

АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

И.В. Белицын

Алтайский государственный технический университет

им. И.И.Ползунова

e-mail: b_i_w@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования электромагнитного поля, создаваемого различными техническими объектами, в том числе и воздушными линиями электропередачи. Предложен и обоснован аналитико-имитационный метод моделирования электромагнитного поля, и для него представлена классификация внешних воздействий на моделируемую систему. Приведены модели для таких внешних воздействий, как солнечная радиация (прямая и рассеянная) на поверхность провода, а также ветровые гололедные нагрузки.

Ключевые слова: электроустановка высокого напряжения, система, аналитико-имитационное моделирование, классификация, внешние воздействия, ветровые нагрузки, гололедные нагрузки, солнечная радиация.

Одним из видов электроустановок являются воздушные линии электропередачи (ВЛЭП), предназначенные для передачи и распределения электрической энергии. При проектировании ВЛЭП важным является расчет механической части воздушных линий, а именно, расчет проводов и тросов при нормальных режимах работы линии. Исходными данными для такого расчета являются различные сочетания климатических условий: температуры окружающей среды, скорости ветра, толщины стенки гололеда. На сегодняшний день выделяют пять сочетаний климатических условий. Выходными данными являются механическое напряжение материала провода и тросов, и их стрел провесов.

При эксплуатации ВЛЭП создает электромагнитное поле (ЭМП), параметры которого зависят от длины пролета и стрелы провеса проводов и тросов, которые в свою

очередь зависят от механических напряжений в них, а также от опор в зависимости от их материала и вида. В случае эксплуатации ВЛЭП напряжением выше 110 кВ высокая напряженность электрического поля может приводить к возникновению коронного разряда и как следствие потерям электроэнергии. ЭМП влияет на объекты, находящиеся в непосредственной близости к ВЛЭП и поэтому требуется всесторонне исследование.

Для исследования любой технической системы (объекта исследования) можно использовать методологию исследования на основе системного подхода, которая схематично представлена на рисунке 1.

В нашем случае объектом исследования являются электроустановки высокого напряжения, а предметом исследования - электромагнитное поле, создаваемое ВЛЭП. Выходными параметрами являются характеристики эллиптически поляризованного электрического и магнитного поля, а именно, действующие и максимальные значения напряженностей электрического и магнитного поля, как за один период колебания тока промышленной частоты, так и вдоль большей полуоси эллипса поляризации, а также коэффициент поляризации.

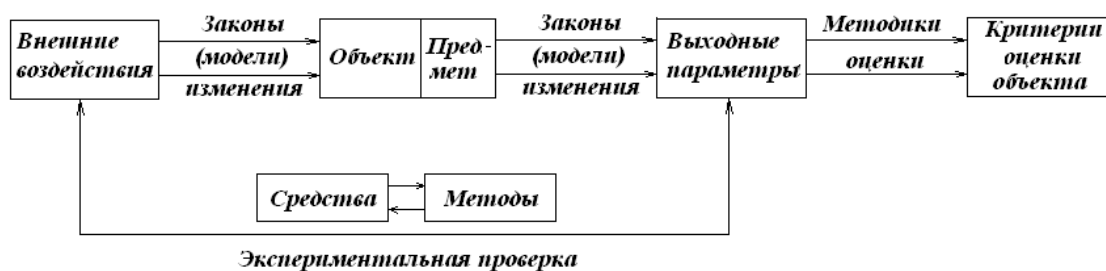


Рисунок 1 - Общая методология исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить широкий круг задач. Одна из которых, разработка моделей, методик, алгоритмов определения внешних воздействий на объект исследования.

Поскольку целью является получение не только численных значений, но и оценки рассеяния выходных параметров (Y) при заданных параметрах рассеяния (X), причем причинами рассеяния параметров могут быть как нестабильность внешних факторов (воздействий), так и случайность и разброс внутренних параметров, то необходимо определить, каким образом мы будем исследовать ЭМП ВЛЭП. Классификация видов и методов моделирования систем [1] приведена на рисунке 2. В качестве метода модели-

рования было выбрано комбинированное (аналитико-имитационное) которое позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования.

