

Программа для моделирования воздействия ледяного дождя на провода линий электропередач

04, апрель 2017

Степанов В. П.

УДК: 621.3

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

vapals@yandex.ru

Введение

Ледяной дождь выпадает в виде прозрачных ледяных шариков при небольшой отрицательной температуре воздуха до -5°C . Диаметр переохлажденных твердых шариков составляет от одного до 3 мм. Внутри ледяных шариков находится жидкая вода, при их разбивании она вытекает, образуя гололед. Ледяной дождь может иметь ряд опасных последствий для людей, природы, транспорта, провода линий электропередач (ЛЭП). Толщина ледяного покрова на проводах может достигать до семи сантиметров. Под воздействием суммарного веса проводов и льда возможен их сильный провес и даже обрыв.

На основе статистических данных метеонаблюдений территория страны разделена для механических расчетов ЛЭП на районы. Эти районы для расчетов отличаются по толщине гололеда и скоростному напору ветра [1-3]. При моделировании существующих ЛЭП учитываются условия района, где находится линия. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) под обледенением проводов подразумевает любой вид обледенения, приведенный к гололеду круглой цилиндрической формы.

Из всех требований ПУЭ в работе рассматриваются только те, которые связаны воздействием ледяного дождя и ветровой нагрузки на провода. Расчет проводов на механическую прочность при гололеде производится для температуры окружающего воздуха -5°C , заданной толщине гололеда и ветровой нагрузке района нахождения ЛЭП. В этих расчетах считается, что заданная толщина льда равномерно налипает на провод, что не всегда соответствует действительности. Такой подход обоснован сложностью учета различной формы гололеда на проводах для инженерных расчетов. Гололед и ветер влияют на механическое напряжение в проводе. Для ЛЭП применяются в основном сталеалюминевые провода. Физико-механические характеристики стали и алюминия существенно отличаются. В инженерных расчетах используются эквивалентные физико-механические характеристики, задаваемые для провода в целом. К этим характеристикам относятся: модуль упругости E в даН/мм^2 , температурный коэффициент линейного удлинения α в $1/^{\circ}\text{C}$, механическое напряжение σ в даН/мм^2 . ПУЭ определяют критическую стрелу провеса про-

водов ЛЭП различных напряжений электрической сети и допустимые механические напряжения $\sigma_{рmax}$ для режима наибольшей внешней нагрузки в виде льда [1-3].

Для количественной оценки в воздействия ледяного дождя на провода воздушных ЛЭП и способам их противодействия часто используется натурное моделирование в лабораторных условиях [4, 5]. В работе [6] для расчета массы деформируемого льда при изгибе проводов предлагается использовать математические соотношения. В работе [7] рассматриваются ряд механизмов налипания льда на провода при изменении характеристик ледяного дождя.

1. Расчет механических нагрузок на провода

В работе объектом моделирования является пролет воздушной линии, для которой задаются расстояние между опорами и характеристики применяемых алюминиево-стальных проводов различных сечений. Для расчета пролета линии и вычисления максимального допустимого провиса и напряжения используется принятая методика, изложенная в [1 - 3]. В отличие от имеющихся подходов, при расчете массы гололеда на проводе в данной работе учитывается вес каждой капли ледяного шарика, упавшей на провод.

При расчете нагрузок на провода сечения F , длины l пользуются удельными механическими нагрузками на провод в даН/м мм², которые приведены к 1 м длины и 1 мм² сечения провода. Удельная нагрузка от собственного веса P одного км провода и его сечение равно

$$p_1 = P \cdot 10^{-3} / F.$$

Вес одного ледяного шарика ледяного дождя диаметром d_h составляет

$$p_h = 0.9 \pi d_h^3 \cdot 10^{-9} / 6.$$

Удельная нагрузка от веса гололеда определяется суммарным весом ледяных шариков P_h на 1 м провода

$$p_2 = P_h / F.$$

Суммарный вес провода и льда составляет

$$p_3 = p_1 + p_2.$$

Ветровая нагрузка со скоростью V_{max} действует на провод в горизонтальном направлении перпендикулярно проводу. Удельная нагрузка от давления ветра при наличии на проводе диаметра d гололеда максимальной толщины C_{max} для заданного района страны равна

