

В. Н. Черных

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЯМОЙ
И ОБРАТНОЙ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОЛОЛЁДНОЙ НАГРУЗКИ
В БЛОЧНЫХ КОМПЕНСАТОРАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

Аннотация. Статья посвящена развитию математического аппарата автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети, предназначенной для раннего обнаружения гололёдно-изморозевых отложений. В ранее выполненных исследованиях были получены зависимости между углами отклонения ветвей, параметрами компенсатора и измеряемыми усилиями для двухблочных и трёхблочных компенсирующих устройств, а также обосновано минимально необходимое количество тензометрических датчиков для корректного контроля гололёдной нагрузки. В настоящей работе выполнен переход от зависимостей для углов отклонения ветвей каната к формулам, непосредственно связывающим добавочную гололёдную нагрузку с усилием, регистрируемым тензометрическим датчиком. Показано, что различие коэффициентов передачи нагрузки в указанных схемах должно учитываться при выборе чувствительности датчиков и настройке алгоритмов обработки данных АСКВП.

Ключевые слова: контактная сеть, гололёдообразование, гололёдно-изморозевые отложения, компенсатор натяжения, двухблочная система, трёхблочная система, тензометрический контроль, приращение усилия, автоматизированная система контроля веса проводов.

Для цитирования: Черных, В. Н. Математическое обоснование прямой и обратной зависимостей для определения гололёдной нагрузки в блочных компенсаторах контактной сети / В. Н. Черных // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 37–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_37.

Введение

В ранее опубликованных работах [8, 9] был предложен подход к раннему обнаружению гололёдно-изморозевых отложений на контактной сети электрифицированных железных дорог, основанный на регистрации изменения усилия в элементах компенсирующего устройства контактной подвески. В отличие от методов, ориентированных преимущественно на метеорологические признаки или визуальную фиксацию уже сформировавшихся отложений, данный подход предполагает использование механического отклика самой контактной подвески на увеличение массы провода. Поэтому компенсирующее устройство в такой постановке рассматривается не только как элемент поддержания постоянного натяжения, но и как чувствительный механический узел, через который может быть получена информация о начальной стадии гололёдообразования.

В работе [8] было показано, что установка тензометрического измерительного органа в точке крепления неподвижного блока компенсатора к анкерной опоре позволяет регистрировать изменение силового состояния системы при увеличении весовой нагрузки на контактный провод. Тем самым была обоснована принципиальная возможность построения автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети, в которой диагностическим параметром выступает не только температура воздуха или проводника, а изменение усилия, возникающее непосредственно в механической системе компенсации натяжения.

Дальнейшее развитие данного направления выполнено в работе [9], где рассмотрены двухблочная и трёхблочная схемы компенсирующих устройств. В указанной работе на основании уравнений статики и геометрических соотношений для ветвей канатов были получены зависимости, связывающие углы отклонения ветвей с параметрами системы и измеряемыми усилиями. Кроме того, было показано, что для корректного контроля гололёдной нагрузки в двухблочной схеме требуется установка не менее двух тензометрических датчиков, а для трёхблочной схемы – не менее трёх. Эти результаты имеют значение для выбора состава измерительных органов автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети (АСКВП) и определения минимально необходимого объёма первичной информации о состоянии компенсатора.

Вместе с тем для практического применения АСКВП одних угловых зависимостей недостаточно. Углы отклонения ветвей каната позволяют описать геометрию силового равновесия, однако в алгоритме работы системы необходимо оперировать величинами, непосредственно связанными с измерительным сигналом тензометрического датчика. Для эксплуатационного использования требуется определить, как добавочная нагрузка от гололёдно-изморозевых отложений преобразуется в приращение усилия в точке крепления неподвижного блока. Иными словами, требуется перейти от геометрической интерпретации силовой схемы к явным аналитическим зависимостям, позволяющим рассчитать силу S , её чистое приращение ΔS , а также выполнить обратный расчёт добавочной нагрузки ΔG по зарегистрированному изменению сигнала.

