

УДК 621.3.084.2;621.316.925

Дифференцирующие измерительные преобразователи тока для релейной защиты и автоматики в сетях высокого напряжения

Г.Е. Кувшинов, д-р техн. наук, А.Н. Козлов, Ю.В. Мясоедов, кандидаты техн. наук, Ю.А. Андреенко, И.А. Богодайко, инженеры, А.С. Зинкеева, асп.

Приведено описание вариантов конструктивного исполнения дифференцирующих измерительных преобразователей тока. Рассмотрены факторы возникновения погрешностей измерения, а также способы компенсации помех.

Ключевые слова: дифференцирующий измерительный преобразователь тока, конструктивное исполнение, помехи, компенсация.

Differentiate Measuring Current Converters for Relay Protection and Automatics in High-Voltage Power Networks

G.E. Kuvshinov, Doctor of Engineering, A.N. Kozlov, Yu.V. Myasoedov, Candidates of Engineering, Yu. A. Andreenko, I.A. Bogoda'ko, Engineers, A.S. Zinkeeva, Post Graduate Student

The article contains the description of structural variations of differentiate measuring current converters. The authors consider the factors of inaccuracy in measurement, as well as the ways of negating restrictions.

Key words: differentiate measuring current converter, structural variatins, restrictions, compensation.

Разработка релейной защиты и автоматики (РЗА) электроэнергетических систем в последнее десятилетие сопровождается процессом замены электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) на дифференцирующие индукционные преобразователи тока (ДИПТ). Этот процесс обусловлен следующими недостатками ТТ: большой массой ТТ, в сотни и более раз превышающей массу ДИПТ с теми же значениями первичного тока; большими значениями выходных напряжений, возникающих при обрыве цепи вторичной обмотки; насыщением и остаточной намагниченностью магнитного сердечника, приводящих к большим погрешностям измерений и изменениям или ложным срабатываниям защиты при измерении токов с высокой кратностью и токов, содержащих апериодическую составляющую.

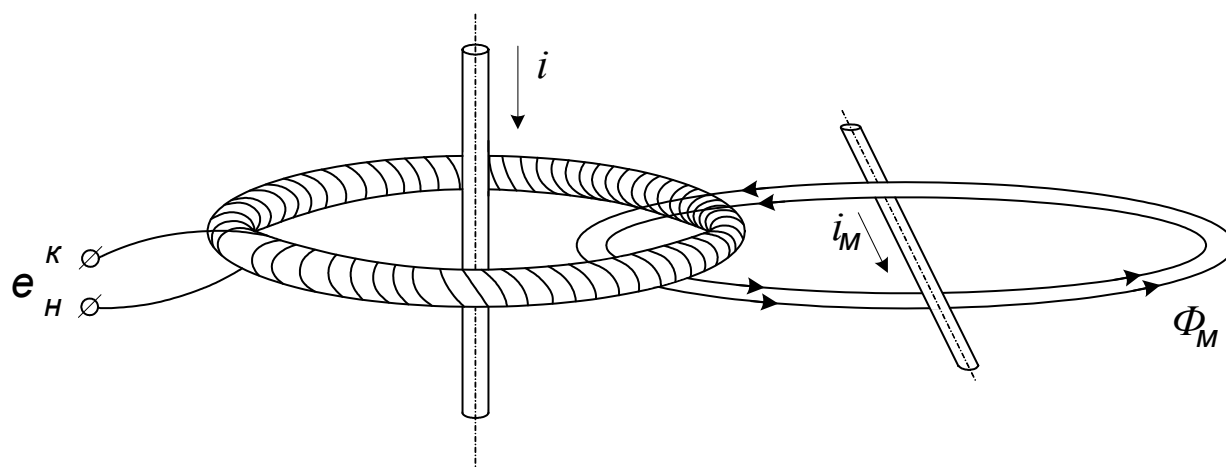
ДИПТ, как и ТТ, являются измерительными преобразователями трансформаторного типа, но выходным сигналом ДИПТ, работающего в режиме, близком к холостому ходу, является не ток вторичной обмотки, а снимаемое с нее напряжение, пропорциональное производной измеряемого тока. ЭДС вторичной обмотки ТТ, который работает в режиме, близком к короткому замыканию, в десятки раз больше ее выходного напряжения, а ток вторичной обмотки ТТ в сотни раз больше, по сравнению с током вторичной обмотки ДИПТ. Этим и объясняется огромная разница между массами ДИПТ и ТТ. ДИПТ могут иметь разомкнутый

магнитный сердечник (как у трансреактора или магнитного трансформатора тока), что устраняет недостатки, обусловленные наличием замкнутого магнитопровода, или выполняться вообще без магнитного сердечника (как у воздушного трансформатора тока или катушек Роговского), что полностью устраняет эти недостатки [1–3].

