Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Кафедра экологии

А. И. Навоша, Е. В. Гончарик, И. Ф. Лисименко, А. С. Рылов

**ОЦЕНКА СПОСОБОВ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Методическое пособие

Минск 2007

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники»

Кафедра экологии

А. И. Навоша, Е. В. Гончарик, И. Ф. Лисименко, А. С. Рылов

**ОЦЕНКА СПОСОБОВ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Методическое пособие

для практических занятий по дисциплине

«Основы экологии и энергосбережения»

Минск 2007

УДК 621.039(075.8)

ББК 69.69 я 73

Н 45

**Навоша А.И.**

Н-45 Оценка способов передачи электроэнергии: метод. пособие по дисциплине «Основы экологии и энергосбережение» / А.И. Навоша, Е.В. Гончарик, И.Ф. Лисименко, А.С. Рылов – Мн.: БГУИР, 2007. – 18с.

ISBN 978‑985-488‑162‑3

Содержится краткая характеристика способов передачи электроэнергии. Рассматриваются понятия о реактивной мощности в линиях электропередачи и способах ее уменьшения. Приведены примеры решения задач с использованием изложенных методик и предложены варианты задач для самостоятельной работы студентов. В приложении приведены необходимые для решения задач справочные материалы. Пособие предназначено для студентов всех специальностей и форм обучения БГУИР.

УДК 621.039(075.8)

ББК 68,69 я 73

ISBN 978-985‑488‑162‑3 © Навоша А.И., Гончарик Е.В.,

Лисименко И.Ф., Рылов А.С., 2007.

© УО «Белорусский государственный

университет информатики и

радиоэлектроники», 2007.

**1. Краткая характеристика способов передачи электроэнергии**

Передача электроэнергии потребителю может осуществляться двумя способами: без повышения напряжения и с повышением напряжения. Для передачи электроэнергии применяются электрические сети, которые состоят из воздушных или кабельных линий электропередачи (ЛЭП), трансформаторных подстанций, распределительных устройств.

Источник энергии, провода, приемник (потребитель) образуют неразветвленную электрическую цепь (рис. 1).

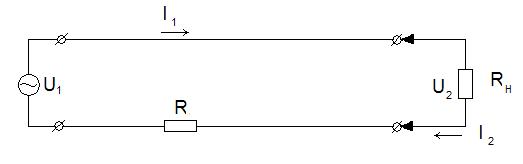


Рис. 1. ЛЭП без повышения напряжения

В основе анализа электрической цепи применяются закон Ома и формула для расчета мощности участка цепи, т.е.

и ,

где I – электрический ток, А; U – напряжение цепи, В; P – мощность, Вт.

Положим, что полезная нагрузка P, обусловленная сопротивлением потребителя Rн и сопротивлением цепи R, остаются постоянными. При этих допущениях полезная мощность P, передаваемая от источника потребителю, равна

и**.**

Потери энергии оцениваются выражениями

**** и

Относительная величина потерь составит



Так как  , а  , то получим



Следовательно, потери энергии при ее передаче обратно пропорциональны квадрату напряжения. По этой причине в линиях электропередачи используются высокие напряжения. Применение высоких напряжений позволяет передавать большие мощности на далекие расстояния при относительно малых сечениях провода.

При передаче энергии имеет место падение напряжения в проводах. Следовательно, напряжение в конце линии U2 меньше напряжения в начале U1. Разность между напряжениями U1 иU2 называют потерей напряжения ΔU, т.е. ΔU= U1 – U2. Потери напряжения объясняются сопротивлением проводов r0, которое оценивается выражением



где *l*—длина провода;

ρ—удельное сопротивление материала провода;

S—поперечное сечение провода.

Выразим величину потерь напряжения ΔU по закону Ома

 или 

Потеря напряжения обычно допускается небольшой по сравнению с напряжением U1 с целью экономии энергии и обеспечения незначительного колебания напряжения у потребителя при изменении сопротивления, а значит, и тока приемника.