Такой переход является необходимым этапом при формировании расчётного ядра АСКВП. Если на стадии теоретического анализа достаточно установить наличие взаимосвязи между изменением массы провода и изменением усилий в компенсаторе, то для автоматизированной системы требуется более строгая форма этой связи. Измерительный блок системы фиксирует не саму гололёдную нагрузку, а изменение усилия в контролируемой точке. Поэтому задача обработки данных сводится к двум взаимосвязанным операциям: прямому расчёту ожидаемого приращения усилия при заданной добавочной нагрузке и обратному определению величины этой нагрузки по измеренному приращению сигнала.

В настоящей работе рассматривается следующий этап развития указанной модели: получение прямых зависимостей для расчёта приращения усилия в точке установки датчика и обратных зависимостей для восстановления добавочной гололёдной нагрузки по измеренному сигналу. В качестве расчётных схем рассматриваются двухблочная и трёхблочная системы компенсации натяжения, ранее исследованные с точки зрения угловых зависимостей и минимально необходимого количества измерительных органов.

Для достижения поставленной цели в статье последовательно решаются следующие задачи: уточняется связь между суммарной вертикальной нагрузкой на провод и углами отклонения ветвей компенсирующего устройства; выполняется переход от угловых зависимостей к выражениям для силы S ; определяется исходное значение усилия S_0 при отсутствии гололёдной нагрузки; вводится понятие чистого приращения ΔS , обусловленного только добавочной массой отложений; выводятся обратные зависимости для определения ΔG по измеренному сигналу. Полученные соотношения могут быть использованы при построении структурных и алгоритмических схем АСКВП, а также при разработке расчётных блоков программной обработки данных тензометрического контроля.

Основная часть

Общая логика перехода от полученных угловых зависимостей к расчётным зависимостям АСКВП представлена на рис. 1. На первом этапе используется силовая схема компенсатора и система уравнений равновесия. На втором этапе из неё определяется связь между углами ветвей и суммарной вертикальной нагрузкой на провод. На третьем этапе эта связь преобразуется к выражению для силы S , регистрируемой тензометрическим датчиком. После вычитания исходной составляющей S_0 получается чистое приращение ΔS , а обратное преобразование позволяет определить добавочную нагрузку ΔG .

В дальнейшем используются следующие обозначения: P – вес одного груза компенсирующего устройства; Q – сила натяжения ветви, связанной с контактной подвеской; Q' – горизонтальная составляющая силы натяжения; S – усилие, регистрируемое в точке крепления неподвижного блока к анкерной опоре; G – собственный вес рассматриваемого участка провода; ΔG – добавочная нагрузка от гололёдно-изморозевых отложений; S_0 – исходное значение силы S при отсутствии гололёдной нагрузки; ΔS – чистое приращение сигнала тензометрического датчика. Как и в ранее рассмотренных моделях, блоки считаются идеальными, трением в опорах пренебрегают, канаты принимаются невесомыми и нерастяжимыми, а процесс рассматривается как квазистатический.



Рис. 1. Обобщённая структурная схема перехода от угловых зависимостей к расчётному ядру АСКВП

Двухблочная система компенсации

Рассмотрим двухблочную схему компенсации натяжения, для которой ранее были получены угловые зависимости и показана необходимость использования не менее двух измеряемых параметров. В настоящей работе эта схема используется для вывода прямой зависимости между добавочной нагрузкой на провод и усилием, регистрируемым в точке крепления неподвижного блока. Силовая схема двухблочного компенсатора приведена на рис. 2.

