкция с двойни електропроводи. Вариант 2.	18 157,22	16 305,70	3 862,03	0,24	
3.	Реконструкция с проводник АСО-400. Вариант 3.	18 286,84	12 894,00	12 906,04	1,00	
4.	Реконструкция на мрежата с използване на високотемпературни нископровесни проводници	ZTACIR-19.04 Подвариант 4.1	12 791,83	6 866,12	14 114,89	2,06
		АССС – Copenhagen Подвариант 4.2	15 319,33	7 419,58	19 005,16	2,56

Както се забелязва от таблица 23 най-голяма икономия на електрическа енергия се постига, ако се реализира вариант 3, при който претоварващите се електропроводи съгласно критерий N-1 се реконструират с проводници АСО-400. Тази реконструкция обаче изисква съществени капитални вложения. Необходимите инвестиции са с приблизително 21% по-малки от вариант 2, който е с най-големи капитални вложения – изграждане на двойни електропроводи на местата на претоварващите се съществуващи.

Икономически най-ефективен е вариантът с използване на ВТНП – подвариант 4.2. При него отношението на нетната настоящата стойност към инвестицията е най-добро – 2,56. Необходимите инвестиции за реализирането му са с 8% по-големи от тези за подвариант 4.1 и представляват около 45% от необходимите инвестиции за най-скъпия вариант 2.

Ако се разгледат класическите варианти за развитие на мрежата (тоест без използването на високотемпературни проводници) най-целесъобразен е вариант 3, при който се използват неизолирани проводници АСО-400.

ГЛАВА VII. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА ПРОМЕНИ В ДЕЙСТВАЩАТА КЪМ МОМЕНТА НОРМАТИВНА УРЕДБА ВЪВ ВРЪЗКА С ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИТЕ НИСКОПРОВЕСНИ ПРОВОДНИЦИ

В тази глава е разгледана действащата в момента нормативна уредба, имаща отношение към механичното оразмеряване на въздушни електропроводни линии.

От описаните в приложение №8 нормативни документи особено внимание е обърнато на Наредба №3 за УЕУЕЛ, тъй като в този документ са ясно регламентирани принципите, които задължително се спазват при оразмеряването на въздушни линии, дадени са свързаните с това области на приложение, определения и дефиниции, нормативни ограничения и изисквания.

В тази глава са дадени предложения за актуализацията на Наредба №3 за УЕУЕЛ, така че характерните особености свързани с тези нови конструкции проводници да бъдат адекватно нормирани. Залегналите в тази наредба изисквания при механичното оразмеряване на класическите проводници трябва да бъдат запазени. Високотемпературните нископровесни проводници намират приложение при въздушните електропроводи СрН и ВН.

Първият съществен раздел, когато става въпрос за ВТНП е раздел III – изчислителни климатични условия. В този раздел са указани приетите изчислителни температури – чл. 552. Дефинирани са като минимална температура -30°C и максимална със стойност $+40^{\circ}\text{C}$. От чл. 553 до чл. 556 са нормирани режимите за оразмеряване на въздушни електропроводи по механични показатели. За всеки от тези оразмерителни режими температурата с която се изчислява механичното поведение на проводника варира в границите дадени в чл. 552.

Когато се разглежда механичното оразмеряване на въздушни електропроводни линии при използване на ВТНП нормираните в горните членове температури не могат да бъдат еднозначно възприети като температури на проводниците. Използването на високотемпературни проводници предполага продължителна работа с температури над 100°C . За да се отчете спецификата при работата на този тип проводници е необходимо да се добави нов текст (член), чрез който да се зададе подхода за определяне на температурата на проводниците. В дисертационният труд са разгледани стандартите намерили най-широко приложение в тази област – това са моделът представен в Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE) Brochure 207 и моделът представен в Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) - Standard 738-2006. В предлагания нов текст от наредбата трябва да се направи препратка към някой от тези методи.

НАУЧНИ, НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Научен принос

Предложен е цялостен подход за механично оразмеряване при използване на високотемпературни нископровесни проводници.

Този подход отразява специфичните особености свързани с работата на тези нови конструкции проводници: работа с много по-висока температура от тази на околната среда; токопроводящите слоеве на проводниците имат много по-ниски стойности на якостта на опън спрямо ядрата им; съществени различия между ядрото и токопроводящите слоеве и по отношение на температурния коефициент на линейно разширение; желателно е температурата, при която механичното поведение на проводника започва да се диктува от характеристиките на ядрото, да бъде възможно най-ниска.

2. Научно-приложни приноси

2.1. Предложение на начин за определяне на температурата на проводниците при тяхната нормална работа.

В досегашната практика при механично оразмеряване на въздушни електропроводи се е считало, че приемането за работа на проводниците при температури еднакви с тези на околната среда осигурява достатъчна точност на получаваните оценки. Използването на ВТНП обаче налага изменение в това възприятие. Дисертационния труд предлага начин за определяне на температурата на ВТНП, основаващ се на този, предлаган от CIGRE.

2.2. Предложена е методика за определяне на точката на пречупване в характеристиката на изменение на провеса в зависимост от температурата.