$$p_4 = 0.25 V_{max}(d + 2 C_{max}) \cdot 10^{-3} / 16 F.$$

Удельная нагрузка от веса провода, покрытого гололедом, и ветра равна

$$p_{max} = \sqrt{p_3^2 + p_4^2}.$$

Механическое напряжение в проводе изменяется в зависимости от удельной нагрузки на провод и температуры воздуха. Для любых двух режимов i, j удельными нагрузками p_i, p_j и температурами t_i, t_j механические напряжения σ_i, σ_j этих режимов связаны с уравнением состояния провода [2, 3]

$$\sigma_i + \alpha E t_i - p_i l^2 E/24 \sigma_i^2 = \sigma_j + \alpha E t_j - p_j l^2 E/24 \sigma_j^2. \quad (1)$$

Данное уравнение содержит два неизвестных механических напряжения провода σ_i и σ_j . Для решения уравнения задаются данными одного режима и эти данные считаются допустимыми. Например, для режима с наименьшей температурой для заданного района страны и нагрузкой без льда p_1 считается известным напряжение в проводе равным допустимому. Тогда левую часть выражения (1) подставляются эти параметры и вычисляется значение некоторого коэффициента. Затем в правую часть подставляются параметры режима гололеда с нагрузкой с параметрами p_{max} и температурой гололеда -5°C [3]. Опуская для упрощения уравнения индексы механического напряжения σ , уравнение (6) сведется к неполному кубическому уравнению

$$\sigma^3 + A \sigma^2 + B = 0, \quad (2)$$

где A, B – вычисленные после подстановки коэффициенты уравнения.

Уравнение решается методом Ньютона [8] с точностью 0.1, принимая начальное приближение равным σ допустимому по ПУЭ, то есть $\sigma_0 = \sigma_{don}$. Начиная с $k = 0$, каждое $k+1$ приближение вычисляется на основе k приближения, используя соотношение

$$\sigma_{k+1} = \sigma_k - (\sigma_k^3 + A \sigma_k^2 + B) / (3 \sigma_k^2 + 2 A \sigma_k). \quad (3)$$

Итерационный процесс вычисления заканчивается при выполнении условия

$$|\sigma_{k+1} - \sigma_k| < 0.1$$

Результатом решения уравнения является механические напряжения в проводе σ_{pmax} при максимальной нагрузке и температуре -5°C . Используя полученное решение вычисляется значение стрелы провеса провода. Стрела провеса f для расчётного климатического условия определяется из соотношения [1-3]

$$f = p_{max} l^2 / 8 \sigma_{pmax}. \quad (4)$$

В случае превышения значения стрелы провеса линии в процессе моделирования выше допустимого значения по ПУЭ значения выдается сообщение.

1. Алгоритм моделирования ледяного дождя

Генерируются множество падающих капель разного размера ледяного дождя в воздухе. Капля налипаёт на провод, если ее траектория пересекает область пространства, в которой расположен провод. При ударе капли ледяная оболочка разбивается, и вода растекается по проводу. Считается, что силы поверхностного натяжения водяной пленки таковы, что капля под действием сил тяжести быстрее растечётся вниз, чем по сторонам. Тогда ширина водной пленки равна диаметру провода. Приращение площади сечения льда на проводе равно частному от деления объема льда на ширину водной пленки. Приращение площади льда на проводе распределяется по сечению согласно некоторой выбранной функции. Считается, что растекающаяся попавшая на провод капля мгновенно замерзает и на проводе появляется наледь. Вес ледяной оболочки провода зависит от количества и размеров налипших капель.

Размер экрана и количество пикселей, приходящихся на нее таковы, что не могут помещаться то количество капель, которые должны там поместиться в реальных условиях.

Поэтому в работе используется коэффициент масштабирования. Ледяной дождь, приводящий к сильному растяжению или обрыву проводов ЛЭП, довольно продолжителен по сравнению временем ее моделирования на компьютере. Поэтому в программе этот процесс ускоряется, принимая один тик таймера равным 10 секундам и вводя соответствующие коэффициенты в процесс моделирования.