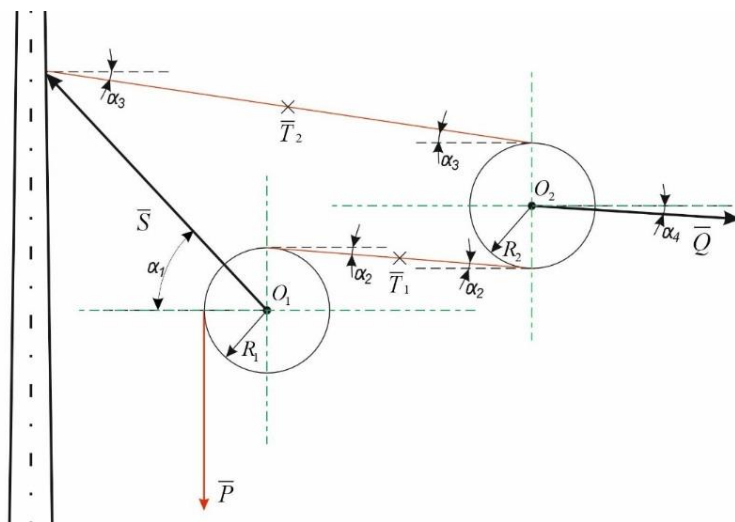


Рис. 2. Силовая схема двухблочной системы компенсации натяжения проводов

Вертикальная составляющая силы натяжения ветви, связанной с контактной подвеской, уравновешивает суммарную нагрузку от собственного веса рассматриваемого участка провода и добавочной нагрузки от гололёдообразования:

$$Q \sin \alpha_4 = G + \Delta G. \quad (1)$$

Для двухблочной схемы принимается, что результирующая сила натяжения ветви, связанной с контактной подвеской, определяется весами двух грузовых ветвей:

$$Q = 2P = \text{const}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует связь угла ветви с суммарной вертикальной нагрузкой:

$$\sin \alpha_4 = \frac{G + \Delta G}{2P}. \quad (3)$$

Горизонтальная составляющая силы натяжения, определяющая полезную составляющую натяжения контактного провода, в таком случае может быть записана как

$$Q' = 2P \sqrt{1 - \left(\frac{G + \Delta G}{2P} \right)^2}. \quad (4)$$

Условие физической реализуемости равновесия требует, чтобы аргумент обратной тригонометрической функции не выходил за допустимые пределы. Для положительной вертикальной нагрузки это условие имеет вид:

$$G + \Delta G \leq 2P. \quad (5)$$

Далее необходимо связать найденный угол с усилием S , которое регистрируется в точке крепления неподвижного блока. Для второго блока двухблочной схемы уравнения равновесия после подстановки $Q = 2P$ приводятся к двум соотношениям:

$$2 \cos \alpha_4 = \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3, \quad (6)$$

$$2 \sin \alpha_4 = \sin \alpha_2 + \sin \alpha_3. \quad (7)$$

Возведение выражений (6) и (7) в квадрат и последующее сложение позволяет исключить угол α_4 :

$$(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)^2 + (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_3)^2 = 4. \quad (8)$$

После раскрытия скобок и применения тождеств $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$ и $\cos x \cos y + \sin x \sin y = \cos(x - y)$ получаем:

$$\cos(\alpha_2 - \alpha_3) = 1. \quad (9)$$

Следовательно, ветви, сходящиеся во втором блоке, занимают симметричное положение, а углы могут быть приравнены:

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4. \quad (10)$$

Для первого блока сохраняется связь между углом α_1 и измеряемым усилием S , полученная из уравнений равновесия по осям и моментного равновесия:

$$\sin \alpha_1 = \frac{S}{2P}. \quad (11)$$

С учётом указанной связи выражение для угла α_2 может быть приведено к виду

$$\sin \alpha_2 = \frac{S^2 - 2P^2}{2P^2}. \quad (12)$$

Так как для двухблочной схемы $\alpha_2 = \alpha_4$, выражения (3) и (12) могут быть приравнены:

$$\frac{S^2 - 2P^2}{2P^2} = \frac{G + \Delta G}{2P}. \quad (13)$$

Отсюда после алгебраических преобразований получается явное выражение для силы, регистрируемой датчиком в точке крепления неподвижного блока:

$$S = \sqrt{2P^2 + P(G + \Delta G)}. \quad (14)$$

Если гололёдная нагрузка отсутствует, то $\Delta G = 0$, а исходное значение силы равно:

$$S_0 = \sqrt{2P^2 + PG}. \quad (15)$$

Для алгоритма АСКВП практический интерес представляет не абсолютное значение S , а чистое приращение, обусловленное именно появлением добавочной массы на проводе. Поэтому введём:

$$\Delta S = \sqrt{2P^2 + P(G + \Delta G)} - \sqrt{2P^2 + PG}. \quad (16)$$

То же выражение удобно представить через исходное значение S_0 :

$$\Delta S = \sqrt{S_0^2 + P\Delta G} - S_0. \quad (17)$$

Выражение (17) является прямой зависимостью, позволяющей по заданной добавочной нагрузке ΔG определить ожидаемое приращение сигнала датчика. Для практического применения также требуется обратная зависимость, поскольку в реальной системе сначала измеряется ΔS , а величина ΔG должна быть восстановлена расчётным способом.