Современные ДИПТ, предназначенные для измерения токов в сетях высокого напряжения, не имеют магнитного сердечника, их катушка (вторичная обмотка) охватывает токопровод с измеряемым током i , как и у проходных ТТ (рис. 1). Тороидальная катушка с диаметром осевой линии D имеет w круглых витков со средним (для многослойных катушек) диаметром d . ЭДС e , которая наводится в катушке ДИПТ током i , равна $e = M(di/dt)$, где M – взаимная индуктивность между токопроводом с измеряемым током и катушкой; t – время. Если соблюдены условия: плоскость, в которой расположена осевая линия катушки, перпендикулярна оси токопровода с током i ; эта ось проходит через центр осевой линии катушки, а размеры витков внутреннего слоя катушки мало отличаются от размеров витков наружного слоя, то указанная взаимная индуктивность определяется формулой [4]

$$M = \frac{\mu_0 w}{2} \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Рис. 1. Магнитная связь катушки ДИПТ с измеряемым i и мешающим i_M токами

Формула индуктивности L такой катушки, справедливая при выполнении дополнительных условий (витки катушки уложены равномерно как по длине, так и в радиальном направлении (для многослойной катушки), имеют бесконечно тонкую изоляцию и плотно заполняют все пространство, занятое обмоткой), имеет также вид (1), т. е.

$$L = \frac{\mu_0 w^2}{2} \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}}. \quad (2)$$

При выполнении всех вышеназванных условий отличие значений M и L , рассчитанных по выражениям (1), (2) от действительных незначительно, и им в технических расчетах можно пренебречь [4].

При выполнении условия $d^2 \ll D^2$ формулы (1), (2) принимают более простой вид:

$$M = \frac{\mu_0 w S}{\pi D}, \quad L = \frac{\mu_0 w^2 S}{\pi D}, \quad (3)$$

где s – сечение витка.

Формулы (3) справедливы для любой формы сечения витка, если выполняется условие $c^2 \ll D^2$, где c – наибольший размер сечения витка в радиальном, по отношению к оси токопровода с измеряемым током, направлении.

Широко известные катушки Роговского фирм *PEM* и *LEM* выполнены в виде однослойной катушки, намотанной на гибкой тонкой трубке, начало которой сопряжено с соединительным коаксиальным кабелем, который подключен к выводам катушки. Свободный конец трубки пропускают вокруг токопровода с измеряемым током и состыковывают с началом трубки. При такой конструкции катушки нарушены два условия из приведенных выше: форма осевой линии отличается от окружности и тем сильнее, чем ближе участок катушки к месту сопряжения ее концов. Кроме того, на концевых участках катушки обмотка отсутствует. Поэтому погрешность измерения тока, равная 0,5 % при расположении токопровода в центральной области петли, образованной гибкой катушкой, вырастает до 2–3 % при при-

ближении токопровода к катушке. Если же тонкий токопровод вплотную прилегает к стыку концов катушки, то погрешность измерения гибких катушек Роговского фирмы *PEM* выходит за 4 %.

Катушки ДИПТ, предназначенные для защиты оборудования в сетях высокого напряжения, в целях обеспечения надежности работы и легкой доступности при обслуживании следует размещать вокруг той части высоковольтных вводов, которая непосредственно примыкает к корпусу трансформатора или выключателя. В таких случаях отклонение формы осевой линии катушки от окружности практически отсутствует, форма поперечного сечения токопровода не имеет значения, а погрешность измерения, вызванная смещением оси токопровода относительно центра осевой линии катушки, ничтожна, если длина необмотанных участков по концам катушки пренебрежимо мала по сравнению с диаметром ее осевой линии.