Метод аналитико-имитационного моделирования - процесс конструирования модели реальной системы и постановки экспериментов с целью либо понять поведение системы. Он используется для оценки вариантов структуры системы, влияния изменения различных параметров системы, и может быть положен в основу структурного, алгоритмического и параметрического синтеза систем при требовании создать систему с заданными характеристиками при определенных ограничениях, при этом система должна быть оптимальной по некоторым критериям.

При построении комбинированных моделей на первом этапе производится декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие подпроцессы, и для тех из них, где это возможно, используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели.

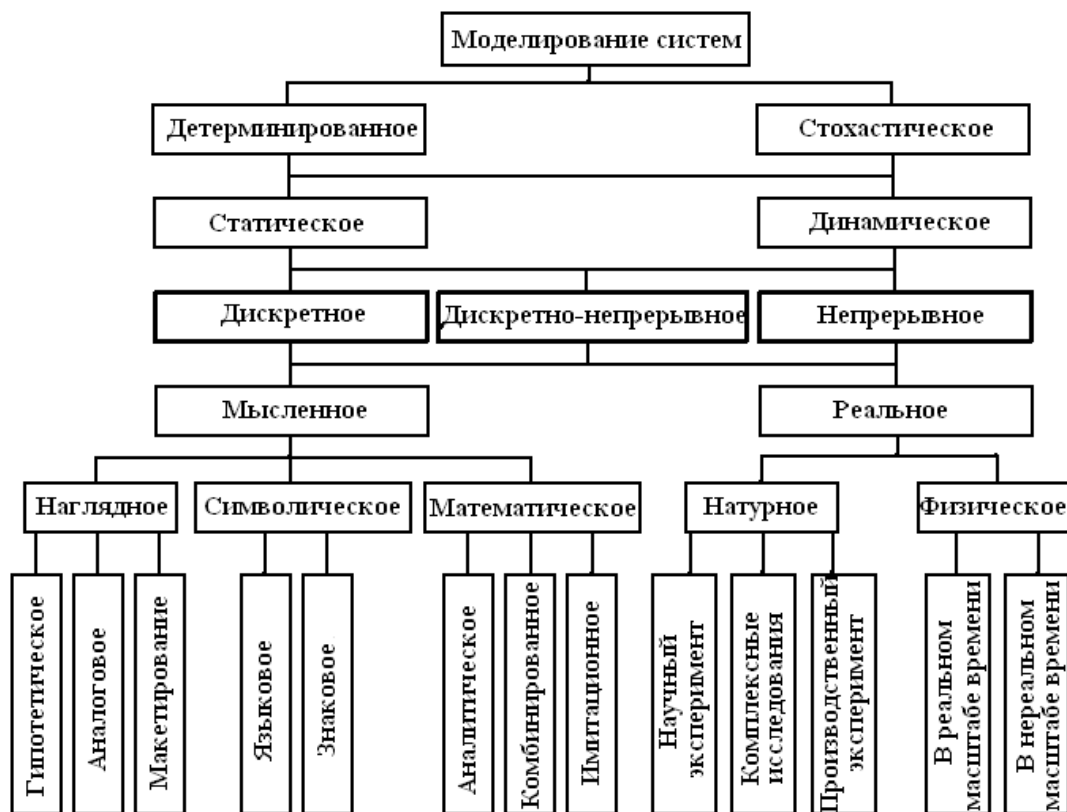


Рисунок 2 – Классификация видов моделирования систем

Для подпроцессов воздействия внешних воздействий на объект исследования целесообразно использовать имитационное моделирование, поскольку с помощью машин-

ной имитации исследуются характеристики процессов функционирования систем, подверженных случайным воздействиям.

Для проверки адекватности разработанных моделей, для определения параметров ЭМП необходимо использовать физическое моделирование в реальном масштабе времени, которое проводится на установках высокого напряжения, которые сохраняют природу явлений.

Существуют два подхода к имитационному моделированию:

- метод наихудшего случая
- метод статистических испытаний.

Метод наихудшего случая позволяет получить диапазон возможного рассеяния выходных параметров без оценки плотности распределения этого рассеяния, при этом известны только допуски, определить самые неблагоприятных значений Y . При этом он дает грубую и завышенную оценку. Достоинствами являются: простота реализации, малые вычислительные затраты, не требуются законы распределения, только отклонение ΔX .