Из (17) получаем:

$$\Delta G = \frac{\Delta S^2 + 2\Delta S S_0}{P}. \quad (18)$$

С учётом выражения для ΔS окончательно можно записать:

$$\Delta G = \frac{\Delta S^2}{P} + 2\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{P}}. \quad (19)$$

Формулы (16)–(19) образуют расчётный блок для двухблочной системы компенсации. Первая зависимость используется при моделировании реакции компенсатора на заданное приращение массы провода, вторая – при обработке реального сигнала тензометрического датчика. При этом величины P и G для конкретного анкерного участка являются заданными или предварительно определяемыми параметрами, что делает обратное восстановление ΔG алгоритмически реализуемым.

Трёхблочная система компенсации

Трёхблочная схема отличается от двухблочной не только увеличением числа ветвей, но и иным перераспределением усилий между блоками. Поэтому прямое перенесение формул, полученных для двухблочной схемы, на трёхблочную систему недопустимо. Вместе с тем общий принцип вывода сохраняется: сначала устанавливается связь углов ветвей с суммарной вертикальной нагрузкой, затем эта связь преобразуется к выражению для силы S , регистрируемой датчиком. Силовая схема трёхблочного компенсатора приведена на рис. 3.

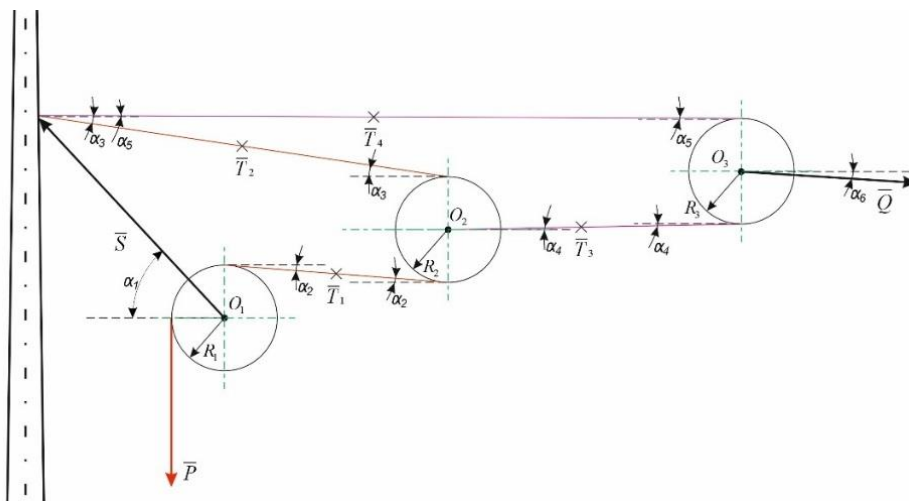


Рис. 3. Силовая схема трёхблочной системы компенсации натяжения проводов

Для принятой трёхблочной схемы соотношения между усилиями в ветвях канатов записываются следующим образом:

$$T_1 = T_2 = P, \quad T_3 = T_4 = 2P, \quad Q = 4P. \quad (20)$$

Для третьего блока уравнения равновесия по осям с учётом (20) имеют вид

$$4P \cos \alpha_6 - 2P \cos \alpha_5 - 2P \cos \alpha_4 = 0, \quad (21)$$

$$-4P \sin \alpha_6 + 2P \sin \alpha_5 + 2P \sin \alpha_4 = 0, \quad (22)$$

После деления на $2P$ получаем

$$2 \cos \alpha_6 = \cos \alpha_4 + \cos \alpha_5, \quad (23)$$

$$2 \sin \alpha_6 = \sin \alpha_4 + \sin \alpha_5. \quad (24)$$

Дальнейшее преобразование выполняется аналогично двухблочному случаю: выражения возводятся в квадрат, складываются, после чего используется тождество для косинуса разности. В результате получаем

$$\alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6. \quad (25)$$

Для второго блока трёхблочной схемы после подстановки соответствующих усилий имеем

$$2 \cos \alpha_4 = \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3, \quad (26)$$

$$2 \sin \alpha_4 = \sin \alpha_2 + \sin \alpha_3. \quad (27)$$

Отсюда, по той же логике, следует равенство углов во втором блоке. С учётом результата для третьего блока все углы, характеризующие отклонение ветвей после первого блока, могут быть сведены к одной обобщённой угловой координате:

