

Развитие методов расчёта установившегося режима линий электропередачи

Жуков Олег Алексеевич, аспирант

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск)

Актуальность исследования обусловлена тем, что расчёт установившегося режима линий электропередачи служит исходной информацией для определения основных параметров электрических сетей. Цель исследования – разработать и апробировать новый расчётный метод. Методами исследования являются процедуры идеализации и абстрагирования, универсальные способы познания – аналогия и сравнение, анализ и синтез, индукция и дедукция, классификация, построение гипотезы, метод формализации, а также методы теоретических основ электротехники, алгебры и математического моделирования. Результат исследования – разработан новый метод, предназначенный для оперативной оценки схемно-режимных параметров линий электропередач, дополняющий и развивающий аналогичные методы расчёта. Значимость исследования состоит в упрощении проведения, проверки и экспертизы расчётов, уменьшении их трудоёмкости, ускорении получения результата.

Ключевые слова: линии электропередачи, установившийся режим, методы расчёта, электротехническая экспертиза, концептуальная модель, математическая модель.

DOI: 10.5281/zenodo.2671641

Введение. Предметная область исследования – расчёт электрических сетей, объект исследования – нормальный установившийся режим трёхфазных высоковольтных воздушных линий электропередачи (далее по тексту – ЛЭП), предмет исследования – расчётный метод (далее по тексту – РМ) этого режима. Суть исследования – дополнение и развитие существующих РМ применительно к названному объекту. Метод в широком смысле – приёмы, операции освоения действительности, подчинённые решению задачи. Разработка метода относится к числу важных научных результатов исследования, определяющих последующее развитие предметной науки [10, с. 20, 25]. Причиной необходимости дополнения и развития существующих РМ стала идея – разработать простой, с минимальным количеством исходных данных, РМ оперативной проверки «вручную» расчётной части, выполняемой обычно с применением программных комплексов, и входящей в материалы, представленные на экспертизу относительно проектируемых ЛЭП как участка электрической сети.

Литературный обзор. Описание параметров электрических сетей для нормального установившегося режима без учёта их изменения во времени можно проводить с помощью математических линейных статических моделей (далее по тексту - ММ), представленных алгебраическими уравнениями [5, с. 27], [6, с. 8, 30, 79].

В установившемся режиме поведение ЛЭП как отдельного элемента электрической сети воспроизводится с помощью схемы замещения (далее по тексту – СЗ) с продольными и поперечными ветвями. Данной СЗ представляются внутренние параметры – активное и индуктивное сопротивления, активная и ёмкостная проводимости. ЛЭП напряжением 110 кВ и выше длиной до 300 - 400 км обычно представляются П-образной СЗ с сосредоточенными параметрами [1, с. 20-21]. Внешними параметрами режима являются токи и линейные напряжения, потоки активной и реактивной трёхфазной мощности [2, с. 46]. По параметрам режима производится выбор основного электрооборудования, сечений проводников, коммутационных и защитных аппаратов, поэтому расчёт этих параметров является важной задачей проектирования систем электроснабжения объектов [5, с. 28, 33]. Связь между внешними и внутренними параметрами устанавливается на основе законов Ома и Кирхгофа [5, с. 34].

Задача расчёта установившегося режима – определение мощностей и токов во всех ветвях и напряжениях в узлах СЗ [4, с. 63]. Для этого применяется итерационный метод последовательных приближений, основанный на последовательном уточнении напряжений в узлах СЗ, при допущении, что напряжения во всех узлах СЗ в нормальном режиме не существенно отличаются от номинального напряжения данного класса сети [3, с. 16].

Для определения схемно-режимных параметров ЛЭП проводится около 20 расчётных процедур [5, с. 63-58], [3, с. 17-19]. Обычно расчёты по проектируемым электрическим сетям, представленные на экспертизу вместе с другими материалами, выполняются с использованием программных комплексов, и такие расчёты нуждаются в оперативной ручной проверке экспертами в сжатые сроки. Поэтому ручная верификация компьютерных расчётов представляет актуальную в прикладном значении проблему, а разработка нового простого проверочного РМ является проблемой, актуальной в научном значении.