Так, например, для электрических ламп допустимо изменение напряжения 1—2 %, для электродвигателей 2—5% номинального значения напряжений.

Очень часто при расчетах потерей напряжения задаются и определяют необходимое сечение провода:

 (1)

Выразим потерю напряжения в процентах напряжения у потребителя



Подставив значение ΔU в формулу (1), получим:

 (2)

Умножая числитель и знаменатель правой части выражения (2) на U2, получим:

 (3)

Рассчитанное сечение провода проверяется на нагрев.

При передаче энергии некоторая ее часть «теряется» в проводах. Мощность потерь оценивается выражением

 или 

*Пример 1.* Напряжение источника электроэнергии U1=220 В. Расстояние от источника до потребителя 1,0 км. Напряжение в конце линии электропередачи U2=215 В. Определить сечение медных проводов для передачи мощности P2=1,5 кВт и проверить сечение на нагрев.

Решение

1. Определяем допустимую потерю напряжения

 **.**

1. Выражаем потерю напряжения у потребителя в процентах

 **.**

3. Определяем сечение медного провода, у которого удельное сопротивление ρ=0,0175 Ом·мм2/м (табл. 1 прил. 1), по формуле (3)

 **.**

(Ближайшее стандартное сечение S=50 мм2, табл. 2 прил. 1).

4. Проверяем выбранное сечение на нагрев. Изолированный медный провод сечением 50 мм2 допускает ток 90 А.

Определяем ток в линии:



т.е. значительно меньше допустимого.

Второй способ передачи электроэнергии потребителю осуществляется путем изменения напряжения в ЛЭП с помощью трансформаторов (рис. 2).

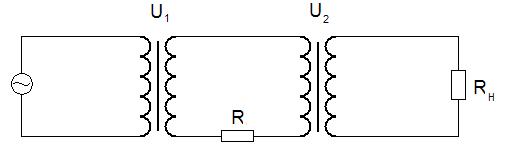


Рис. 2. ЛЭП с повышением напряжения

Наличие трансформаторов в передающих и распределяющих системах переменного тока приводит к возникновению индуктивного сопротивления и дополнительным потерям энергии за счет реактивной мощности.

Неразветвленная цепь переменного тока с последовательно включенными активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями приведена на рис. 3.

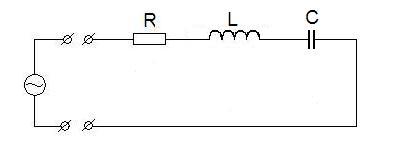


Рис. 3. Электрическая цепь с последовательно включенными активным и реактивными сопротивлениями

Переменное напряжение электрической цепи создает в ней переменный ток, который, в свою очередь, приводит к возникновению магнитного потока. Магнитный поток наводит в цепи электродвижущую силу (э. д. с.) самоиндукции. Таким образом, цепь с индуктивностью обладает индуктивным сопротивлением , величина которого увеличивается с ростом частоты.

В цепи, показанной на рис. 3, имеется также емкость. При переменном напряжении конденсатор периодически заряжается и разряжается. Это происходит вследствие того, что напряжение на его обкладках изменяется как по величине, так и по направлению.

Произведение емкости конденсатора С на угловую частоту  называется его проводимостью. Емкостное сопротивление, которое оказывает конденсатор переменному току, равно величине, обратной проводимости. Емкостное сопротивление Xc оценивается выражением  **.**

Напряжение, которое образуется на обкладках конденсатора, является причиной возникновения дополнительного емкостного сопротивления.

Электрическую цепь, в которой имеет место изменение магнитного и электрического полей, а также преобразование электрической энергии в тепловую, характеризуют тремя основными параметрами: сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Полное напряжение U в этой цепи состоит из напряжений на активном сопротивлении UA, на индуктивном UL и емкостном сопротивлении UC, т.е.