Для моделирования ледяного дождя применяется система частиц. Каждая частица представляется материальной точкой, имеющая координаты в пространстве, размер и скорость. В ходе работы программы каждая частица изменяет своё состояние по определённому правилу, общему для всех частиц системы. Частица, представленная точкой в трехмерном пространстве, гораздо более простой примитив, чем полигон. Такой подход позволяет экономить время вычислений, и потому позволяет обрабатывать большое количество частиц и получать более детальные изображения при синтезе. Все характеристики частиц определяются в заданном диапазоне случайными числами. Это позволяет достичь эффекта хаотичности, который наблюдается в природе. Система частиц позволяет моделировать живые объекты, которые изменяются во времени. При реализации модели для удаления невидимых линий и поверхностей выбран наименее ресурсозатратный алгоритм художника.

2. Общая схема работы системы частиц

В течение заданного времени частицы генерируются системой, двигаются, изменяются внутри системы и умирают в ней. Для расчета каждого кадра изображения нужно выполнить следующую последовательность действий:

- новая частица генерируется системой, получая свой набор атрибутов;
- частицы системы, выходящие за область видимости, умирают, если они избыточны. В противном случае частица переносится в точку возникновения частиц с новыми атрибутами;
- оставшиеся частицы перемещаются согласно некоторым законам изменения;
- финальное изображение «живых» частиц рисуется на экране.

Система частиц позволяет использовать любую вычислительную модель, которая описывает поведение, динамику или внешний вид системы. Частицы генерируются системой в количестве, наиболее соответствующем заданной интенсивности осадков в зависимости от района гололеда. Каждая частица ледяного дождя имеет следующие атрибуты: размер, положение в трехмерном пространстве, скорость, текстура. Скорость частицы определяется некоторой случайной величиной из заданного диапазона, прибавленной к минимальному значению скорости, связанной со скоростью ветра. Это объясняется тем, что на частицы различного размера действует различное сопротивление воздуха. Для большей реалистичности представляемого пользователю изображения частицы имеют скорость, находящуюся в обратно-пропорциональной зависимости от расстояния между координатой частицы в трехмерном пространстве и точкой обзора.

Каждая частица представляется текстурой, имеющей определенное значение цвета и прозрачности. Частицы имеют круглую форму. Для реалистичности представляемого пользователю изображения частицы имеют радиус, находящийся в обратно-

пропорциональной зависимости от расстояния между координатой частицы в трехмерном пространстве и точкой обзора, так как объекты, наиболее удаленные кажутся маленькими в перспективе. Отдельные частицы внутри системы частиц двигаются в трехмерном пространстве, изменяя в процессе движения свои координаты. Частица считается живой, пока она находится в области видимости. Как только координаты частицы выходят за границы рассматриваемой области, частица переносится в точку возникновения частиц с новыми атрибутами.

3. Алгоритм визуализации объектов

Алгоритм визуализации системы частиц функционирует из предположения, что частицы не пересекаются другими объектами на сцене, кроме изображения провода ЛЭП. Когда траектория частицы пересекает провод, на этом месте появляется граница. Для визуализации явления ледяного дождя в реальном режиме используется известный алгоритм художника. Алгоритм работает аналогично тому, как художник рисует картину - сначала рисуются более далёкие объекты, а затем более близкие. Алгоритм работает хорошо для построения кадров, в которых отсутствуют пересекающиеся грани.

Опора линии электропередачи поддерживает провода и грозозащитные тросы на заданном расстоянии от поверхности земли и друг от друга. Каждая из двух опор имеет следующие атрибуты: высота подвеса провода и механические характеристики. Между опорами подвешиваются три провода в случае одно цепной линии или шесть проводов в случае двух цепной линии. Сечение проводов типа АС состоит из внутреннего стального троса и внешних алюминиевых проводов определенного количества. Провес провода линии методом среднеквадратичного отклонения аппроксимируется квадратичной функцией.

4. Программная реализация

Для разработки программы используется язык Visual C# среды Microsoft Visual Studio 2012.