Именно метод наихудшего случая лежит в основе [2, 3], т.е. расчетные значения механических нагрузок определяются по заданной вероятности их неперевышения при наиболее неблагоприятных сочетаниях нагрузок. При этом необходимо рассматривать основные и особые сочетания нагрузок. Для учета климатических нагрузок, под которыми понимается давление ветра на провода и опоры, а также масса и размеры гололедных отложений, действующие в различных сочетаниях, с точки зрения повышения надежности ВЛЭП [4, 5], также активно разрабатывается метод наихудшего случая. Благодаря такому подходу, в новой редакции ПУЭ-7 расчетные климатические нагрузки определяются по нормативным климатическим нагрузкам путем введения коэффициентов: по ответственности, по надежности, регионального, по условиям работы. Это приводит к тому, что увеличивается период повторяемости климатических нагрузок. Такой подход приемлем и должен быть использован при расчетах связанных с механической прочностью ВЛЭП, поскольку при однократном превышении действительных климатических нагрузок расчетных может произойти авария – выход из строя ВЛЭП, и как следствие, перерыв электроснабжения потребителей. Однако, при расчетах связанных с определением параметров ЭМП, создаваемой ВЛЭП, это приводит к определению максимальных (завышенных) значений параметров ЭМП, которое ВЛ будет иметь

1 раз в 25 лет, а с учетом коэффициентов период повторяемости может увеличиваться до 36 и более лет.

Следует так же учитывать, что наименьшие расстояния от проводов ВЛ до поверхности земли в населенной местности в нормальном режиме работы ВЛ должны приниматься для ВЛ 330 кВ и выше по интенсивности электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля, создаваемого ВЛ при максимальных рабочих параметрах (напряжении и токе). Поэтому сложившийся на практике климатологических исследований подход для аппроксимации эмпирических функций распределения экстремальных значений метеорологических величин на основе распределений Гумбеля, Фишера-Типпетта, Вейбулла и двухэкспоненциальным трехпараметрическим распределением [6], не может быть использован для определения климатических нагрузок, необходимых для определения параметров ЭМП.

Метод статистического моделирования испытаний позволяет получить более полные статистические данные по общему алгоритму [7]:

- задание случайной величины X_i по заданному закону распределения.
- расчет Y_i при заданных X_i путем анализа;
- накопление статистики;
- построение гистограмм, обработка.

Однако, для этого необходимы полные данные о статистических параметрах X , поэтому первой задачей является классификация параметров рассеяния (X) как внешних воздействий, так и внутренних параметров.

Классификация параметров рассеяния. Анализ литературных данных показал, что в настоящее время нет общепринятой классификации внешних механических, климатических воздействий, так и внутренних электрических, механических параметров влияющих на ЭМП ВЛЭП. Для решения этой задачи можно использовать подход, предложенный в строительстве [2] или проектировании контактных электрических сетей [3], согласно этому подходу механические нагрузки на объекты принято разделять в зависимости от продолжительности действия на постоянные и временные (длительные, кратковременные, особые). На основе такого подхода можно предложить классификацию внешних воздействий представленную в таблице 1.

Математическая модель ветра может быть представлена в виде случайного двумерного вектора со следующими параметрами [8]:

Таблица 1 - Классификация параметров рассеяния, как внешних воздействий, так и внутренних параметров

Постоянным	Временные		
	длительные	кратковременные	особые
<p>а) вес проводов, изоляторов, арматуры сети;</p> <p>б) вес строительных конструкций опорных, поддерживающих, фиксирующих и анкерочных устройств;</p> <p>в) вес грунта (при расчете фундаментов опор);</p> <p>г) нагрузка от проводов некомпенсированных (при среднегодовой температуре) и компенсированных;</p> <p>д) тип опор;</p> <p>е) длина пролета.</p>	<p>а) температурные технологические воздействия от нагрева проводников;</p> <p>б) воздействия, обусловленные изменением влажности;</p> <p>б) воздействия, вызванные передаваемой мощностью (напряжение и ток ЛЭП);</p> <p>г) солнечная радиация (прямая и рассеянная) на поверхность провода;</p> <p>д) механические характеристики проводов и тросов.</p>	<p>а) температурные климатические воздействия с полным нормативным значением (экстремальные значения);</p> <p>б) ветровые нагрузки давление ветра на провода, кабели, тросы и другие конструкции;</p> <p>в) гололедные нагрузки вес гололеда на проводах, поддерживающих и фиксирующих устройствах; вес гололеда на жестких перечинах; вес снегового отложения на ригелях жестких поперечин;</p> <p>г) вес монтера с инструментом на проводах или конструкциях;</p> <p>д) режим однофазного замыкания на землю в сетях с изо-</p>	<p>а) нагрузки, вызываемые резкими нарушениями технологического процесса, временной неисправностью или поломкой оборудования; (перенапряжения как внутренние так и внешние, короткие замыкания всех видов);</p> <p>б) нагрузки, возникающие при обрыве проводов контактной сети;</p> <p>в) сейсмические воздействия;</p> <p>г) нагрузки, возникающие при падении опоры.</p>