Выразив напряжения через ток и соответствующие значения сопротивлений, получим

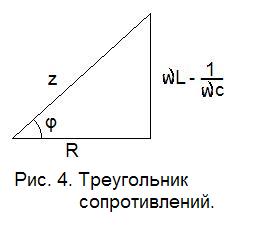
 **.**

Ток I, протекающий в цепи, оценивается выражением

 (4)

Формула (4) является математическим выражением закона Ома для цепи переменного тока, состоящей из активного R, индуктивного ωL и емкостного 1/ωС сопротивлений.

На рис. 4 показан треугольник сопротивлений для рассматриваемой электрической цепи.



Полное сопротивление для такой цепи Z может быть определено из выражения

 **.**

Из треугольника сопротивлений получим формулу для определения коэффициента мощности «косинуса фи», т.е.



Зная «косинус фи», можно найти угол сдвига фаз между током и напряжением, т.е. угол φ.

Из треугольника сопротивлений видно, что величина коэффициента мощности (cos φ) зависит от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлением.

Рассматриваемая электрическая цепь характеризуется полной (полезной) мощностью Pп. Полная мощность состоит из двух составляющих частей: активной Pa и реактивной Pр. Она рассчитывается из выражения

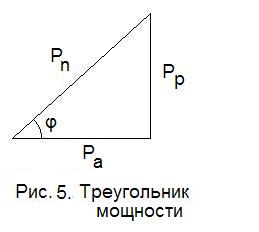
 **.**

Активная мощность затрачивается в электрической цепи на преобразование электрической энергии в тепловую (механическую, световую) энергию. Это преобразование происходит в активном сопротивлении R. Активная мощность оценивается соотношением

 **.**

Реактивная мощность характеризует часть электрической энергии, получаемую от источника переменного тока и возвращаемую обратно из цепи к источнику тока. Эта мощность связана с индуктивным сопротивлением и рассчитывается из соотношения



Реактивная мощность приводит к потерям энергии в ЛЭП. Эту мощность можно уменьшить, последовательно включив в цепь емкостное сопротивление XС в виде батареи конденсаторов.

Полная мощность и ее составляющие части, представленные в виде отрезков, образуют треугольник мощности (рис. 5).

О соотношении между активной и полной мощностью можно судить по коэффициенту мощности (косинуса угла φ), который показывает степень запаздывания тока от напряжения:



Так как активная мощность равна произведению полного напряжения, приложенного к цепи, тока в ней и коэффициента мощности, то

 **.**

Поэтому всегда надо стремиться к тому, чтобы cos φ был возможно большим. Для цепей, состоящих только из индуктивного сопротивления или только емкостного, коэффициент мощности равен нулю. Для цепи, в которой имеется только активное сопротивление, он равен единице.

Снижение потерь в ЛЭП может быть достигнуто использованием постоянного тока или сверхпроводников. Однако в этих случаях требуются мощные преобразователи напряжения, а также эксплуатация таких линий показала их высокую стоимость и нерентабельность.

*Пример 2.* Электрическая цепь переменного тока содержит последовательно включенные активное сопротивление R=100 Ом и индуктивное сопротивление XL=120 Ом. Для компенсации реактивной мощности в цепь включено емкостное сопротивление XC=50 Ом. Напряжение в цепи равно U=127 В. Определить, на какую величину изменилась потребляемая мощность.

Решение.

1.Определяем сопротивление цепи с активным и индуктивным сопротивлениями



2.Определяем сопротивление цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением



3.Определяем потребляемую мощность





Вывод. Потребляемая мощность при подключении емкости уменьшилась на 54,9 Вт.

*Пример 3.* Напряжение приемника электрической энергии U=1 кВ, мощность P=50 кВт. Определить мощность потерь в проводах, соединяющих приемник с источником энергии, при cos φ1=0,8 и cos φ2=0,2, если сопротивление проводов r0=0,1 Ом.

Решение.

1.Определяем ток приемника в первом и втором случаях





2.Определяем мощность потерь в соединительных проводах





3.Выражаем в процентах мощности потерь по отношению к мощности приемника



Выводы.