У ДИПТ без магнитного сердечника с однослойной обмоткой имеется существенный недостаток, по сравнению с ТТ, – это низкая помехозащищенность от переменных магнитных потоков, которые созданы посторонними, мешающими токами и сцеплены с катушкой ДИПТ. Указанный недостаток, вероятнее всего, и явился причиной того, что первое, имевшее место почти 70 лет назад, успешное применение ДИПТ для дифференциальной защиты шин [6, 7] долгие годы не получало дальнейшего развития, пока не были найдены способы борьбы с этим недостатком.

Инструментальная погрешность измерения производной измеряемого тока обусловлена наличием ЭДС помехи. Эти ЭДС индуцируются в катушке ДИПТ мешающими магнитными потоками, которые сцеплены с катушкой, но создаются не измеряемым, а другими, мешающими токами. Проводники с мешающими токами не проходят через окно катушки ДИПТ. ЭДС помехи делятся на две разновидности, в

зависимости от того, каким образом порождающие эти ЭДС мешающие магнитные потоки сцеплены с катушкой ДИПТ.

ЭДС помехи первого вида индуцируется таким магнитным потоком Φ_M , который замыкается через окно катушки, как показано на рис. 1. Этот поток вызван действием намагничивающей силы мешающего тока i_M . Спираль катушки практически эквивалентна некоторому, проходящему по осевой линии катушки круговому витку, сцепленному с потоком Φ_M . Если магнитная индукция этого потока соизмерима с магнитной индукцией потока, созданного измеряемым током i и сцепленного с витками катушки, а величина $(D/d)^2$ близка к числу витков катушки w , то возникающая ошибка от наличия мешающего потока соизмерима с полезным сигналом.

ЭДС помехи второго вида индуцируется мешающими магнитными потоками, которые, не замыкаясь через окно катушки ДИПТ, сцеплены с ее витками. Это такая ЭДС, которая обусловлена намагничивающей силой тока токопровода, параллельного токопроводу с измеряемым током i , но не проходящему через окно катушки ДИПТ. Типичный случай – это ЭДС, которые наводятся в катушке ДИПТ, охватывающей один ввод в силовой трансформатор или выключатель, токами, проходящими через другие вводы такого устройства. ЭДС помехи второго вида может индуцироваться в тороидальных катушках только в случае, когда нарушена равномерность их намотки. Во-первых, шаг намотки или диаметр каркаса катушки могут быть не строго постоянными, осевая линия катушки может отличаться от окружности. При серийном производстве катушек ДИПТ такие погрешности изготовления отсутствуют. Во-вторых, могут иметься участки каркаса без наложенных на них витков. У любой тороидальной катушки имеется один такой участок небольшой протяженности – между концом обмотки и ее началом. Если катушка имеет неразъемную конструкцию, то проходящий через ее окно токопровод монтируется после установки катушки. В этом случае длина необмотанного участка крайне мала и ЭДС помехи второго вида практически отсутствует. ЭДС помехи второго вида может иметь заметное значение, когда катушка ДИПТ выполнена разъемной. Такая катушка предназначена для установки вокруг уже смонтированного, неразъемного токопровода. Возможно также

использование секционированной катушки, когда ее секции разделены необмотанными участками каркаса катушки.

В общем случае проводник с мешающим током может быть причиной ЭДС помех первого и второго вида одновременно.

От ЭДС помехи первого вида можно избавиться очень просто – путем компенсации ЭДС, наводимой потоком Φ_M , другой ЭДС, которая имеет такое же абсолютное значение, но направлена в противоположную сторону. Для этого нужно рядом с эквивалентным витком расположить другой, компенсирующий, который включен последовательно с катушкой во встречном по отношению к эквивалентному витку направлении. В упомянутых гибких катушках Роговского фирм *PEM* и *LEM* компенсирующий виток образует провод, который проходит внутри трубчатого каркаса катушки и соединяет конец катушки с коаксиальным кабелем.