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \alpha. \quad (28)$$

Вертикальная составляющая силы натяжения ветви, связанной с контактной подвеской, уравновешивает суммарную нагрузку от собственного веса провода и гололёдных отложений:

$$Q \sin \alpha = G + \Delta G. \quad (29)$$

Так как для принятой трёхблочной схемы $Q = 4P$, получаем:

$$\sin \alpha = \frac{G + \Delta G}{4P}. \quad (30)$$

Соответственно горизонтальная составляющая силы натяжения может быть представлена выражением:

$$Q' = 4P \sqrt{1 - \left(\frac{G + \Delta G}{4P} \right)^2}. \quad (31)$$

Как и для двухблочной схемы, для первого блока сохраняется зависимость между углом ветви и измеряемым усилием S . С учётом $\alpha_2 = \alpha$ имеем:

$$\frac{S^2 - 2P^2}{2P^2} = \frac{G + \Delta G}{4P}. \quad (32)$$

После преобразования получаем явное выражение для силы, регистрируемой тензометрическим датчиком:

$$S = \sqrt{2P^2 + \frac{P}{2}(G + \Delta G)}. \quad (33)$$

При отсутствии гололёдной нагрузки исходное значение силы равно:

$$S_0 = \sqrt{2P^2 + \frac{PG}{2}}. \quad (34)$$

Чистое приращение измеряемого усилия для трёхблочной системы определяется как

$$\Delta S = \sqrt{2P^2 + \frac{P}{2}(G + \Delta G)} - \sqrt{2P^2 + \frac{PG}{2}}. \quad (35)$$

Или через исходное значение S_0 :

$$\Delta S = \sqrt{S_0^2 + \frac{P\Delta G}{2}} - S_0. \quad (36)$$

Переход к обратной зависимости выполняется возведением обеих частей выражения (36) в квадрат и последующим выделением ΔG . В результате:

$$\Delta G = \frac{2\Delta S^2 + 4\Delta S S_0}{P}. \quad (37)$$

С учётом выражения для S_0 окончательно получаем:

$$\Delta G = \frac{2\Delta S^2}{P} + 4\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{2P}}. \quad (38)$$

Формулы (35)–(38) показывают, что трёхблочная система сохраняет возможность обратного определения добавочной гололёдной нагрузки по измеренному приращению усилия. Однако коэффициент, с которым ΔG входит в подкоренное выражение, отличается от двухблочной схемы. Это обстоятельство принципиально важно для дальнейшего выбора чувствительности тензометрических датчиков и настройки порогов срабатывания системы.

Сравнение полученных зависимостей и их использование в АСКВП

Сопоставление полученных выражений удобно выполнить через прямые зависимости для чистого приращения усилия. Для двухблочной системы имеем:

$$\Delta S_2 = \sqrt{S_{02}^2 + P\Delta G} - S_{02}. \quad (39)$$

Для трёхблочной системы аналогичная зависимость принимает вид:

$$\Delta S_3 = \sqrt{S_{03}^2 + \frac{P\Delta G}{2}} - S_{03}. \quad (40)$$

Здесь S_{02} и S_{03} – исходные значения контролируемого усилия соответственно для двухблочной и трёхблочной схем. Из выражений (39) и (40) видно, что при одинаковом P и одинаковой добавочной нагрузке ΔG в двухблочной системе прирост измеряемого усилия будет более выраженным. Для малых приращений нагрузки это различие можно показать через производные в окрестности $\Delta G = 0$:

$$\left. \frac{dS_2}{d(\Delta G)} \right|_{\Delta G=0} = \frac{P}{2S_{02}}; \quad (41)$$

$$\left. \frac{dS_3}{d(\Delta G)} \right|_{\Delta G=0} = \frac{P}{4S_{03}}. \quad (42)$$

Полученные производные характеризуют начальную чувствительность измеряемого усилия к появлению добавочной нагрузки. Иначе говоря, они показывают, какое приращение силы S будет зарегистрировано тензометрическим датчиком при малом увеличении ΔG в начальной области гололёдообразования. Такой подход не заменяет точные выражения для ΔS_2 и ΔS_3 , приведённые выше, а используется только для наглядного сравнения двух схем компенсации вблизи исходного состояния.