1.Повышение cos φ означает громадную экономию электрической энергии, так как уменьшаются потери в источнике энергии, трансформаторах, воздушных или кабельных сетях.

2.Низкий коэффициент мощности не позволяет полностью использовать установленную мощность источника энергии.

*Пример 4.* К источнику электроэнергии с напряжением U=250 В и частотой *f*=50 Гц подключена последовательная цепь, состоящая из активного сопротивления R=30 Ом, индуктивности L=382 мГн и емкости C=40 мкФ.

Определить: реактивные сопротивления индуктивности и емкости; полное сопротивление цепи и ток в ней; активную и реактивные слагающие напряжений на активном сопротивлении, индуктивности и емкости, cos φ; sin φ; активную, реактивную и полную мощности цепи.

Решение.

1.Определяем сопротивление индуктивности XL



2.Определяем сопротивление емкости XC



3.Определяем полное сопротивление цепи Z

 **.**

4.Определяем ток в цепи I



5.Определяем активную и реактивные слагающие напряжения на активном сопротивлении, индуктивности и емкости:

а) активном сопротивлении



б) индуктивности



в) емкости



6.Определяем углы сдвига фаз между напряжением и током





7.Определяем активную мощность цепи



8.Определяем реактивную мощность цепи



9.Определяем полную мощность цепи



Рассмотрены выше электрические цепи с сосредоточенными параметрами; в них сопротивления и емкости сосредоточены на отдельных коротких участках. Для этих цепей характерно, что в каждый момент времени ток в любом сечении неразветвленной цепи имеет одно и то же значение.

Цепи, в которых эти параметры распределены по всей длине, называют цепями с распределенными параметрами. В таких цепях токи в разных сечениях неодинаковы по ряду причин. Во-первых, проводимости изоляции отдельных участков, обусловливающие токи утечки; а также вследствие емкости между отдельными участками, обусловливающей токи смещения и др.

Так как токи утечки пропорциональны напряжению, а токи смещения пропорциональны частоте и напряжению, то с ростом частоты и напряжения их влияние становится более заметным.

К цепям с распределенными параметрами относятся линии и сети, соединяющие источник энергии и потребителя (рис. 1). Ток в любом сечении один и тот же; в частности, ток в начале линии I1 равен току в конце линии I2, а напряжение в конце линии U2 меньше напряжения в начале линии U1 на величину падения напряжения ΔU в проводах.

Гораздо сложнее расчет режима с учетом токов утечки и смещения. В этом случае передачу энергии следует рассматривать как движение электромагнитных волн или тока и напряжения.

При включении генератора в начале линии возникают волны тока и напряжения, которые двигаются от источника (начало линии) к приемнику (конец линии). Когда электромагнитная волна достигает конца линии, ее энергия в общем случае лишь частично поглощается приемником. Поэтому возникают отраженные волны тока и напряжения, перемещающиеся в обратном направлении. Только при подобранном сопротивлении нагрузки вся энергия может поглощаться приемником и отраженные волны будут отсутствовать.

Скорость распространения электромагнитных волн вдоль проводов воздушных линий примерно 300 000 км/с. Тогда длина волны λ равна



где *с –* скорость распространения электромагнитных волн;

*f –* частота источника энергии.

При частоте *f*=50 Гц длина волны км , при частоте *f*=106 Гц имеем λ=300 м и т.д.

Если длина волны известна, то легко качественно показать распределение тока (или напряжения) вдоль линии в любой момент времени и без вычислений токов утечки и смещения.

Так как длина волны обратно пропорциональна частоте, то одна и та же линия при одной частоте будет длинной линией, а при другой, меньшей частоте может быть и «недлинной».

Любая электрическая линия характеризуется четырьмя параметрами, отнесенными к единице ее длины: активным сопротивлением проводов r0, индуктивностью проводов L0, активной проводимостью изоляции между проводами q0 и емкостью между проводами С0.

Если активное сопротивление и индуктивность распределены равномерно по всей длине линии, то линию называют однородной.