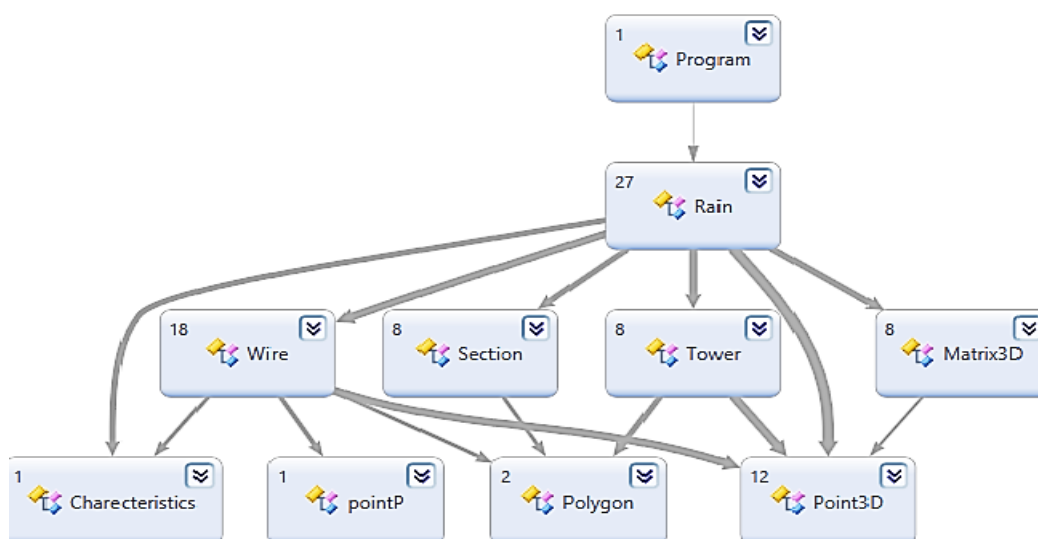


Рис. 1. Диаграмма классов программы

На рис. 1 приводится диаграмма классов реализованной программы. Из диаграммы классов видно, что моделируемая система состоит из системы частиц ледяного дождя, опор, провода, сечения провода, которые связывает класс *Rain*, ответственный за физические законы, согласно которым происходит процесс моделирования. Приведем краткое описание классов программы:

- Класс ***Rain*** управляет системой частиц и физической моделью объекта в целом;
- Класс ***Raindrop*** содержит физические характеристики капли и функции, моделирующие «жизненный цикл» частицы;
- Класс ***Wire*** содержит координаты положения провода в пространстве, физические характеристики провода, данные о налипшем на провод льде и законы, которым происходит налипание, а также функции для аппроксимации положения провода в пространстве;
- Класс ***Tower*** содержит координаты деталей конструкции и правила рисования опор ЛЭП;
- Класс ***Section*** содержит координаты элементов сечения провода, данные о налипшем на провод льде;
- Класс ***Characteristics*** определяет физические характеристики проводов.

Интерфейс программы построен созданием элементов управления, унаследованных от стандартных классов библиотеки Windows Forms. В программе используются объекты классов: *Form*, *Button*, *Label*, *TextBox*, *PictureBox*, *RadioButton*, *TrackBar*, *Timer*. Интерфейс программы позволяет пользователю изменять параметры системы в процессе моделирования и смотреть на кадр с любого ракурса. Доступ ко всем функциям и настройкам осуществляется непосредственно через компоненты основного окна программы.

5. Результаты моделирования

Отображение результатов моделирования происходит в двух окнах: панорамном виде полета ЛЭП и сечения сталеалюминиевого провода с налипшим льдом (рис. 2). На этом рисунке показано начальное состояние процесса, когда наледь на проводе минимальна. Перед началом процесса моделирования ледяного дождя задаются: длина полета ЛЭП между опорами, марка провода типа АС и интенсивность осадков. Интенсивность осадков может изменяться от морозящего дождя 1 мм/час до сильного ливня 100 мм/час. При необходимости интенсивность ледяного дождя можно изменять в процессе моделирования. Процесс моделирования позволяет отследить физику процесса в динамике. Пользователь может получать как графики, основанные на результатах серии испытаний, так и график текущего вычислительного эксперимента. В течение определенного времени наблюдается образование наибольшей наледи, сопровождающийся наибольшим допустимым провисом и максимальным механическим напряжением (рис. 3). Дальнейшее продолжение ледяного дождя может привести последующему возможному обрыву линии.