Методология. Цель исследования – разработать и апробировать новый РМ для установившегося режима ЛЭП, восполнить существующий пробел в способах ручной верификации компьютерных расчётов применительно к предмету исследования. Для достижения цели применяются обозначенные в аннотации методы исследования. **Задачи исследования.** 1) Разработать концептуальную модель (далее по тексту – КМ) РМ; 2) Разработать и апробировать систему ММ РМ; 3) Дать общую характеристику РМ; 3) Сделать выводы и заключение. Для определения возможного пути достижения цели сформулируем гипотезу исследования: решение поставленной проблемы может быть связано с применением к основным законам электротехники принципа инвариантности как физической закономерности. Суть этого принципа: законы постоянны, не зависят от изменения способа их описания с целью упрощения, поэтому предполагаемое их алгебраическое преобразование не должно повлиять на качество результата расчётов [9, с. 531].

Концептуальная модель. Структура нового РМ представлена двумя частями – КМ и системой ММ. КМ является содержательной моделью предметной области и теоретической основой для построения ММ [8]. КМ предназначена для описания компонентов РМ в абстрактных терминах и понятиях. С точки зрения автора, структура КМ будет представлена комплексно при раскрытии пяти аспектов КМ – методологического, содержательного, процедурного, оценочного и итогового. Ориентировочный перечень компонентов каждого из названных аспектов, предлагаемый ниже, может быть дополнен, скорректирован, а названия аспектов переименованы.

Компоненты методологического аспекта: предметная область – актуальность – аналитический обзор – постановка проблемы – объект и предмет исследования – идея исследования – цель и задачи исследования – гипотеза исследования – методы и подходы.

Компоненты содержательного аспекта: сущность метода – цель метода – задачи, решаемые методом – основа метода – основания метода – обусловленность разработки метода – принципы метода – природа метода – размерности величин метода – связи с другими методами – сложность метода – структура метода – терминология метода – требования к методу – условия применения метода – ограничения и допущения для метода – факторы, влияющие на метод – функции метода – организация расчёта по методу – применение метода – объекты и границы применимости метода – свойства и признаки метода – особенности метода – возможности метода – способы проверки метода – условия достоверности метода – критерии истинности метода – состав показателей и параметров метода – история метода – классификация метода – место и роль метода – границы расчётной области метода – погрешность расчёта, допустимая для метода.

Компоненты процедурного аспекта: физическая сущность исходных и выходных параметров моделей – способы сбора исходной информации для моделей – исходные данные и их размерности для построения моделей – обоснование выбора моделей – выходные параметры моделей и их размерности – уравнения, входящие в модели – обеспечение техническое для реализации моделей – описание модельного эксперимента и алгоритма расчёта – обработка данных в результате применения моделей.

Компоненты оценочного аспекта: оценка адекватности, достоверности, верификация моделей в условиях числового решения конкретных задач – оценка погрешности расчёта и факторов, повлиявших на величину погрешности – оценка времени, затраченного при использовании моделей – оценка трудностей, которые были преодолены – оценка качества, надёжности моделей – оценка пригодности, преимуществ, недостатков и значимости метода – оценка перспектив развития моделей и метода в целом – оценка компонентов, оставшихся не раскрытыми, и причин этого.

Компоненты итогового аспекта: выводы относительно выдвинутой гипотезы, решаемой проблемы, задачи и достигнутой цели – рекомендации по повышению точности расчётов, расширению областей применения метода – оформление результатов расчёта и итогового отчёта (если расчёт проведен в порядке экспертизы).

Математические модели и их апробация. На этапе формализации КМ преобразуется в ММ. Способ реализации ММ – аналитический, конкретно – алгебраический. РМ не ставит задачу определения скорости протекания процессов в электрической цепи, поэтому в использовании в ММ дифференциального и интегрального исчисления нет необходимости.