Предлаганата методика дава възможност за определяне на температурата, при която токопроводящите слоеве на проводниците, поради по-високия си температурен коефициент на линейно разширение спират да поемат механични усилия. Тя може да се използва при изследвания, свързани с механичното оразмеряване на въздушни електропроводи, като дава възможност да се установява действителният механичен режим на различните комбинирани проводници нагreti до високи температури.

2.3. Разработен и привнесен в българската научна общност сравнителен анализ на най-широко разпространените високотемпературни нископровесни проводници.

Анализирани са основните използвани към момента конструкции ВТНП – представени и сравнени са техните електромеханични характеристики и показателите на новите материали, използвани за направата на токопроводящите сечения и тези, използвани за направата на ядрата на проводниците. Тази информация е основна при предварителна оценка за преимуществата и недостатъците на даден високотемпературен проводник спрямо използвани класически, както и при изчисления за определяне на планираните режими на ЕЕС.

3. Приложни приноси

Предложени изменения в действащата към момента Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии в частта, разглеждаща въздушни електропроводи с напрежение над 1000V.

3.1. Допълнение, относно проектирането на електропроводи с високотемпературни нископровесни проводници, чрез което да се регламентира използване на методика за определяне на действителната температура на проводниците, вместо да се използва температурата на околната среда. Може се да направи препратка към методиките на CIGRE Brochure 207 и IEEE Standard 738-2006 или да се предложи оригинална методика, съобразена със спецификата на нашата ЕЕС;

3.2. Допълнение, относно проектирането на електропроводи с високотемпературни нископровесни проводници, чрез което да се регламентира при определянето на максималния провес да се сравняват режим на максимална температура (получава се при отчитане на нагриването на проводника от действието на максималния електрически ток) и режим на максимален вертикален товар;

3.3. Допълнение, относно проектирането на електропроводи с високотемпературни нископровесни проводници, чрез което да се регламентират коректно условията при взаимно пресичане на въздушни електропроводи, когато пресичащият е с високотемпературни проводници.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Николов Н., Стоилов Д., Механично оразмеряване на електропроводи с високотемпературни проводници: част I – методологични основи, Годишник на Технически Университет – София, том 67, книга 1, стр. 23-32, 2017г., ISSN 1311-0829
2. Николов Н., Стоилов Д., Механично оразмеряване на електропроводи с високотемпературни проводници: част II – математичен модел, Годишник на Технически Университет – София, том 67, книга 1, стр. 33-42, 2017г., ISSN 1311-0829
3. Николов Н., Методика за определяне на точката на пречупване в характеристиката на изменение на провеса в зависимост от температурата на проводниците, сп. Енергетика, брой 1, стр. 45-52, 2017г., ISSN 0324-1521
4. Николов Н., Стоилов Д., Изследване на варианти за развитие на мрежи 110kV при използване на високотемпературни нископровесни проводници, сп. Енергетика, брой 2, стр. 29-48, 2017г., ISSN 0324-1521
5. Nikolov N., Stoilov D., Comparison of the conductors' mechanical mode calculations using different mathematical models, Proceedings of ELMA IEEE Conference, pp. 339-347, 2017, ISBN 978-1-5090-6690-2.

SUMMARY

Nikola Nedelchev Nikolov, MS in Electrical Engineering

THEORETICAL ASPECTS WHEN USING HIGH TEMPERATURE LOW SAG CONDUCTORS

The general purpose of the PhD thesis is to develop a comprehensive methodology for the mechanical design of overhead power lines using high temperature low sag conductors.

Such a methodology does not exist for the Bulgarian power system. The provisions of the existing ordinance for construction of power lines are not applicable to the HTLS conductors. The results from the application of these provisions, visible from the already reconstructed power lines when using the HTLS, are unsatisfactory. The developed new methodology reflects the specificities associated with the operation of these new conductors: working with a much higher temperature than the ambient one; conductive layers have much lower tensile strengths than that of the cores; significant difference in modulus of elasticity between the core and the conductive layers and the coefficient of thermal expansion; it is desirable that the temperature at which the mechanical behavior of the conductor starts to be determined by the characteristics of the core is as low as possible.

MAIN SCIENTIFIC CONTRIBUTIONS OF THE DISSERTATION

A comprehensive approach is proposed for mechanical design using high temperature low sag conductors.

Suggestion about the determination of the temperature of the conductors in their normal operation mode.

A methodology is proposed for determining of the thermal knee-point of conductors.

A comprehensive analysis of the most common high temperature low sag conductors is elaborated and introduced to the Bulgarian scientific community.

A supplement concerning the design of the overhead power lines with high temperature low sag conductors establishing the use of a method for determination of the actual temperature of the conductors instead of using the ambient temperature.

A supplement concerning the design of the overhead power lines with high temperature low sag conductors establishing obligatory comparison of the sag in maximum temperature mode (during highest electrical loading) and maximum vertical load mode, aiming at determination of the maximum sag mode.

A supplement concerning the design of the overhead power lines with high temperature low sag conductors establishing correct conditions for the intersection of overhead power lines when the upper one is with high temperature low sag conductors.