С учётом найденных значений производных малое изменение измеряемого усилия можно представить в виде:

$$\Delta S_2 \approx \frac{P}{2S_{02}} \Delta G, \quad (43)$$

$$\Delta S_3 \approx \frac{P}{4S_{03}} \Delta G. \quad (44)$$

Знак приближённого равенства в данном случае означает, что рассматривается начальный участок зависимости, соответствующий малым значениям добавочной нагрузки. Из приведённых выражений видно, что для двухблочной схемы коэффициент при ΔG в два раза больше, чем для трёхблочной схемы при сопоставимых исходных параметрах. Следовательно, одна и та же добавочная гололёдная нагрузка вызывает в двухблочной системе более выраженное приращение усилия, регистрируемого датчиком. Для алгоритма АСКВП это означает необходимость раздельного задания расчётных коэффициентов и порогов срабатывания для разных типов компенсирующих устройств.

Полученный результат не означает преимущества одной схемы компенсации как эксплуатационного устройства. Тип компенсатора определяется конструкцией контактной подвески, условиями анкерования и принятой схемой натяжения. Однако для измерительной системы это различие имеет принципиальное значение. При переходе от двухблочной к трёхблочной схеме полезный сигнал, соответствующий одной и той же добавочной нагрузке, изменяется по иной зависимости. Поэтому алгоритм АСКВП не должен использовать единый универсальный коэффициент пересчёта для всех типов компенсаторов. В программной реализации необходимо предварительно идентифицировать тип схемы, задать соответствующие параметры P и G , после чего применять формулы прямого или обратного расчёта, полученные для конкретной конфигурации.

С инженерной точки зрения полученные зависимости позволяют сформировать два взаимосвязанных блока обработки данных. Первый блок является расчётно-прогноznым: по заданной величине ΔG определяется ожидаемое приращение ΔS , что используется при моделировании чувствительности системы и назначении порогов обнаружения. Второй блок является измерительно-диагностическим: по фактически зарегистрированному ΔS определяется добавочная нагрузка ΔG , которая затем может быть интерпретирована как признак начального гололёдообразования. Такая структура хорошо согласуется с общей логикой АСКВП, в которой тензометрический датчик фиксирует силовой отклик компенсатора, а программный модуль выполняет фильтрацию, выделение полезной составляющей и пересчёт измеренного сигнала в оценку дополнительной массы провода.

Следует отдельно отметить, что в эксплуатационных условиях измеряемое усилие S будет содержать не только полезную составляющую, связанную с ростом массы отложений, но и кратковременные возмущения от динамического воздействия подвижного состава, температурных перемещений, ветровых нагрузок и особенностей работы компенсирующего устройства. Поэтому формулы, полученные в настоящей работе, не исключают необходимости первичной обработки сигнала. Напротив, они задают расчётную основу для такого алгоритма: после фильтрации и выделения устойчивой составляющей приращения усилия именно обратные зависимости (18) и (37) позволяют перейти от измеренного сигнала к физически интерпретируемой величине ΔG .

Таким образом, полученные выражения являются недостающим звеном между ранее разработанной угловой моделью блочных компенсаторов и практическим алгоритмом работы автоматизированной системы контроля веса проводов. Угловые зависимости позволяют описать силовую геометрию системы, а выражения для S , ΔS и ΔG переводят эту геометрию в форму, пригодную для расчётного блока АСКВП.

Выводы

Сравнение прямых зависимостей для ΔS показывает, что двухблочная и трёхблочная системы требуют различных алгоритмов пересчёта измеряемого усилия в добавочную гололёдную нагрузку. Это должно учитываться при выборе чувствительности тензометрических датчиков, назначении порогов срабатывания и разработке программного обеспечения АСКВП.