На рис. 2 показан другой вариант конструкции катушки ДИПТ, при котором ЭДС катушки не содержит погрешность измерения первого рода [8], – разрез катушки выполнен цилиндром, ось которого совпадает с осью этой катушки, а диаметр цилиндра равен диаметру D осевой линии 1 катушки. Катушка состоит из n двухслойных секций (секционных катушек) 2, равномерно размещенных вдоль немагнитного тороидального каркаса 3, выполненного на основе эластичного полого стержня. Длина секций и расстояние между ними равны соответственно a и b . Катушку ДИПТ выполняют из секций, которые являются короткими соленоидами. Небольшая длина соленоидов облегчает их установку на каркас. Стыковочные поверхности 4, находящиеся на концах эластичного стержня, плотно соединяются одна с другой после установки катушки на соединительную втулку высоковольтного ввода выключателя. Общее число витков катушки – w . Обмотки внутреннего 5 и внешнего 6 слоев каждой секции имеют одинаковый шаг. Секционные обмотки внутреннего слоя намотаны по правилу правого винта, а наружного – по правилу левого винта (возможен и другой вариант: внутренний слой намотан по правилу левого винта, а наружный – по правилу правого винта). Число витков каждой из этих обмоток равно $w/2n$. Каркас 3 может иметь различную форму поперечного сечения, например прямоугольную или круглую. Каждая из этих и возможных других форм имеет и достоинства и недостатки.

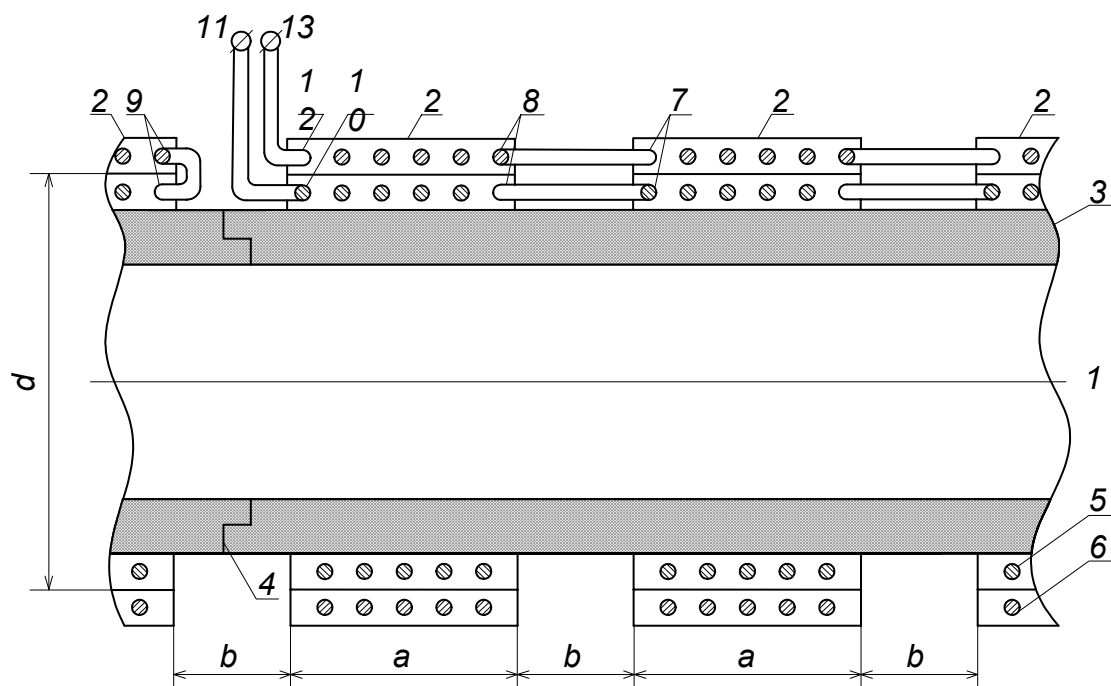


Рис. 2. Схема конструкции двухслойной катушки ДИПТ: 1 – осевая линия катушки; 2 – двухслойные секции; 3 – немагнитный каркас; 4 – стыковочные поверхности; 5 – внутренний слой обмотки; 6 – наружный слой обмотки; 7 – начала обмоток секций; 8 – концы обмоток секций; 9 – концы последних секционных обмоток; 10 – начало первой секционной обмотки внутреннего слоя; 11 – начало катушки ДИПТ; 12 – начало первой секционной обмотки наружного слоя; 13 – конец катушки ДИПТ; a – длина секций; b – расстояние между секциями