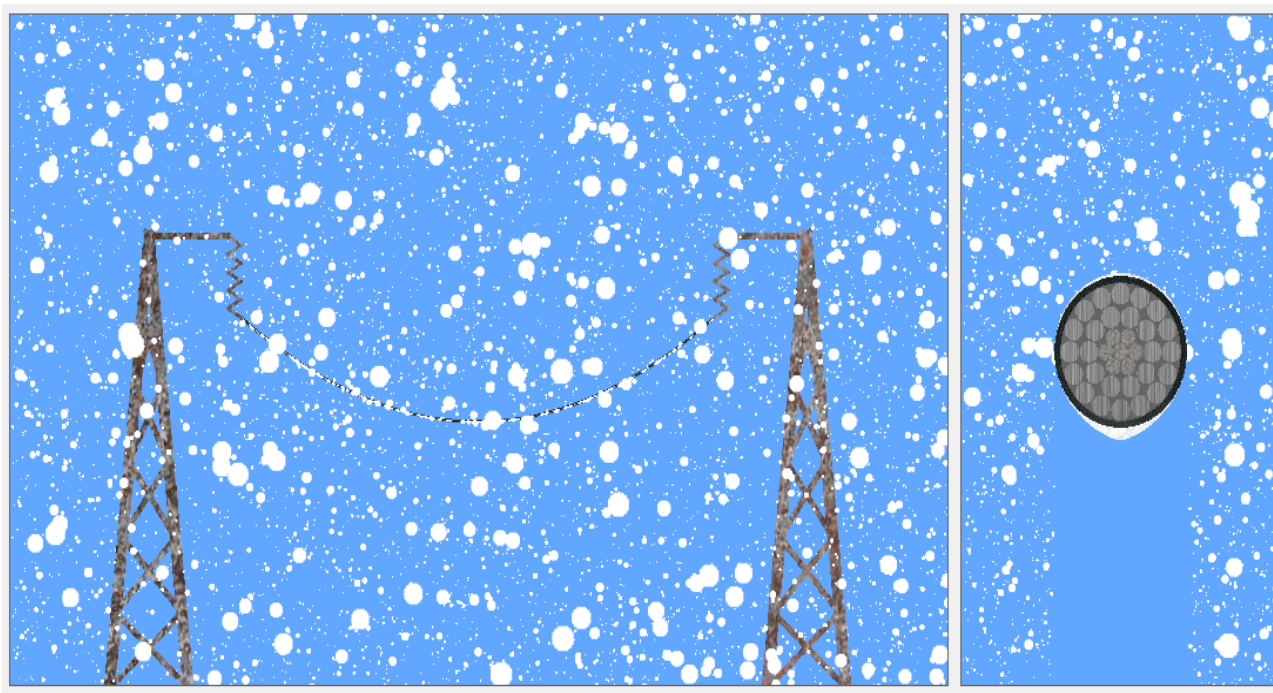


Рис. 2. Графическое отображение результатов моделирования на экране

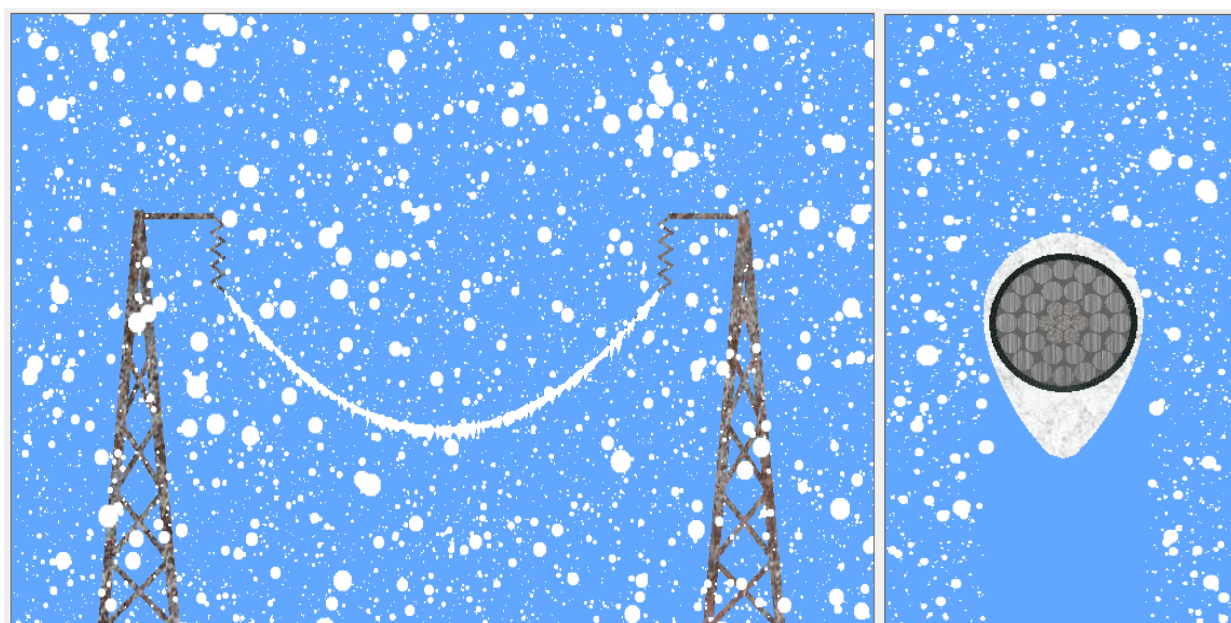


Рис. 3. Состояние провода при достижении критического провеса

С использованием программы получены зависимости времени достижения критического провеса от интенсивности ледяного дождя, представленные на рис 4. Области на оси X соответствуют интенсивности ледяного дождя в мм/ч, значения на оси Y соответствуют времени достижения критического провеса в тиках таймера. Один тик таймера процессора равна 10 секундам. Зависимости для проводов марок AC120 красным цветом и