Полученные зависимости могут быть использованы как расчётная основа для структурных и алгоритмических блок-схем АСКВП: прямой расчёт позволяет моделировать ожидаемый сигнал при заданной гололёдной нагрузке, а обратный расчёт обеспечивает восстановление ΔG по фактически измеренному приращению усилия.

Список литературы

- 1 Методические указания по борьбе с гололёдом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПП, автоблокировки и продольного электропитания. Кн. 1. Основы профилактического подогрева, плавки гололёдно-изморозевых образований и меры борьбы с автоколебаниями проводов контактной сети и высоковольтных линий. – Москва : ОАО «РЖД», 2004. – 132 с.
- 2 **Фигурнов, Е. П.** Условия успешной плавки гололёда на неизолированных проводах воздушных линий / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Т. Е. Петрова // Электричество. – 2013. – № 8. – С. 21–27. – ISSN 0013-5380.
- 3 **Жарков, Ю. И.** Повышение надёжности и безопасности электроснабжения на основе мониторинга и раннего обнаружения опасных внешних воздействий и скрытых дефектов в устройствах электроснабжения / Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семенов, Е. П. Фигурнов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 1 (45). – С. 190–195. – ISSN 0201-727X.
- 4 **Кубкина, О. В.** Исследование возможности применения емкостного способа контроля толщины стенки гололёдно-изморозевых образований на проводах. Математическая модель ёмкости планарного конденсатора / О. В. Кубкина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 2 (30). – С. 95–100. – ISSN 0201-727X.

References

- 1 Guidelines for combating ice and self-oscillation on the contact network, DPR lines, automatic block signaling and longitudinal power supply lines. Book 1. Fundamentals of preventive heating, melting of ice and frost formations and measures to combat self-oscillation of contact network and high-voltage line wires. – Moscow : JSC “RZD”, 2004. – 132 p.
- 2 **Figurnov, E. P.** Conditions of successful melting of ice on uninsulated wires of overhead lines / E. P. Figurnov, Yu. I. Zharkov, T. E. Petrova // Elektrichestvo. – 2013. – No. 8. – P. 21–27. – ISSN 0013-5380.
- 3 **Zharkov, Yu. I.** Increasing the reliability and safety of the power supply on the basis of monitoring and early detection of dangerous external effects and hidden defects in the power supply devices / Yu. I. Zharkov, Yu. G. Semenov, E. P. Figurnov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2012. – No. 1 (45). – P. 190–195. – ISSN 0201-727X.
- 4 **Kubkina, O. V.** Investigation of the possibility of using the capacitive method of controlling the wall thickness of ice-rime formations on wires. Mathematical model of the planar capacitor capacity / O. V. Kubkina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2008. – No. 2 (30). – P. 95–100. – ISSN 0201-727X.

5 **Трубицин, М. А.** Анализ способов обнаружения гололёда на проводах ЛЭП и их применение для контактной сети / М. А. Трубицин, О. Г. Лукашевич // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4 (43). – С. 23. – ISSN 2073-8633.

6 **Михеев, В. П.** Контактные сети и линии электропередачи : учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. П. Михеев. – Москва : Маршрут, 2003. – 416 с. – ISBN 5-89035-086-2.

7 **Фрайфельд, А. В.** Проектирование контактной сети электрифицированных железных дорог / А. В. Фрайфельд. – Москва : Транспорт, 1984. – 327 с.

8 **Черных, В. Н.** Совершенствование системы обнаружения раннего гололёдообразования для контактных сетей электрифицированных железных дорог / В. Н. Черных, В. А. Осипов. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (94). – С. 110–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_110.

9 **Осипов, В. А.** Математическое обоснование минимально необходимого количества тензодатчиков для корректного контроля гололёдной нагрузки в составе АСКВП / В. А. Осипов, В. Н. Черных // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 10–19. – ISSN 2220-4245.

10 **Черных, В. Н.** Метод раннего обнаружения гололёда на контактной сети / В. Н. Черных // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сборник научных трудов международной научно-практической конференции ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 12–15. – EDN PNDASB.