Применение катушки с каркасом кругового сечения позволяет уменьшить расход обмоточного провода. Тонкая секционная круговая катушка наиболее проста в изготовлении. Но она проигрывает катушке с каркасом прямоугольного сечения по возможности жесткого закрепления секций на тороиде, что необходимо для исключения поворота секции вокруг ее оси. Все обмотки каждого слоя соединены последовательно. При этом начала 7 обмоток всех секций, кроме первой, подключены к концам 8 предыдущих секций. Концы 9 последних секционных обмоток обоих слоев соединены друг с другом. Начало 10 первой секционной обмотки внутреннего слоя подключено к началу 11 катушки ДИПТ, а начало 12 первой секционной обмотки наружного слоя подключено к концу 13 этой катушки.

Благодаря указанному соединению обмоток внутреннего и внешнего слоев, ЭДС обмоток этих слоев, которые индуцируются потоком, созданным измеряемым током и проходящим вдоль осевой линии катушки, складываются арифметически одна с другой. Те же ЭДС, которые индуцируются в эквивалентных витках этих слоев мешающим магнитным потоком, проходящим сквозь окно катушки, арифметически вычитаются одна из другой. Так как расстояние между слоями очень мало по сравнению с диаметрами эквивалентных витков, то потокосцепления мешающего потока с эквивалентными витками практически одинаковы, а их разность ничтожно мала. Тем самым ликви-

дируется влияние переменных мешающих потоков, проходящих сквозь окно катушки ДИПТ.

Результаты теоретических исследований показали, что чем больше n и отношение a/b , тем меньше ЭДС помехи второго вида. Погрешность от мешающего тока, значение которого одинаково со значением измеряемого тока, меньше 0,7 %, если соблюдаются следующие ограничения: число секций должно быть не меньше двух при таком зазоре между ними, которому соответствует центральный угол не более 10° , а расстояние между токопроводами с измеряемым током и мешающим током другой фазы – не меньше трех радиусов осевой линии, на которой расположены центры витков катушки ДИПТ. Если же при прочих равных условиях увеличить число секций до шести, то эта погрешность снизится до 0,03 %.

Эти и другие результаты получили подтверждение при экспериментальном исследовании ряда секционных катушек. В частности, еще в 1999 г. с помощью катушки, составленной из 20 двухслойных секций по 300 витков в каждой секции ($a = 0,035$ м, $d = 0,052$ м), было проведено измерение токов до 14 кА во всех трех фазах гидрогенератора ГА-4 Зейской ГЭС [9]. Следует особенно отметить, что катушка ДИПТ располагалась вокруг электромагнитного алюминиевого экрана (диаметр экрана 740 мм, толщина 5,5 мм) токопровода генератора, причем экраны токопроводов были заземлены только с одной стороны. Эти испытания, которые, скорее всего, проводились впервые с ис-

пользованием ДИПТ с таким большим диаметром осевой линии, да еще на экранированном токопроводе, оказались успешными. Они показали высокую точность измерений, практическое отсутствие ЭДС помехи и возможность измерения токов в токопроводах, защищенных электромагнитными экранами. Получило наглядное подтверждение огромное преимущество ДИПТ по массе, по сравнению со штатными ТТ (ТШЛ-20).

Наряду с упомянутыми достоинствами секционированных двухслойных катушек у них есть и недостаток: индуктивность секционированной катушки несколько (до 40–50 %) превосходит индуктивность катушки со сплошной намоткой. Из-за падения напряжения в индуктивном сопротивлении катушки вектор ее выходного напряжения отстает от вектора ЭДС, индуцированной измеряемым синусоидальным током. Следовательно, возникает фазовая погрешность измерения, и тем большая, чем больше индуктивность катушки. Но этот эффект может быть легко скомпенсирован в процессе преобразования выходного напряжения ДИПТ.

