

4. Хандов, З. А. Судовые двигатели внутреннего сгорания / З. А. Хандов. — М. : Транспорт, 1969. — 304 с.
5. Теория двигателей внутреннего сгорания / Н. Х. Дьяченко [и др.]. — Л. : Машиностроение, 1974. — 552 с.
6. Камкин, С. В. Эксплуатация судовых дизелей / С. В. Камкин, И. В. Возницкий, В. П. Шмелев. — М. : Транспорт, 1990. — 344 с.
7. Шароглазов, Б. А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов / Б. А. Шароглазов, М. Ф. Фарафонов, В. В. Климентьев. — Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2004. — 344 с.
8. Макушев, Ю. П. Агрегаты наддува двигателей / Ю. П. Макушев, С. В. Корнеев, В. В. Рындин. — Омск : Изд-во СибАДИ, 2006. — 58 с.
9. Шквар А. Я. О влиянии рециркуляции воздуха через компрессор на работу судового двигателя 8ЧН25/34 / А. Я. Шквар, В. С. Наливайко, С. Н. Литвин // Судовое энергомашиностроение. Николаевский кораблестроительный институт им. адм. С. О. Макарова. — Николаев, 1985. — С. 11–14.

ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: vedruchenkovr@mail.ru

КРАЙНОВ Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: KrainovVV@omgups.ru

ЛАЗАРЕВ Евгений Сергеевич, преподаватель, инженер кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: Incoe@yandex.ru

ЛИТВИНОВ Павел Васильевич, аспирант кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: p_vasilich55@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.10.2016 г.

© В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Е. С. Лазарев, П. В. Литвинов

УДК 621.318

**В. К. ФЕДОРОВ
Е. Н. ЛЕОНОВ
Д. В. ФЕДОРОВ**

Омский государственный
технический университет

Тюменский индустриальный
университет

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ПОТЕРИ И КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В данной статье представлен качественный анализ влияния источников распределенной генерации (РГ) на работу электрических сетей с большим проникновением РГ. Обсуждается влияние РГ на потери электрической энергии и напряжения, а также на показатели качества электроэнергии. Анализ указанной проблемы позволяет сделать вывод, что влияние РГ в значительной степени зависит от степени проникновения РГ в распределительную сеть и режима работы источников РГ.

Ключевые слова: распределенная генерация, потери напряжения и мощности, качество электроэнергии.

Технические, политические и экологические факторы в последнее время стимулируют относительно быстрый рост числа установок распределенной генерации (РГ) в мире. При этом общая установленная мощность РГ в Российской Федерации остается небольшой, и ее влияние на работу энергосистемы остается незначительной. Однако, по мере того как установленная мощность РГ увеличивается, влияние, которое она оказывает на сеть, будет усиливаться. Характеристика и количественная оценка этого воздействия является достаточно сложной научно-технической задачей, поскольку должны быть проанализированы одновременно аспекты функционирования системы контроля напряжения, координации релейной защиты, потерь и качества электроэнергии, надежности и многие другие. Некоторые из этих аспектов также неразрывно свя-

заны с процессами устойчивости энергосистемы, и, следовательно, они должны быть рассмотрены в исследованиях общей надежности работы энергосистем.

Чтобы произвести оценку влияния РГ на работу энергосистемы, в данной статье выполнен анализ взаимодействия энергосистемы с сетями, имеющими большую долю РГ.

Важность влияния РГ на эксплуатацию, устойчивость и управление энергосистемы признали уже в конце 1970-х годов. Одна из самых интересных публикаций на эту тему [1]. В конце 1990-х годов эта тема вызвала интерес в научных и производственных кругах, что вылилось в большое количество публикаций как за рубежом [2–4], так и в России [5, 6].

Одним из наиболее существенных факторов, влияющих на взаимодействие между РГ и энерго-

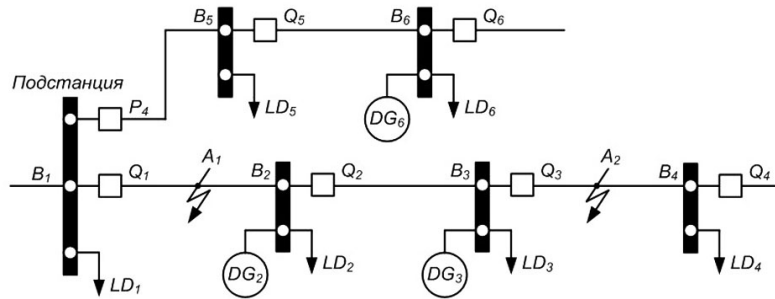


Рис. 1. Распределительная сеть с распределенной генерацией

системой, являются вид технологии, используемой в РГ, а также режим управления и эксплуатации РГ.