Автором предложена, помимо семи новых математических моделей, представленных в таблице 1, ещё и формула: $U = 2\sqrt{PL}$, где U – напряжение, кВ; P – активная мощность, МВт; L – расстояние электропередачи, км. Погрешность расчёта по этой формуле составляет -0,37%. Погрешность расчёта по известной [7, с. 198] аналогичной формуле С.Н. Никогосова $U = 16\sqrt{PL}$ составляет 24%.

Модели и формула предлагаются без вывода, так как их вывод значительно превысит постраничный лимит данной статьи.

Таблица 1. Новые математические модели.

№	Вид модели	Разъяснение параметров моделей
1	2	3
1	$L = \frac{k_{\varepsilon_m} P U^2 n^2}{\varepsilon_m^2}$	L – расстояние электропередачи, км (100); P – активная мощность, МВт (120,1); U – напряжение электропередачи, кВ (220); n – количество проводов в каждой фазе ЛЭП, шт. (3); Цифровые индексы: m, n, l, f, j, q, i ; k – числовые коэффициенты; $\varepsilon, \psi, \theta, \alpha, \beta, \xi, \tau$ – ключевые компоненты, раскрывающие с помощью индексов электротехнические параметры; $\varepsilon_1 = S_{nep.c}$ – полная мощность, передаваемая от генераторов до распределительного устройства высокого напряжения электростанции, без учёта потерь в повышающих трансформаторах электростанции, МВА (150,13);
2	$L = \frac{k_{\psi_n} P \psi_n^2}{U^2}$	
3	$L = \frac{56,8 U^2}{k_{\theta_l} \theta_l}$	
4	$L = \frac{k_{\alpha_f} U^2 \alpha_f}{P}$	
5	$L = \frac{k_{\beta_j} U^2}{P \beta_j^2}$	

		$\varepsilon_2 = \Delta S_c$ - потери полной мощности в повышающих трансформаторах электростанции, МВА (11,13);
1	2	3
6	$L = \frac{k_{\xi_q} U^2}{P \xi_q}$	
7	$L = \frac{U^4 \tau_i^2}{P^3 k_{\tau_i}}$	

Примечание к табл. 1. В круглых скобках в графе «Разъяснение параметров моделей» даны числовые значения из расчётного примера, взятого из [11, с. 7-8, 12-13], на примере которого проверялись предлагаемые модели.

Продолжение графы «Разъяснение параметров моделей» таблицы 1:

$\varepsilon_3 = S_{ЛЭП.c}$ - полная мощность, передаваемая от генераторов до распределительного устройства высокого напряжения электростанции, с учётом потерь в повышающих трансформаторах электростанции, МВА (139);

$\varepsilon_4 = S_{ЛЭП}$ - полная мощность, передаваемая от распределительного устройства высокого напряжения электростанции до главной понизительной подстанции, с учётом потерь в ЛЭП, МВА (138,27);

$\varepsilon_5 = \Delta S_{ЛЭП}$ - потери полной мощности в ЛЭП, МВА (0,727);

$k_{\varepsilon_1} = 4,314 \times 10^{-2}$; $k_{\varepsilon_2} = 2,36544 \times 10^{-4}$; $k_{\varepsilon_3} = 3,699 \times 10^{-2}$

$k_{\varepsilon_4} = 3,661 \times 10^{-2}$; $k_{\varepsilon_5} = 10^{-6}$;

$\psi_1 = Z_{ЛЭП}$ - полное сопротивление ЛЭП, Ом (16,23);

$\psi_2 = X_{ЛЭП}$ - полное индуктивное сопротивление ЛЭП, Ом (13,3);

$\psi_3 = R_{ЛЭП}$ - полное активное сопротивление ЛЭП, Ом (9,3);