В настоящее время начинают применяться катушки Роговского, изготовленные по новейшей технологии: в виде печатных плат с обмотками, отпечатанными на одной или двух расположенных встречно платах. При таком исполнении витки катушки имеют прямоугольное сечение. Высота витка при исполнении катушки из двух плат достигает 2 см [10].

Разработаны также катушки Роговского с двумя последовательно включенными печатными обмотками. Горизонтальные отпечатанные участки витков этих обмоток чередуются. С помощью вертикальных соединений получаются две соединенные своими концами обмотки. Одна из обмоток выполнена по правилу правого винта, а другая – левого. Следовательно, в таких обмотках реализован тот же принцип компенсации ЭДС помехи первого вида, что и в конструкции катушки, показанной на рис. 2. Известные к настоящему времени ка-

тушки с печатными обмотками не имеют пока таких размеров своего окна и требуемой площади витка, чтобы устанавливать эти катушки вокруг изоляторов высоковольтных вводов. Поэтому для релейной защиты и автоматики в сетях высокого напряжения целесообразно применять катушки ДИПТ традиционного способа исполнения. Но, вполне возможно, в будущем и их место займут катушки с печатными обмотками.

Список литературы

1. **Андреев В.А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высш. шк., 1991. – 496 с.
2. **Shepard D.W., Yuach D.W.** An overview of Rogowski coil current sensing technology. – Grove City, Ohio: LEM DynAmp Inc, 1999. – 13 p.
3. **Ray W.F., Hewson C.R.** Practical Aspects of Rogowski Current Transducer Performance. PEM_paper_PCIM 2001. – 6 p.
4. **Калантаров Г.А., Цейтлин Л.А.** Расчет индуктивностей: справочник. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
5. **Application Notes.** Power Electronic Measurements Ltd. Sept. 2002. www.pemuk.com
6. **Linear Couplers for Bus Protection / E.L. Harder, E.H. Klemmer, W.K. Sonnemann, E.C. Wentz // AIEE Trans., 61 (1942), pp. 241–248.** Discussions, p. 463.
7. **Атабеков Г.И.** Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 344 с.
8. **Измерительное устройство дифференциальной токовой защиты шин / Г.Е. Кувшинов, Ю.И. Мясоедов, А.С. Нагорных, И.А. Богодайко; заявка на изобретение № 2009126293/28(036596); положительное решение о выдаче патента на изобретение от 24 февраля 2010 г.**
9. **Богодайко И.А., Константинов Н.С., Кувшинов Г.Е.** Измерение тока гидрогенераторов Зейской ГЭС с помощью дифференцирующих измерительных преобразователей // Состояние и проблемы измерений: мат-лы VII Всерос. науч.-техн. конф. – Москва: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2000. – С. 124–125.
10. **Кожович Л.А., Бишоп М.Т.** (Cooper Power Systems, США). Современная релейная защита с датчиками тока на базе катушки Роговского // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 7–10 сентября 2009). – М.: Научно-инженерное информационное агентство, 2009. – С. 39–48.

Кувшинов Геннадий Евграфович,

Дальневосточный государственный технический университет (ДВГТУ),
доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования и автоматики транспорта,
телефон (4232) 43-24-89,
адрес: г. Владивосток, ул. Пушкина, д. 10,
e-mail: kuvsh@marine.febras.ru

Козлов Александр Николаевич,

Амурский государственный университет,
кандидат технических наук, доцент кафедры энергетика,
телефон (4162) 36-49-06,
адрес: г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, д. 21,
e-mail: kozlov1951@yandex.ru

Мясоедов Юрий Викторович,
Амурский государственный университет,
кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой энергетики,
телефон (4162) 39-46-33,
адрес: г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, д. 21,
e-mail: myasoedov@amur.ru

Андреев Юрий Андреевич,
ООО «Дальневосточная распределительная сетевая компания» (ООО «ДРСК»),
генеральный директор,
телефон (4162) 39-73-59,
адрес: г. Благовещенск, ул. Шевченко, д. 28.

Богодайко Игорь Александрович,
Амурский филиал ОАО «Дальсвязь»,
инженер,
телефон 8-924-142-59-26.

Зинкеева (Нагорных) Анна Сергеевна,
Амурский государственный университет,
аспирант кафедры энергетики,
телефон 8-914-608-45-89.