Чтобы провести качественную оценку влияния РГ на распределительную сеть, рассмотрим такие аспекты работы энергосистемы, как контроль напряжения, потери мощности, качество электроэнергии.

Сеть состоит из шести узлов — шин (B_1, \dots, B_6), с нагрузкой, подключенных к каждой шине (LD_1, \dots, LD_6) и трех распределенных генераторов (DG_1, \dots, DG_3), подключенных к шинам B_2, B_3 и B_6 (рис. 1).

В энергосистеме при сравнении мощности генераторов с мощностью нагрузки возможны следующие случаи:

Случай 1: нагрузка каждого узла всегда больше или равна мощности распределенного генератора в каждом узле, т. е.

$$LD_i \geq DG_i, \forall i.$$

Такой вариант характерен для систем РГ, содержащих фотоэлектрические элементы, двигатели Стирлинга или небольшие ветровые генераторы.

Случай 2: мощность РГ генератора хотя бы в одном узле больше нагрузки на том же узле, однако суммарная мощность РГ в распределительной сети будет меньше, чем сумма всех нагрузок в системе, т. е.

$$\exists i \in N : (LD_i < DG_i) \wedge \left(\sum_{k=1}^n LD_k \geq \sum_{k=1}^n DG_k \right),$$

где $N = \{k\}_{k=1}^6$.

Этот случай может возникнуть, если один из генераторов РГ получает энергию от ветра.

Случай 3: распределенная генерация как минимум в одном узле больше нагрузки в этом же узле и сумма всех генераторов РГ в распределительной сети больше, чем сумма всех нагрузок в системе, т. е.

$$\sum_{k=1}^n LD_k < \sum_{k=1}^n DG_k.$$

Этот случай может возникнуть при подключении мощного ветрогенератора к концу распределительной сети, в то время как центры нагрузки обычно не расположены в районах с высокими скоростями ветра. В этом случае выходная мощность ветропарка часто может превосходить потребляемую мощность.

Следует отметить, что нагрузки в распределительной сети могут меняться с течением времени. Это, например, весьма характерно, если в распределительной сети ветроэлектростанции несут большую часть времени значительный объем нагрузки (случай 2). Однако два других варианта также вероятны, например, случай 1 при небольшой скорости ветра и случай 3 в период с очень высокими скоростями

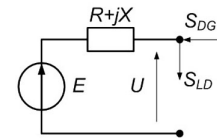


Рис. 2. Упрощенная модель электрической системы с РГ

ветра и низкими нагрузками потребителей (например, ночью).

Влияние на потери. Чтобы объяснить влияние РГ на работу сети с учетом различных соотношений X/R , используется простейшая модель энергосистемы с источниками E и S_{DG} , одной линией электропередачи и нагрузкой S_{LD} (рис. 2).

В модели, представленной на рис. 2, E представляет собой источник напряжения, а U является конечным напряжением у потребителя. Если мы предположим, что напряжение у потребителя, а также ток нагрузки известны, то получим уравнения, устанавливающие связь между мощностью РГ и связанное с этим уменьшение потерь в линии.

Предположим, что источник РГ не подключен. Тогда потери мощности:

$$S_{loss} = (E - U) \cdot I' = (E - U) \cdot (I_{LD,a} - jI_{LD,r}),$$

где $I_{LD,a}$ и $I_{LD,r}$ обозначают активную и реактивную составляющие тока нагрузки.

Теперь предположим, что подключен РГ, производящий только активную мощность ($\cos\varphi = 1$) и также предположим для простоты, что напряжение на приемном конце поддерживается постоянным. Тогда нетрудно увидеть, что потери мощности:

$$S_{loss}^{DG} = (E - U) \cdot (I_{LD,a} - I_{DG} - jI_{LD,r}).$$

Таким образом, наличие РГ снижает потери мощности на величину

$$S_{loss} - S_{loss}^{DG} = (E - U) \cdot I_{DG}.$$

При этом изменение напряжения на приемном конце не учитывается, поскольку не является существенным для анализа.