		лированной нейтралью; е) облачность; ж) осадки в виде дождя.	
--	--	--	--

1. Средним результирующим вектором \bar{v}_r , определяемым по двум ортогональным составляющим \bar{u}_x и \bar{u}_y

2. Среднеквадратичными отклонениями σ_x и σ_y

3. Коэффициентом корреляции между составляющими скоростями ветра r .

Тогда модуль результирующего вектора

$$v_r = \sqrt{\bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2} \quad (1)$$

Направление результирующего вектора

$$\Theta = \arctg\left(\frac{\bar{u}_x}{\bar{u}_y}\right) \quad (2)$$

Векторное квадратичное отклонение для описания меры рассеяния отдельных векторов относительно результирующего.

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3)$$

Тогда плотность вероятности нормального распределения вектора \bar{v}

$$f(v) = f(u_x, u_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y(1-r^2)^{1/2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left[\frac{(u_x - \bar{u}_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2r(u_x - \bar{u}_x)(u_y - \bar{u}_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(u_y - \bar{u}_y)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \quad (4)$$

Отклонение векторов скорости характеризуется вектором $\bar{v} - \bar{v}_r$. Вектора $\bar{v}_i - \bar{v}_r$ занимают площадь, которая может быть либо эллипсом, либо кругом.

Вытянутость эллипса рассеяния определяется параметром эллиптичности

$$L = \frac{2\sigma_x\sigma_y(1-r^2)^{1/2}}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (5)$$

В случае, если $\sigma_x = \sigma_y$, рассеяние будет круговым. Радиус круга при вероятности попадания в него, равной P ,

$$R = \sigma_r \sqrt{\ln \frac{1}{1-P}} \quad (6)$$

Также может применяться закон нормального кругового распределения

$$f(v) = \frac{1}{\pi \sigma_r^2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma_r^2} [c_r^2 + c^2 - 2cc_r \cos(\varphi - \Theta)] \right\}, \quad (7)$$

$$f(c) = \frac{2c}{\sigma_r^2} \exp \left\{ -\frac{c^2 + c_r^2}{\sigma_r^2} I_0 \left(\frac{2cc_r}{\sigma_r^2} \right) \right\}, \quad (8)$$

$$f(\varphi) = \frac{e^{-\lambda^2}}{2\pi} \left\{ 1 + \sqrt{\pi} y e^{-y^2} [1 + \Phi(y)] \right\}. \quad (9)$$

где $f(v)$, $f(c)$ и $f(\varphi)$ - плотности распределения вектора скорости ветра, модуля вектора скорости ветра (обобщенный закон Релея) и его направления соответственно:

$I_0(x)$ - функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента:

$$y = \lambda \cos(\varphi - \Theta); \quad \lambda = \frac{c_r}{\sigma_r};$$

$$\Phi(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-\xi^2} d\xi - \text{интеграл ошибок.}$$

Гололедные нагрузки. Под гололедом считают образования, в холодное время года на проводах, грозозащитных тросах и опорах ВЛ, в результате оседания на них переохлажденной воды, находящейся в воздухе в виде тумана, изморози, дождя или налипания мокрого снега, слоя твердых атмосферных осадков в виде чистого льда, изморози, мокрого снега и смеси этих осадков [9], их классификация приведена в таблице 2.

Факторы, влияющие на обледенение.

1. На интенсивность обледенения влияет высота расположения проводов. При увеличении расстояния от земли возрастает скорость ветра и увеличивается содержание переохлажденной воды в воздухе, что способствует увеличению размеров гололедных отложений.

2. Увеличение толщины стенки гололеда с увеличением высоты.

