

Б. Онгар^{1,2}, Г.К. Смагулова³, Е.А. Сарсенбаев¹, Э.А. Нурмадиева³, Е.Е. Сеитбек².

¹ *Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), г. Алматы, Казахстан, b.ongar@satbayev.university, y.sarsenbayev@satbayev.university*

² *Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан, e.seyitbek@alt.edu.kz*

³ *НАО "Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева", г. Алматы, Казахстан, gu.smagulova@aes.kz, e.nurmadijeva@aes.kz*

МОДЕЛИ И ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В РАСЧЕТАХ УСТАНОВЛЕННЫХ РЕЖИМОВ

Аннотация

Настоящая работа является учебником для энергетиков, и в ней рассматривается небольшая часть вопросов управления энергетическими режимами, которая даст только основу знаний по вопросам управления режимами.

В статье большое внимание уделяется современным особенностям оптимизации режимов. В настоящее время проводится активная работа по созданию методического материала и расчетных методов для многих задач оптимизации режимов.

Оптимизация режимов – это тема, которая всегда была актуальной.

Ключевые слова: модернизация, изоляция, катушка, оптимизация, намагнитченность, петля гистерезиса

Введение

Оптимизация режимов энергосистем и электростанций является одним из разделов теории и методов управления энергетическими системами.

Математическое описание и анализ схем замещения электрических сетей ведется с использованием теории графов. Очевидно соответствие элементарных понятий из теории графов и теории электрических цепей, а именно: однолинейной схеме замещения трехфазной симметричной сложно замкнутой электрической сети соответствует связанный направленный граф, который состоит из вершин и ребер, образующих дерево и хорды схемы [1].

Линии электропередачи характеризуются параметрами (сопротивлениями и проводимостями), равномерно распределенными по длине линии. Расчет линии электропередачи с учетом распределенности параметров очень сложен и применяется только для очень протяженных электропередач сверхвысокого напряжения, длина которых соизмерима с длиной электромагнитной волны.

Подавляющее большинство линий электропередачи в ЭЭС имеют длины, существенно меньшие длины волны. Учет распределенной параметров этих линий значительно усложняет расчеты электрических сетей, уничтожает наглядность результатов расчета при несущественном их уточнении. Поэтому расчет линий электропередачи длиной до 300 км выполняют при допущении о сосредоточенности ее параметров.

Погрешности расчетов при таком допущении не превышают 1...2%, что вполне допустимо для инженерных расчетов. Представление элемента электрической сети его параметрами называется схемой замещения. При расчетах симметричных режимов схемы замещения составляются для одной фазы [2-3].

Воздушные и кабельные линии электропередачи при расчетах электрических сетей представляются в общем случае П-образной схемой замещения (рис. 1). Такая схема

является наиболее удобной расчетной моделью линии, отражающей главные характеристики происходящих в линии явлений.

Схема замещения линии электропередачи (рис. 1) состоит из продольной ветви и двух поперечных ветвей. В соответствии с этим различают продольные и поперечные параметры линии. Рассмотрим двухпроводную однородную линию, физические параметры которой равномерно распределены по ее длине:

Удельные параметры линии R_0, L_0, G_0, C_0 зависят от физических параметров самих проводов и окружающей их среды, поэтому они получили название физических или первичных.

Разделим всю линию на элементарные участки длиной dx и рассмотрим один из таких участков, находящийся на расстоянии x от начала линии. Схема замещения участка будет иметь вид рис.1. Здесь u и i — напряжение и ток в начале рассматриваемого участка. В конце участка напряжение и ток получают приращения: $\Delta u = \frac{\partial u}{\partial x} dx$ и

$\Delta i = \frac{\partial i}{\partial x} dx$.