Подводя итог, можно сделать вывод, что внедрение распределенной генерации уменьшает ток, протекающий через линию электропередачи, уменьшая, таким образом, активную, а также реактивную потери мощности.

Тогда можно сказать следующее:

случай 1 — РГ всегда приведет к уменьшению потерь на всех линиях в распределительной сети;

случай 2 — РГ может привести к увеличению потерь на некоторых линиях, но общие потери в распределительной сети уменьшатся;

случай 3 — РГ может привести к увеличению потерь на некоторых линиях, но общие потери в распределительной сети будут снижены, пока общий объем РГ будет меньше общей нагрузки в распределительной сети примерно в два раза.

Если РГ превышает примерно в два раза общую нагрузку в распределительной сети, то потери в распределительной сети будут больше при РГ, чем без нее.

В системе распределения колебания напряжения возникают при изменении тока нагрузки, протекающего через резистивные и реактивные сопротивления линий. Колебания напряжения в распределительных сетях без РГ вызваны изменением во времени активных и реактивных нагрузок в распределительной сети. Колебания, как правило, бывают большими к концу линии из-за высокого сопротивления линии. Кроме того, колебания напряжения более существенны, если нагрузка сконцентрирована в конце системы (радиальные сети). На практике для типовых распределительных сетей расстояние, прежде чем падение напряжения превысит допустимое отклонение от номинального значения, составляет всего несколько километров. Однако линии, как правило, не предназначены для работы при таких уровнях нагрузки. Углубленное аналитическое обсуждение влияния РГ на напряжения в сетях низкого напряжения можно найти, например, в [7, 8].

РГ может влиять на колебания напряжения в двух направлениях:

1. РГ осуществляется в соответствии с требованиями локальной нагрузки. Это означает, что при росте локальных нагрузок в распределительной сети производство энергии РГ также увеличивается и наоборот. В данном случае, РГ способствует сокращению различий между максимальным и минимальным уровнями напряжения по сравнению с ситуацией без РГ. Этот режим работы РГ не создает никаких проблем для традиционного подхода регулирования напряжения.

2. Выходная мощность РГ регулируется независимо от величины локальной нагрузки. Этот режим контроля осуществляется, если РГ управляется при помощи оценки сигналов, которые могут или не могут соответствовать локальным колебаниям нагрузки, или технология РГ зависит от наличия природных ресурсов, таких как солнечная энергия или энергия ветра. В этом случае РГ может негативно повлиять на возможность регулирования напряжение сети за счет увеличения разности между максимальным и минимальным уровнями напряжением по сравнению с ситуацией без РГ. Это происходит вследствие того, что минимальный уровень напряжения может оставаться неизменным, например, при ситуации с повышенной нагрузкой без РГ, а максимальный уровень напряжения может увеличиться, например, при ситуации с низкой нагрузкой и РГ.

РГ может представлять некоторые проблемы для традиционного контроля и регулирования напряжения. Например, во время высокой нагрузки в сети, показанной на рис. 1, регулирующий трансформатор (не показан) на подстанции позволит повысить напряжение источника, чтобы сохранить напряжение в концах линии (узлах V_4 и V_6) в необходимом диапазоне напряжения. В случае мощной установки РГ в узле V_6 и отсутствии источника РГ в узле V_4 напряжение узла V_6 , возникающее из-за РГ, может достигать значения, характерного при перенапряжении, а напряжение в узле V_4 достигнуть нижней границы напряжения из-за высокой нагрузки. Традиционный

режим работы регулирующего трансформатора на подстанции для такой ситуации не подходит, так как он предполагает падение напряжения на всех линиях по мере удаления от трансформатора.

Самым простым способом решения этой проблемы будет уменьшение выходной мощности РГ. Это решение будет наиболее экономичным решением для оператора сети, но, наверное, не для владельца РГ.