$k_{\psi_1} = 150$; $k_{\psi_2} = 227,27$; $k_{\psi_3} = 472,58979$

$\theta_1 = P_{пер.c}$ - активная мощность, передаваемая от генераторов до распределительного устройства высокого напряжения электростанции, без учёта потерь в повышающих трансформаторах электростанции, МВт (120,1);

$\theta_2 = \Delta P_{ЛЭП}$ - потери активной мощности в ЛЭП, МВт (0,41);

$\theta_3 = Q_{пер.c}$ - реактивная мощность, передаваемая от генераторов до распределительного устройства высокого напряжения электростанции, без учёта потерь в повышающих трансформаторах электростанции, Мвар (90,1);

$\theta_4 = \Delta Q_{ЛЭП}$ - потери реактивной мощности в ЛЭП, Мвар (0,59);

$\theta_5 = \Delta P_{\uparrow m}$ - потери активной мощности в повышающих трансформаторах электростанции, МВт (3);

$\theta_6 = \Delta Q_{\uparrow m}$ - потери реактивной мощности в повышающих трансформаторах электростанции, Мвар (15,01);

$k_{\theta_1} = 227,27$; $k_{\theta_2} = 6,5909 \times 10^4$; $k_{\theta_3} = 303,63636$;

$k_{\theta_4} = 4,5799 \times 10^4$; $k_{\theta_5} = 9090,9092$; $k_{\theta_6} = 1818,73866$;

$\alpha_1 = n$ - количество проводов в каждой фазе ЛЭП, шт. (3);

$\alpha_2 = \Delta U$ - потеря напряжения в ЛЭП, кВ (9,6);

$$k_{\alpha_1} = 8,33333 \times 10^{-2}; k_{\alpha_2} = 2,58131 \times 10^{-2};$$

$$\beta_1 = \cos \varphi_e - \text{коэффициент активной мощности генераторов электростанции (0,8);}$$

$$\beta_2 = s - \text{сечение одной жилы провода для каждой из трёх фаз ЛЭП, мм}^2 \text{ (120);}$$

$$k_{\beta_1} = 0,16; k_{\beta_2} = 3600$$

$$\xi_1 = \cos \varphi_{\text{ЛЭП}} - \text{коэффициент активной мощности ЛЭП (0,85);}$$

$$\xi_2 = n_{\text{цеп}} - \text{количество цепей в ЛЭП (1);}$$

$$k_{\xi_1} = 0,21; k_{\xi_2} = 0,2475;$$

$$\tau_1 = I_{\text{мр.л}} - \text{максимальный расчётный ток в ЛЭП, А (365,2);}$$

$$\tau_2 = S_{\text{эк}} - \text{экономическое сечение трёхжильного провода для каждой из трёх фаз ЛЭП, мм}^2 \text{ (332);}$$

$$k_{\tau_1} = 1,8 \times 10^6; k_{\tau_2} = 1,5 \times 10^6.$$

Каждая из моделей была проверена на числовом примере, взятого из [11, с. 7-8, 12-13]. Результат: погрешность не превышает $\pm 2\%$. Заметим, что допустимая погрешность расчётов для ЛЭП составляет $\pm 5\%$ [5, с. 31]. Заметим также, что при применении типового решения задачи, чтобы вычислить, например потерю напряжения, нужно провести 31 расчётную процедуру, а при новом методе достаточно воспользоваться моделью №4, применяя индекс $\alpha_2 = \Delta U$. Кроме того, проверка каждой из семи моделей была проведена аналитически, путём сопоставления с известными электротехническими формулами и с использованием величин вышеназванного числового примера. Результат: погрешность не превышает $\pm 1\%$.

Интервалы оптимальных величин (длины ЛЭП и активной мощности на одну цепь), соответствующие величинам номинальных напряжений (110-150-220 кВ) и учитывающие требования по условиям нагревания проводов, экономичности, допустимой потери напряжения, согласно [12], могут быть следующими: 110 кВ – 60-70 МВт и 40-50 км, 150 кВ – 70-100 МВт и 50-80 км, 220 кВ – 100-110 МВт и 200-400 км.