11 **Черных, В. Н.** Алгоритмы и техническая реализация автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети / В. Н. Черных, В. А. Осипов // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов международной научно-практической конференции ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2025. – С. 103–107. – EDN JYHGRF.

12 **Патент № 2823373 C1.** Российская Федерация, МПК В60М 1/12, В60М 1/26. Автоматизированная система контроля веса проводов контактной сети железной дороги / В. А. Осипов, В. Н. Черных, Н. В. Черных. – № 2024103146 ; заявлено 08.02.2024 ; опубликовано 22.07.2024, Бюл. 21. – 5 с. – EDN AHWIHS.

5 **Trubitsin, M. A.** Analysis of methods for detecting ice on power line wires and their application for the contact network / M. A. Trubitsin, O. G. Lukashevich // Engineering Bulletin of Don. – 2016. – No. 4 (43). – P. 23. – ISSN 2073-8633.

6 **Mikheev, V. P.** Contact networks and power lines : textbook for railway transport universities / V. P. Mikheev. – Moscow : Marshrut, 2003. – 416 p. – ISBN 5-89035-086-2.

7 **Freifeld, A. V.** Design of the contact network of electrified railways / A. V. Freifeld. – Moscow : Transport, 1984. – 327 p.

8 **Chernykh, V. N.** Improving the early ice formation detection system for contact networks of the electrified railways / V. N. Chernykh, V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 2 (94). – P. 110–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_110.

9 **Osipov, V. A.** Mathematical justification of the minimum required number of strain gauges for accurate ice load monitoring in an automated overhead contact wire monitoring system / V. A. Osipov, V. N. Chernykh // Journal of Transsib Railway Studies. – 2025. – No. 4 (64). – P. 10–19. – ISSN 2220-4245.

10 **Chernykh, V. N.** Method of early detection of ice on the contact network / V. N. Chernykh // Transport power engineering. Current problems and tasks : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2024. – P. 12–15. – EDN PNDASB.

11 **Chernykh, V. N.** Algorithms and technical implementation of an automated weight control system for the wires of the contact network / V. N. Chernykh, V. A. Osipov // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2025. – P. 103–107. – EDN JYHGRF.

12 **Patent No. 2823373 C1.** Russian Federation, IPC B60M 1/12, B60M 1/26. Automated system for monitoring the weight of wires in the overhead contact network of a railway / V. A. Osipov, V. N. Chernykh, N. V. Chernykh. – No. 2024103146 ; declared 08.02.2024; published 22.07.2024, Bulletin 21. – 5 p. – EDN AHWIHS.

V. N. Chernykh

**MATHEMATICAL JUSTIFICATION OF DIRECT AND INVERSE DEPENDENCES
FOR DETERMINING ICE LOAD IN BLOCK COMPENSATORS
OF THE OVERHEAD CONTACT NETWORK**

Abstract. The article is devoted to the development of a mathematical framework of an automated system for monitoring the weight of overhead contact wires intended for early detection of ice and frost formations. Previous studies have derived relationships between the branch deflection angles, compensator parameters, and measured forces for two- and three-block compensating devices, and substantiated the minimum number of strain gauges required for accurate ice load monitoring. This paper transitions from relationships for the branch deflection angles to formulas directly linking the additional ice load to the force recorded by the strain gauge. It is shown that the difference in load transfer coefficients in these systems should be taken into account when selecting sensor sensitivity and configuring automated wire weight monitoring (AWM) data processing algorithms.

Keywords: overhead catenary, ice accretion, glaze-ice and rime depositions, tension compensator, two-block system, three-block system, strain-gauge monitoring, force increment, automated wire weight monitoring system.

For citation: Chernykh, V. N. Mathematical justification of direct and inverse dependences for determining ice load in block compensators of the overhead contact network / V. N. Chernykh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 37–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_37.

Сведения об авторах**Черных Владимир Николаевич**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы электротехники»,
ассистент,
e-mail: v0l4nd94@yandex.ru

Information about the authors**Chernykh Vladimir Nikolayevich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Basis of Electrical
Engineering”,
Assistant,
e-mail: v0l4nd94@yandex.ru