Другим, более затратным, решением станет установка более умной и гибкой схемы управления напряжением в системе распределения, основанной на автоматизации подстанции и современных коммуникационных технологиях. Эта технология позволит воспринимать уровень напряжения в разных точках сети (обычно в конце линии). В этом случае устройства РПН на подстанции могут динамически регулироваться в соответствии с входными данными измерений. Кроме того, если применяемая РГ имеет возможность динамического изменения коэффициента мощности, то РГ может быть использована для местного регулирования напряжения. Целевой функцией будет сохранение изменения напряжения в распределительной сети в пределах допустимого уровня. Это уже сделано в некоторых ветроэнергетических проектах, где силовой электронный преобразователь используется для динамического регулирования напряжения в системе распределения. Таким образом, РГ с использованием силовых электронных преобразователей или синхронных генераторов могут быть использованы для динамического контроля напряжения.

При обсуждении влияния РГ на качество электрической энергии, как правило, существуют две основные проблемы, а именно, фликер напряжения и гармоники.

Если доля РГ является достаточно большой, а РГ подвержена частым и значительным изменениям, то фликер напряжения может ощущаться некоторыми электроприемниками.

Метод уменьшения фликера напряжения и его эффективность зависят от многих факторов и могут быть довольно сложными задачами. Самым простым способом снижения его влияния в таком случае будет требование к владельцу РГ сократить количество запускаемых источников. Если РГ взаимодействует с сетью через преобразователь, то относительно легко достичь уменьшения пусковых токов. В частности, потенциальными причинами фликера напряжения в ветроэлектростанциях считались изменение скорости ветра или изменение выходной мощности. Однако в конструкции современных ветротурбин внесены изменения, позволяющие эффективно избежать больших колебаний мощности в течение короткого периода времени.

Общепризнано, что наличие нелинейных элементов в системе электроснабжения, например, силовых преобразователей приводит к появлению гармоник. Силовые электронные устройства, используемые РГ, могут вызвать появление гармоник. Амплитуда и порядок гармонических токов, вносимых преобразователями постоянного / переменного напряжения, зависят от режима его работы. Например, принудительно коммутируемый преобразователь с широтно-импульсной модуляцией, работающий в линейном диапазоне, вносит только гармоники в области высоких частот, т.е. кратные несущей частоте. Последние достижения в области полупроводниковых технологий (например, IGBT-транзисторы) позволяют использовать более высокие несущие частоты, которые позволяют генерировать достаточно чистые си-

нусоиды в соответствии со стандартом. Преобразователи, выполненные на IGBT-транзисторах, используются для многих технологий РГ. Поэтому можно сделать вывод, что современные передовые технологии силовой электроники могут быть использованы для решения проблем качества электроэнергии, связанных с наличием РГ.

Теоретически РГ на основе преобразователей энергии могут быть использованы для уменьшения величины отклонений напряжения. В этом случае преобразователь должен выступать в качестве статического компенсатора реактивной мощности и динамического восстановителя напряжения. В принципе может быть разработан силовой электронный преобразователь, работающий в этих режимах, однако в настоящее время большинство преобразователей РГ не способны выполнять эту задачу. Основное условие заключается в том, что РГ должна обладать достаточной мощностью, чтобы компенсировать падения напряжения и поддерживать допустимый уровень напряжения во время резкого изменения нагрузки. Как отмечается в [9], улучшение качества электрической энергии в отношении отклонений напряжения с помощью РГ — «это хорошая функция для рассмотрения в будущем».

В квазистационарном режиме качественное воздействие РГ на величину напряжения практически неотличимо от большой (отрицательной) нагрузки. Действительно, коммутация большой нагрузки приводит к изменению величины напряжения, которая похожа на ту, что происходит при изменении выходной мощности РГ. Выходные колебания мощности большой нагрузки и РГ, использующей возобновляемые источники энергии, например, ветра или солнечной энергии, подчинены суточным и сезонным изменениям.

С другой стороны, во многих отношениях РГ влияет на качество энергии сети очень специфическим образом. Например, владелец РГ, если это позволяет технология РГ, имеет полный контроль за выходной мощностью и величиной напряжения РГ. Это отличается от ситуации с большими нагрузками, которые в большинстве случаев зависят от производственных процессов. Кроме того, подключение новой нагрузки не улучшает качество электроэнергии, в то время как РГ имеет возможность уменьшить гармонические составляющие напряжения, повышая качество энергии. Таким образом, сравнивая влияние РГ и нагрузки, имеющих сопоставимые значения, можно сделать вывод, что в целом влияние РГ на качество электрической энергии должно быть более положительным, чем эквивалентная нагрузка.