При исследовании длинных линий, обладающих распределенными параметрами, их обычно заменяют равнозначными схемами. Длинная линия рассматривается состоящей из бесконечно большого числа элементарных ячеек—элементов линии бесконечно малой длины: с активным сопротивлением, индуктивностью, проводимостью изоляции и емкостью, находящихся на разном расстоянии от начала линии.

В каждом элементе линии наблюдаются падение напряжения на активном сопротивлении и индуктивности, а также ответвление тока вследствие проводимости изоляции и емкости.

При синусоидальном напряжении источника энергии для расчета режима линии применят символический метод. В этом случае используют дифференциальные уравнения однородной линии [1]:

 (5)

 (6)

где  - комплекс сопротивления единицы длины линии;

 - комплекс проводимости единицы длины линии.

Уравнение (5) показывает, что уменьшение напряжения в линии на единицу ее длины равно току, проходящему в этом сечении линии, умноженному на полное сопротивление единицы длины линии.

Из уравнения (6) следует, что уменьшение тока на единицу длины линии равно напряжению между проводами, в данном сечении линии, умноженному на полную проводимость между проводами на единицу длины линии.

**2. Задачи для самостоятельной работы**

**Задача 1**. Напряжение источника электроэнергии U1, В. Расстояние от источника до потребителя *l*, км. Напряжение в конце линии электропередачи U2, В. Определить сечение проводов для передачи мощности P2, кВт и проверить сечение на нагрев. Исходные данные для расчетов приведены в

табл. 2.1.

Таблица 2.1

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Номер варианта | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| U1, В | 125 | 225 | 220 | 127 | 120 | 230 |
| U2, В | 120 | 212 | 215 | 122 | 115 | 225 |
| *l*, км | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 2,5 | 2,0 | 1,5 |
| P2, кВт | 1,0 | 0,8 | 3,0 | 2,0 | 2,5 | 1,5 |
| Вид провода | медь | медь | алюминий | медь | алюминий | медь |

Продолжение таблицы 2.1

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Номер варианта | | | | | |
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| U1, В | 220 | 125 | 127 | 220 | 127 | 127 |
| U2, В | 218 | 120 | 125 | 215 | 125 | 125 |
| *l*, км | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 1,5 | 0,8 | 1,0 |
| P2, кВт | 1,2 | 3,0 | 3,5 | 2,5 | 4,0 | 3,2 |
| Вид провода | алюминий | медь | алюминий | медь | алюминий | медь |

**Задача 2.** Электрическая цепь переменного тока содержит последовательно включенные активное сопротивление R, Ом и индуктивное сопротивление XL, Ом. Для компенсации реактивной мощности в цепь включено емкостное сопротивление XC, Ом. Напряжение в цепи равно U=127 В. Определить, на какую величину изменилась потребляемая мощность. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Номер варианта | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| R, Ом | 110 | 90 | 80 | 100 | 120 | 95 |
| XL, Ом | 125 | 120 | 110 | 130 | 135 | 115 |
| XC, Ом | 55 | 40 | 35 | 50 | 55 | 45 |

Продолжение таблицы 2.2

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Номер варианта | | | | | |
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| R, Ом | 85 | 115 | 125 | 75 | 130 | 85 |
| XL, Ом | 130 | 145 | 150 | 115 | 160 | 125 |
| XC, Ом | 60 | 65 | 70 | 45 | 80 | 65 |

**Задача 3.** Напряжение приемника электрической энергии U, кВ, мощность P, кВт. Определить мощность потерь в проводах, соединяющих приемник с источником энергии, при cos φ1=0,8 и cos φ2=0,2, если сопротивление проводов r0=0,1 Ом. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Номер варианта | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| U, кВ | 1,0 | 1,5 | 1,7 | 2,0 | 2,3 | 2,5 |
| P, кВт | 45 | 48 | 50 | 52 | 55 | 57 |

Продолжение таблицы 2.3

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Номер варианта | | | | | |
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| U, кВ | 2,7 | 3,0 | 1,2 | 1,9 | 2,4 | 3,1 |
| P, кВт | 60 | 62 | 46 | 49 | 54 | 61 |

**Задача 4.** К источнику электроэнергии с напряжением U=250 В и частотой f=50 Гц подключена последовательная цепь, состоящая из активного сопротивления R, индуктивности L и емкости C.