3. На размеры гололедных отложений оказывает влияние диаметр провода. Чем больше диаметр, тем меньше интенсивность отложений. По мере увеличения диаметра также снижается закручивание провода.

4. Образование обледенения может происходить интенсивно в течение непродолжительного времени, так и длительно.

5. На проводах, находящихся под напряжением, величина отложившегося льда почти на 30% больше, чем на проводах обесточенных.

6. Форма и масса гололедно-изморозевых отложений зависит от крутильной жесткости провода и грозозащитных тросов. Чем больше крутильная жесткость провода, тем интенсивнее образуются гололедно-изморозевые отложения в виде муфты. Повышение жесткости провода приводит к образованию одностороннего гололеда, что снижает массу гололеда в 1,5 – 2 раза [10]. Гололедные отложения усиленно нарастают в направлении, поперечном движению воздушных масс. Если фронт движется с запада, то отложения толще на проводах, расположенных в меридиональном направлении. И, наоборот, при меридионально направленных потоках воздуха отложения толще

Таблица 2 - Классификация видов обледенения

Группа	Вид	Разновидность	Условия возникновения	Время возникновения
Обледенения, возникающие в результате осадения и замерзания переохлажденной воды	Зернистая изморозь	Иглообразная	образуется в туманную и ветреную погоду при температуре воздуха от -3 до -8 °С, а иногда и при более низкой температуре при безветренной погоде изморозь возникает редко, поскольку нет	поздним вечером, достигает максимума далеко за полночь, а разрушается вскоре после полудня.
	снеговидный рыхлый лед матово-белого цвета	Веерообразная Пластинчатая		
	Кристаллическая			

	изморозь - белый осадок, состоящий из кристаллов льда нежной тонкой структуры чаще всего листовидной формы Средняя плотность 100-200 кг/м ³		интенсивной подачи влаги, однако, в случае ветров со стороны крупных водоёмов процессы идут особенно интенсивно возникает преимущественно при безоблачном небе, при температуре ниже -11 °С, затишье или слабом ветре	
	Гололед Средняя плотность 750 кг/м ³	Гребнеобразный Овалообразный Футлярообразный Волнистообразный		
Сложные отложения	Зернистая изморозь Гололед на зернистой изморози. Ряд чередующихся слоев гололеда и изморози. Средняя плотность 500 кг/м ³	-		
Обледенения, возникающие в	Отложение мокрого снега. Замерзшее		температуре от 0 до -1 °С	

результате осаждения и замерзания мокрого снега	отложение мокрого снега. Средняя плотность 750 кг/м ³			
---	--	--	--	--

на проводах, расположенных по широте, разница может достигать до трех раз.

8. Обильность изморози напрямую связана не только с направлением и силой ветра, но и с его суточными изменениями. Например, на одной из станций Новгородской области кристаллическая изморозь в 70% случаев выпадает вечером, если ветер дует с юго-запада, при изменении направления ветра на северо-западное, время образования изморози обычно сдвигается на ночь.

Нормативное значение [11] линейной гололедной нагрузки для элементов кругового сечения диаметром до 70 мм включительно (проводов, тросов, оттяжек, стоек, вант и др.) i , Н/м, определяются по формуле

$$i = \pi b k \mu_1 (d + b k \mu_1) \rho g \cdot 10^{-3}. \quad (10)$$

где b — толщина стенки гололеда, мм ,

k — коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте;

d — диаметр провода, троса, мм;

μ_1 — коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда в зависимости от диаметра элементов кругового сечения;

ρ — плотность льда, принимаемая равной 0,9 г/см³;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Следовательно, ПУЭ учитывает не все указанные факторы, и территория страны делится на восемь районов по гололеду с интервалом в 5 мм, с периодом повторяемости в 25 лет. Таким образом, указываются максимальные значения для метода наихудшего случая при мокром снеге, который приводит к разрегулировке проводов и тросов и их сближение между собой, обрывам и пляске проводов и тросов, разрушению опор, перекрытие линейной изоляции ВЛЭП при таянии гололеда из-за значительного снижения льдоразрядных характеристик изоляторов.