Среди наиболее важных факторов, определяющих стабильность напряжения системы питания, — это характеристики нагрузки и оборудование контроля напряжения сети. Чтобы подчеркнуть важность этого фактора, стабильность напряжения иногда называют стабильностью нагрузки. Как правило, реактивная мощность нагрузки и значение потерь реактивной мощности играют важную роль в возникновении проблем со стабильностью напряжения. Из-за побочных эффектов асинхронные двигатели и постоянные нагрузки особенно подвержены проблеме со стабильностью напряжения.

Стабильность напряжения — это динамическое явление, из чего следует, что для полноценного анализа стабильности напряжения может потребоваться полномасштабное моделирование поведения энергетической системы. В некоторых случаях, связанных с медленным изменением стабильности напряжения,

детальный динамический анализ не нужен; стабильность напряжения может быть соответствующим образом оценена по результатам анализа изменения тока нагрузки. Для простоты анализа реакцию на изменение нагрузки будем считать медленной, что позволяет использовать анализ потокораспределения для анализа стабильности напряжения.

Одним из важнейших факторов, влияющих на стабильность напряжения, является способность РГ соответствовать потреблению реактивной мощности (реактивной нагрузке и потерям). Таким образом, основное влияние РГ на стабильность напряжения в сети будет определяться углом мощности распределенного генератора. Рассмотрим теперь источники РГ с точки зрения их влияния на стабильность напряжения сети, т.е. их способность генерировать реактивную мощность.

Синхронные генераторы способны как генерировать, так и потреблять реактивную мощность. Таким образом, использование в качестве РГ перевозбужденных синхронных генераторов позволит обеспечить производство реактивной мощности на месте. Местная генерация реактивной мощности снижает ее перетоки от источника, тем самым уменьшая связанные с этим потери и отклонения напряжения. Как следствие, также улучшается стабильность напряжения.

В качестве графического инструмента для изучения стабильности напряжения в электроэнергетических системах традиционно используются $P-V$ диаграммы. Рис. 3 показывает теоретическое воздействие синхронного генератора на стабильность напряжения гипотетического узла. Как видно на рисунке, установка распределенного генератора ΔP , переносит рабочую точку, связанную с кривой $P-V$, из точки А в точку В, что приводит к повышению напряжения в узле на величину $V_{DG} - V_0$ и повышает стабильность напряжения: запас устойчивости увеличивается от m_0 до m_{DG} . Непосредственный вывод, который следует из этого, состоит в том, что РГ способствуют повышению стабильности напряжения в сети.

Полупроводниковые коммутируемые преобразователи линии всегда потребляют реактивную мощность. Величина потребляемой реактивной мощности может достигать 30 % от номинальной мощности преобразователя. Чтобы компенсировать реактивную мощность потребителя, в преобразователе на стороне переменного тока обычно устанавливаются конденсаторные установки. Это делает преобразователь эквивалентным асинхронному генератору с прямым подключением к линии. Таким образом, при определенном стечении обстоятельств, наличие такого преобразователя может негативно повлиять на стабильность напряжения.

Однако необходимо обратить внимание на следующие факты: последние достижения в области силовой электроники, которое вылилось в появление относительно недорогих устройств, обладающих превосходными техническими характеристиками. Кроме того, часто потенциал РГ достаточно мал, что делает экономически выгодным использование современных устройств силовой электроники. Поэтому можно предположить, что в ближайшем будущем большая часть силовой электроники преобразователей будет с самостоятельной коммутацией.

В целом, можно сделать вывод, что присутствие РГ не будет негативно влиять на стабильность напряжения. Доля РГ, сопряженной с преобразователями, постепенно растёт, снижая вероятность возникновения проблемы стабильности напряжения.