Общая характеристика метода.

1) Представлен математическим аппаратом и взаимосвязанной структурой содержательно-описательных компонентов. 2) Разработан на основе законов электротехники, логического вывода и приёмов алгебры. 3) Направлен на решение практических задач, имеет прикладной характер, относится к частным методам научного познания. 4) Обусловлен предметом исследования и сформирован с учётом его специфики. 5) Предназначен для расчётов, их проверки и экспертизы. 6) Наделён прогностической функцией – способен оценивать поведение объекта при определённом сочетании параметров. 7) Имеет преимущества – точность результата, минимальный объём вычислительных (с помощью калькулятора) процедур. 8) Может применяться экспертами, инженерами, студентами электротехнических специальностей высших учебных заведений. 9) Не нуждается в привлечении высшей математики, так как основан на линейных статических моделях, описываемых алгебраическими уравнениями.

Выводы.

1. Верификация математических моделей подтвердила гипотезу исследования: отображаемые на основе новых моделей законы Ома и Кирхгофа не изменяются при изменении структуры параметров и способа описания их взаимосвязей.

2. Предложенная концептуальная модель адекватна, поскольку соответствует требованиям к такому типу моделей: 1) обладает целостностью; 2) хорошо структурирована; 3) проста; 4) универсальна.

3. Предложенные математические модели адекватны, поскольку соответствует основным критериям оценки такого типа моделей: 1) дают полную информацию о параметрах предмета исследования; 2) успешно верифицированы; 3) имеют минимальную погрешность вычисления ($\pm 2\%$); 4) не противоречат основным законам электротехники.

4. Адекватность концептуальной и математических моделей свидетельствует о достоверности нового расчётного метода.

Заключение. Разработан новый расчётный метод, представленный концептуальной и математическими моделями. Его уникальность состоит в том, что минимальное количество необходимых исходных параметров, упрощённая форма представления математических моделей позволяют быстро получить значительное число искоемых параметров с минимальной погрешностью. Метод не претендует на замену известных методов и подходов к проведению расчётов и проверки их правильности в отношении установившегося режима ЛЭП переменного тока напряжением 110-150-220 кВ. Он лишь развивает и дополняет их. С его помощью можно оперативно «вручную» с минимальными трудозатратами получить и проверить с высокой степенью достоверности результаты расчётов, выполненных с применением программных комплексов. Применение нового метода в



www.esa-conference.ru

целях экспертизы позволит выявить возможные ошибки в расчётах и связанные с ними негативные последствия для проекта в целом, улучшит качество принимаемых электротехнических решений.

Литература:

1. Абитаева Р.Ш., Акпанбетов Д.Б. Расчёт и проектирование электрических сетей и систем. – Алматы: Изд-во КазНТУ, 2009. – 106 с.
2. Азаров В.С. Передача и распределение электроэнергии в примерах и решениях. – М.: Изд-во МГОУ, 2005. – 216 с.
3. Ананичева С.С., Калинин М.А. Практические задачи электрических сетей. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. – 112 с.
4. Афонин В.В. Электрические системы и сети. Часть 1. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2013. – 80 с.
5. Обухов С.Г. Математическое моделирование в системах электроснабжения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 84 с.
6. Фикс Н.П. Математическое моделирование в высоковольтной электротехнике. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 130 с.
7. Фёдоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
8. <https://present5.com/postroenie-konceptualnyx-modelej>
9. Философия науки / Под ред. д-ра филос. наук А. И. Липкина. – М.: Эксмо, 2007. – 608 с.
10. Долгов А.И. Методология научных исследований. – Ростов н/Д: издательский центр ДГТУ, 2013. – 161 с.
11. Шеховцов В.П. Расчёт и проектирование схем электроснабжения. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2010. – 214 с.
12. Elektrotechnik fuer Grundlagen der Elektronik. Теоретические основы электротехники и электроники / Системы передачи электрической энергии / режим доступа: <http://bourabai.ru/toe/>