AC150 желтым цветом получены для случая, что интенсивность осадков в исследуемый период не изменяется.

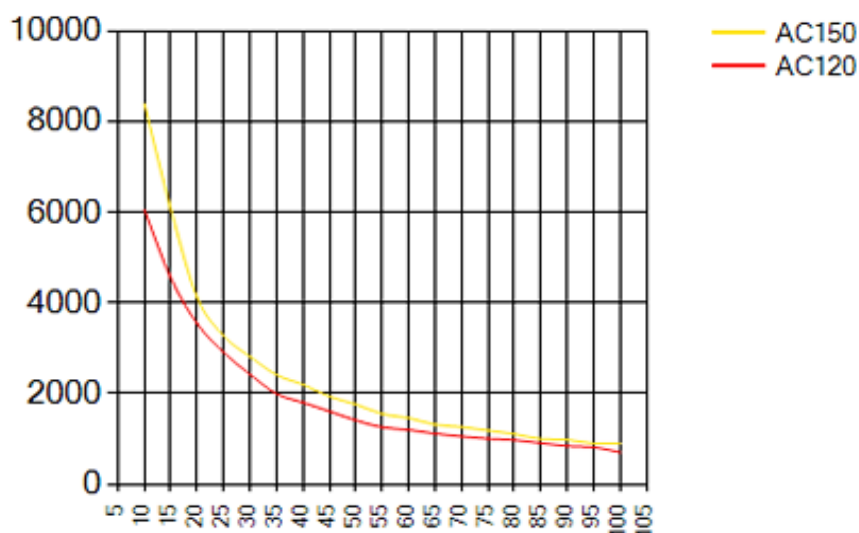


Рис. 4. Зависимость времени достижения критического провиса от интенсивности осадков

Полученные зависимости времени достижения критического провиса от интенсивности ледяного дождя имеют вид, близкий к экспоненциальному. Также проводились вычисления времени расчета на компьютере в зависимости от интенсивности ледяного дождя (рис. 5). Области на оси X соответствуют интенсивности ледяного дождя в мм/ч, значения на оси Y соответствуют процессорному времени в тиках таймера.