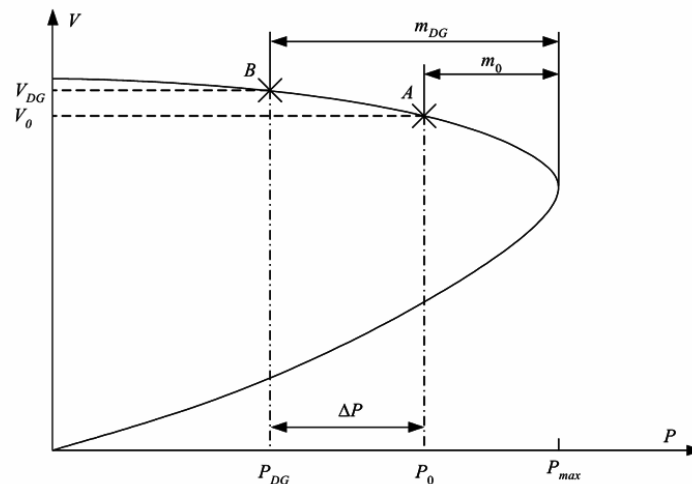


Рис. 3. P–V диаграмма: изменение стабильности напряжения

В заключение можно сделать следующий вывод о том, что максимально допустимое количество РГ, которые могут быть подключены к распределительной сети без ущерба для нормальной работы, является весьма конкретным для каждого случая и зависит от конкретных обстоятельств, связанных с функционированием как РГ, так и сети. Разработки в области РГ российских и зарубежных производителей позволяют говорить о том, что современные технологические установки РГ имеют достаточно высокую эффективность и при оптимальном размещении в распределительной сети не оказывают негативного влияния на нее.

Библиографический список

1. R. P. Schultz. Impacts of new technology and generation and storage processes on power system stability and operability. In Proceedings of DOE / ORNL Conference «Research needs for the Effective Integration of New Technologies into the Electric Utility», 1983, p 193–219.
2. Impact of embedded generation on distribution networks. Institution of Electrical Engineers (IEE). Digest №: 1996/191, London, UK, 1996.
3. CIRED. Technical Theme 4: Dispersed Generation, Management and Utilization of Electricity. Proceedings of 16th International conference on Electricity Distribution. Amsterdam, Netherlands, IEE Conference Publication №: 482, Part 1: Contributions, June 2001.
4. Micro Cogeneration: Towards Decentralized Energy Systems / M. Pehnt [et al.]. — Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. — 356 p.
5. Филипов, С. П. Малая энергетика в России / С. П. Филипов // Теплоэнергетика. — 2009. — № 8. — С. 38–44.

6. А. А. Бубенчиков. Возможности применения систем когенерации на территории России / А. А. Бубенчиков, М. И. Николаев, Г. Ю. Киселев, Н. В. Есипович, М. К. Феофанов, Д. О. Шкандюк [и др.] // Современная наука и практика. — 2015. — № 4 (4). — С. 90–93.

7. S. Conti, S. Raiti, G. Tina, and U. Vagliasindi. Study of the Impact of PV Generation on Voltage Profile in LV Distribution Networks. Proceedings IEEE Porto PowerTech 2001, September 2001.

8. Денисюк, С. П. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на електромережу та особливості побудови віртуальних електростанцій / С. П. Денисюк, Т. М. Базюк // Електрифікація транспорту. — 2012. — № 4. — С. 23–29.

9. R. Dugan and T. McDermott. Operating Conflicts for Distributed Generation on Distribution Systems. Rural Electric Power Conference, pages A3/1 – A3/6, Toronto, 2001.

ФЕДОРОВ Владимир Кузьмич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Омского государственного технического университета.

ЛЕОНОВ Евгений Николаевич, старший преподаватель кафедры электроэнергетики филиала Тюменского индустриального университета, г. Тобольск.

ФЕДОРОВ Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры электрической техники.

Адрес для переписки: Rysev_dmitry@list.ru

Адрес для переписки: leonov@tobii.ru

Статья поступила в редакцию 18.10.2016 г.

© В. К. Федоров, Е. Н. Леонов, Д. В. Федоров

Книжная полка

Кузнецов, И. Н. Основы научных исследований : учеб. пособие для бакалавров / И. Н. Кузнецов. — 2-е изд. - М. : Дашков и К, 2016. — 282 с.

В учебном пособии излагаются основы методологии, методики и техники научного труда, технология подготовки и написания выпускной квалификационной работы. Особое внимание уделяется методике работы с источниками информации. В удобной для восприятия форме приводятся наиболее важные сведения о порядке и правилах подготовки текста научной работы, оформления текстового и иллюстративного материала, а также рекомендации по подготовке к защите выпускных квалификационных работ. Для студентов бакалавриата и магистратуры, аспирантов.