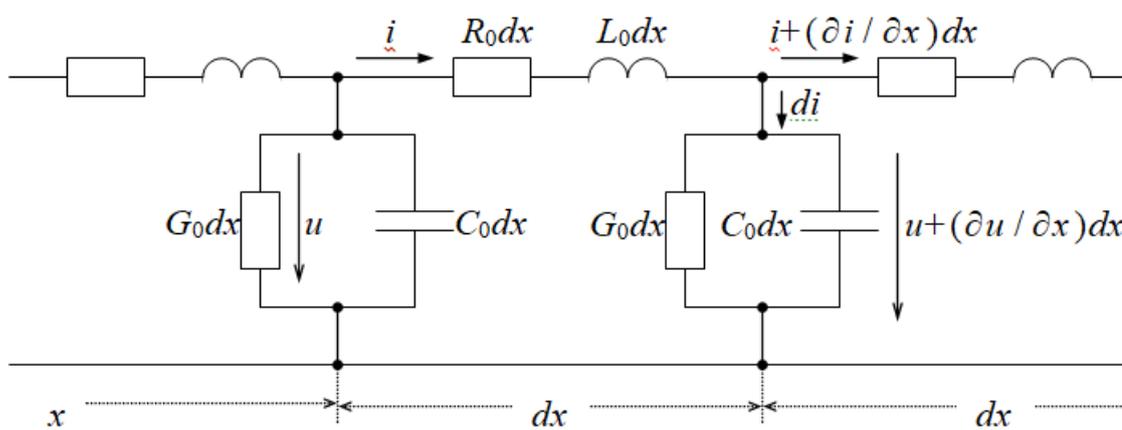


Рисунок 1. Схема замещения линии электропередачи

Активное сопротивление линии электропередачи. Проводниковые материалы (алюминий, медь, сплавы на их основе), используемые для проводов воздушных линий (ВЛ) и жил кабельных линий (КЛ) электропередачи, обладают электрическим сопротивлением. При протекании по линии тока в этом сопротивлении теряется активная мощность, идущая на нагревание материала проводника.

Функции напряжения и тока (u, i) зависят от двух параметров t и x , они изменяются в пространстве и во времени, поэтому дифференциальные уравнения для схемы замещения следует составлять в частных производных.

Уравнение по 2-му закону Кирхгофа для контура:

$$-u + R_0 dx \cdot i + L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t} + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx = 0.$$

После упрощения получим:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1)$$

По закону Ома и 1-му закону Кирхгофа:

$$di = \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right) G_0 dx + C_0 dx \frac{\partial}{\partial t} \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right) = u G_0 dx + C_0 dx \frac{\partial u}{\partial t}$$

В приведенном выражении пренебрегаем слагаемыми второго порядка малости, содержащими d^2x .

По 1-му закону Кирхгофа для узла:

$$i = i + \frac{\partial i}{\partial x} \cdot dx + di = i + \frac{\partial i}{\partial x} \cdot dx + u G_0 dx + C_0 \cdot dx \frac{\partial u}{\partial t}$$

После упрощения получим:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) являются основными дифференциальными уравнениями двухпроводной линии с распределенными параметрами, которые используются для расчета как переходного, так и установившегося режима линии.

Материалы и методы.

Под установившимся режимом электрической сети понимается такой нормальный или послеаварийный режим, в котором токи, напряжения и мощности в ее элементах принимаются неизменными. Расчет установившегося режима подразумевает определение этих токов, напряжений и мощностей, которые характеризуют режим электрической сети называются параметрами режима. Целями и задачами расчета установившегося режима электрической сети являются:

- проверка допустимости параметров режима для элементов сети, в частности проверка допустимости величин напряжений по условиям работы изоляции, величин токов – по условиям нагрева проводов, величин мощностей – по условиям работы источников активной и реактивной мощности;

- оценка качества электроэнергии путем сравнения отклонений напряжений в сети с допустимыми отклонениями напряжений от номинальных значений;

- определение экономичности режима по величинам потерь мощности и электроэнергии в электрической сети.