Солнечная радиация. Количественной мерой солнечной радиации служит энергетическая освещенность (плотность полтока радиации). Прямую солнечную радиацию, приходящую к земной поверхности от диска солнца на горизонтальную поверхность (инсоляцию) определяют

$$S' = S \sin h_{\odot} \quad (11)$$

где S – прямая солнечная радиация на перпендикулярную поверхность солнечным лучам;

h_{\odot} - высота Солнца.

В лучшем случае на поверхности земли поток прямой радиации около $1,05 \text{ кВт/м}^2$.

Около четверти общего потока излучения превращается в рассеянную радиацию, а часть поглощается водяным паром атмосферы, облаками и атмосферными примесями (взвешенными аэрозольными частицами). Поглощение и рассеяние ослабляют поток радиации, проходящей сквозь атмосферу, что выражается формулой Бугера [12]:

$$S = S_0 p^m \quad (12)$$

где $S_0 = S_0^* \left(\frac{\bar{r}}{r} \right)^2$ - полный поток радиации от солнца; S_0^* - солнечная постоянная 1367 Вт/м^2 , с ошибкой $\pm 0,3 \%$; \bar{r} - среднее расстояние Земли от солнца; r - действительное расстояние Земли от солнца, определяемое днем года.

p – интегральный коэффициент прозрачности на равнине, он колеблется от $0,6$ до $0,85$;

m – оптическая масса атмосферы при $h_{\odot} > 30^\circ$ возможна замена $m = \cos e h_{\odot}$

В течение года освещенность на верхней границе изменяется на $\pm 3,3 \%$

На территории РФ по результатам исследования [13] может быть выделено шесть типов распределения по количественным значениям коэффициентов асимметрии и эксцентриситета:

- нормальное распределение;
- положительно-асимметричное, почти нормальной крутизны;
- положительно-асимметричное, островершинное;
- отрицательно-асимметричное, почти нормальной крутизны;
- отрицательно-асимметричное, островершинное;
- симметричное плосковершинное.

Выводы:

1. На основании анализа видов моделирования систем для получения достоверной информации и ЭМП объектов электроэнергетики обоснован и выбран аналитико - имитационный метод моделирования.
2. Разработана классификация параметров рассеяния влияющих на параметры ЭМП.

3. Для таких климатических факторов как ветер, гололедные отложения на проводах ВЛ и солнечная радиация продолжены стохастические математические модели для их моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем М.: Высш. шк., 2007,-343 с.
2. СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия (с изменениями от 5 июля 1993 г., 29 мая 2003 г.) М., 2001. - 111 с.
3. Нормы проектирования контактной сети СТН ЦЭ 141-99 М., 2001 Издательство "Трансиздат", 110 с.
4. Луговой В.А., Тимашова Л.В., Черешнюк С.В. Требования к учету климатических нагрузок на ВЛ // Вестник ВНИИЭ. – М.: НЦ ЭНАС, 2004.
5. Луговой В.А., Тимашова Л.В., Черешнюк С.В. Учет климатических нагрузок на ВЛ // Электрические станции. – 2004. – № 8.
6. Методические указания по расчету климатических нагрузок на ВЛ и построению региональных карт с повторяемостью 1 раз в 25 лет . – М., 1990.
7. Г.А. Михайлов, А.В. Войтишек Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло, - М.: Академия, 2006. – 368 с.
8. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели): Ю. С. Седунов, С.И. Авдюшин, Е.П. Борисенков Л.: Гидрометеиздат: 1991. – 510 с.
9. СО 153-34.20.361 Инструкция по производству наблюдений над обледенением проводов и сильным ветром на гололедных постах Минэнерго СССР, 12.07.1971. - 23 с.
10. Каверина Р.С. Повышение надежности ВЛ при воздействии гололеда // Материалы второй всероссийской с международным участием научно практической конференция Линии электропередач 2006 проектирование строительство опыт эксплуатации научно-технический прогресс. Новосибирск 2006 - С. 310-320
11. Правила устройства электроустановок: по состоянию на 1 мая 2005 г. – 7-е изд., с изм. и доп. – Новосибирск : Сиб. универ. изд-во, 2005. – 512 с.
12. С.П. Хромов, М.А. Петросянц Метеорология и климатология, - М.: Изд-во МГУ, 2001. - 528 с.
13. Стадник В.В. Типизация эмпирических распределений суточных норм радиации на территории СССР, - Труды ТГО, 1986, вып. 501. – с. 134-14