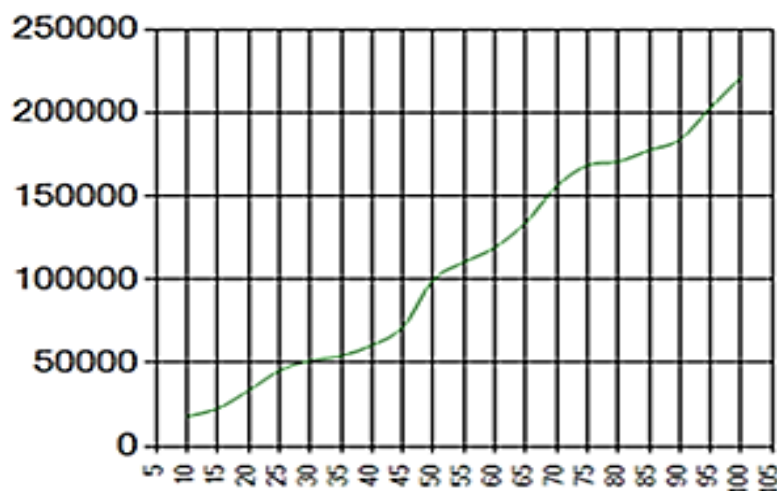


Рис. 5. Зависимость процессорного времени расчетов от интенсивности осадков

Более интенсивный ледяной дождь для моделирования требует больше времени процессора для расчёта параметров и последующего графического отображения. Полученные результаты имеют линейный вид. Исследовались также изменения стрелы провисы для провода различных марок с течением времени. Эта зависимости представляются линейными функциями. При достижении максимально допустимого провиса программа выдает сообщение.

Заключение

1. Разработанная программа позволяет моделировать процесс налипания льда на провода линий электропередач и оценить время возможного обрыва и наметить план предупреждающих действий.
2. Применение программы позволяет некоторые варианты физического моделирования заменить математическими и сэкономить временные и финансовые ресурсы.
3. Программа использована для получения зависимостей физических характеристик линий от интенсивности осадков ледяного дождя.

Список литературы

- [1]. Правила устройства электроустановок. 7-ое издание. М.: ВНИИЭ, 2003. 980 с.
- [2]. Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А. и др. Электрические системы. Электрические сети. / Под редакцией В.А. Веникова, В.А. Строева. Изд. 2-ое, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1998. 511 с.
- [3]. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. Изд. 2-ое перераб. и доп. Л.: Энергия, 1979. 312 с.
- [4]. Терешонок Д.В., Сон Э.Е. Разработка и создание макетных и опытных образцов мобильных систем борьбы с обледенением конструкций и оборудования линий электропередач: Экспериментальный стенд для исследований различных режимов образования и плавки гололеда на проводах воздушных линий // Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Энергосбережение и энергоэффективность технологий передачи, распределения и потребления электрической энергии». Центр энерго-ресурсоэффективных технологий, 2012. Режим доступа: <http://www.cert-energy.ru/itog2012/Tereshonok.pdf> (дата обращения: 02.03.2017).
- [5]. Никитина И.Э., Абдрахманов Н.Х., Никитина С.А. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. 2015. №3. С. 794-823. Режим доступа: <http://ogbus.ru/article/sposoby-udaleniya-lda-s-provodov-linij-elektroperedachiways-of-removal-of-ice-from-wires-of-power-lines/> (дата обращения: 02.03.2017).
- [6]. Qing He, Xi-feng Lv и Xiao-tong Zhao. Overhead Transmission Lines Deicing under Different Incentive Displacement // Journal of Applied Mathematics. 2014. Vol. 2014. Special Is. Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/jam/2014/872198/> (дата обращения: 02.03.2017). DOI: 10.1155/2014/872198
- [7]. L. Makkonen. Modeling power line icing in freezing precipitation. // Atmospheric Research. 1998. Vol. 46. No. 1. P. 131–142. Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809597000562> (дата обращения: 02.03.2017). DOI: 10.1016/S0169-8095(97)00056-2
- [8]. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. Изд. 7-е. М: Бинном. 2011. 636 с.