Определить активную мощность

$$P(x) = U(x) \cdot I(x) \cdot \cos[\psi_U(x) - \psi_I(x)], \text{ Вт}$$

которая монотонно возрастает к началу линии.

Графики зависимостей $U(x)$, $I(x)$, $P(x)$ и КПД $\eta = (P_2/P_1) < 1$ используются для анализа установившегося режима линий.

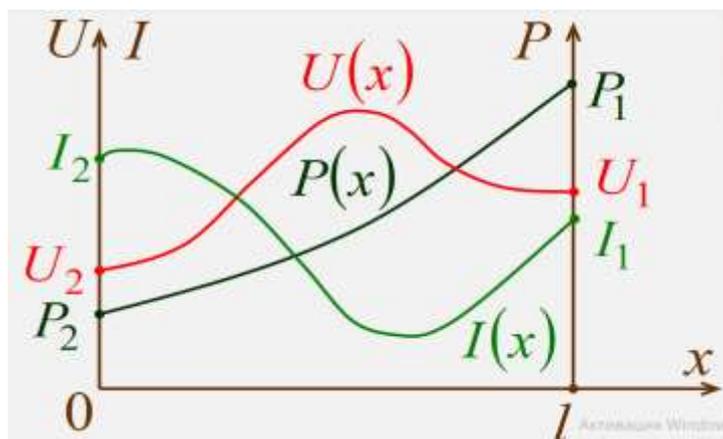


Рисунок 2. Графики зависимостей $U(x)$, $I(x)$, $P(x)$

Исходными данными для расчета установившегося режима электрической сети являются:

- принципиальная схема электрической сети, характеризующая взаимную связь между отдельными ее элементами;
- расчетная схема замещения электрической сети, состоящая из схем замещения отдельных элементов, т. е. из сопротивлений, проводимостей, коэффициентов трансформации, называемых параметрами схемы замещения электрической сети;
- значения активных и реактивных мощностей в узлах нагрузки;
- значения активных и реактивных мощностей источников питания, кроме одного, называемого балансирующим по мощности и покрывающим небаланс между вырабатываемой и потребляемой в ЭЭС мощностями;
- значение напряжения в одном из узлов электрической сети, называемом базисным узлом по напряжению.

При расчете мгновенных значений напряжений $u(t)$ и токов $i(t)$ в нелинейной цепи используются физические характеристики нелинейных элементов, а именно: вольтамперная характеристика $u=f(i)$ или $i=f(u)$ для резистора, вебер-амперная характеристика $i=f(\psi)$ или $\psi=f(i)$ для катушки и кулонвольтная характеристика $q=f(u)$ или $u=f(q)$ для конденсатора.

В простейших случаях, если задан или может быть рассчитан закон изменения во времени одной из спаренных физических величин, то закон изменения во времени другой величины может быть получен графически методом проекции заданной функции на соответствующую физическую характеристику нелинейного элемента [4]. В качестве рассмотрим графический расчет тока холостого хода трансформатора в режиме синусоидального напряжения (тока холостого хода трансформатора) (рис. 3).