Определить: реактивные сопротивления индуктивности и емкости; полное сопротивление цепи и ток в ней; активные и реактивные слагающие напряжений на активном сопротивлении, индуктивности и емкости; cos φ и sin φ; активную, реактивную и полную мощности цепи. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Номер варианта | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| R, Ом | 35 | 37 | 39 | 40 | 34 | 36 |
| L, мГн | 390 | 395 | 400 | 405 | 350 | 360 |
| C, мкФ | 45 | 50 | 55 | 60 | 40 | 41 |

Продолжение таблицы 2.4

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Номер варианта | | | | | |
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| R, Ом | 45 | 50 | 47 | 49 | 42 | 44 |
| L, мГн | 410 | 420 | 405 | 380 | 400 | 385 |
| C, мкФ | 65 | 70 | 62 | 42 | 45 | 41 |

**Контрольные вопросы**

1. Способы передачи электроэнергии и их характеристика.

2. Перечислите элементы, входящие в состав электрической сети.

3. Понятие о потерях напряжения в линиях электропередачи и факторы, от которых они зависят.

4. Почему в линиях электропередач применяются высокие напряжения?

5. Характеристика факторов, от которых зависит сечение провода в высоковольтных линиях.

6. Что такое активная мощность в цепи переменного тока и от чего она зависит?

7. Понятие о реактивной мощности и способы ее компенсации.

8. Понятие о полной мощности в цепи переменного тока и методика ее расчета.

9. Что показывает коэффициент мощности и методика его расчета.

10. Почему в электрических цепях с распределенными параметрами токи в разных сечениях проводов неодинаковы?

11. Характеристика параметров длинной электрической линии.

12. Пояснить причины образования отраженных электромагнитных волн в конце линии электропередачи.

**Литература**

1. Володин В.И. Энергосбережение: Учеб. Пособие. – Мн. : БГТУ, 2001.

2. Мансуров Н. Н., Попов В. С. Теоретическая электротехника: Учеб. Пособие, М., «Энергия», 1968.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

Приложение 1

Таблица 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Плотность,  г/см3 | Предел прочности на разрыв, кг/мм2 | Температура плавления, ºС | Удельное сопротивление,  Ом·мм2/м |
| Алюминий | 2,7 | 14 – 22 | 657 | 0,029 |
| Вольфрам | 18,7 | 415 | 3370 | 0,056 |
| Медь | 8,9 | 25 – 40 | 1083 | 0,0175 |
| Сталь | 7,8 | 80 – 150 | 1400 | 0,13 – 0,25 |
| Железо | 7,7 | — | 1520 | 0,13 – 0,3 |

Таблица 2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Поперечное сечение, мм2 | Наибольший допустимый ток, А | Поперечное сечение, мм2 | Наибольший допустимый ток, А |
| 0,50 | 10 | 35 | 150 |
| 0,75 | 13 | 50 | 190 |
| 1,0 | 15 | 70 | 240 |
| 1,5 | 20 | 95 | 290 |
| 2,5 | 27 | 120 | 340 |
| 4,0 | 36 | 150 | 390 |
| 6,0 | 46 | 185 | 450 |
| 10 | 68 | 240 | 535 |
| 16 | 90 | 300 | 615 |
| 25 | 120 | 400 | 735 |

**Учебное издание**

Навоша Адам Имполитович

Гончарик Елена Валентиновна

Лисименко Иван Филиппович

Рылов Александр Сергеевич

**ОЦЕНКА СПОСОБОВ ПЕРЕДАЧИ**

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Методическое пособие

для практических занятий по дисциплине

«Основы экологии и энергосбережения»