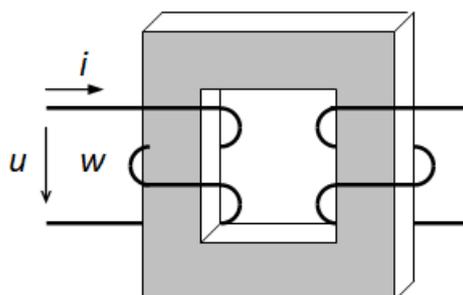


Рисунок 3. Тока холостого хода трансформатора

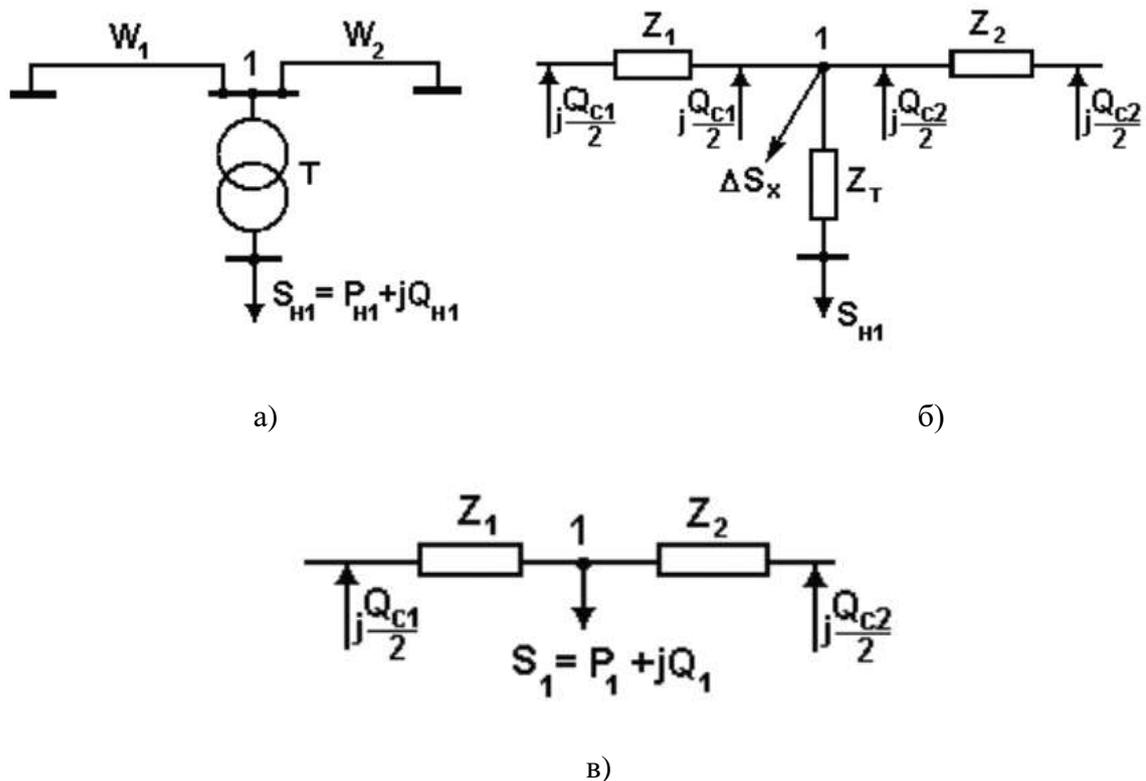


Рисунок 4. Фрагмент схемы электрической сети (а), его полная схема замещения (б) и схема замещения с расчетной нагрузкой узла 1 (в)

Пусть к зажимам катушки приложено напряжение $u(t) = U_m \cdot \sin \omega t$. Магнитный поток в сердечнике связан с напряжением уравнением индукции:

$$u = -e = w \frac{d\phi}{dt},$$

откуда

$$\phi(t) = \frac{1}{w} \int u \cdot dt = \frac{U_m}{\omega w} (-\cos \omega t) = \Phi_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Графические диаграммы функций $u(t)$ и $\phi(t)$ показаны на рис. 5. Справа приведена вебер-амперная характеристика $\phi(i)$ магнитной цепи в виде петли гистерезиса, соответствующая расчетной амплитуде магнитного потока Φ_m . Расчетные точки искомой функции $i(t)$ получаются методом проекции точек заданной функции $\phi(t)$ на вебер-амперную характеристику $\phi(i)$ магнитной цепи.

Для построения графической диаграммы искомой функции $i(t)$ исследуемый интервал времени (период T) разбивается на отдельные отрезки Δt . Для каждого момента времени $t_0, t_1, t_2 \dots$ определяются на диаграмме координаты точек заданной функции $\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots$, которые проектируются на вебер-амперную характеристику $\phi(i)$ магнитной цепи. Найденные соответствующие значения искомой функции $i_0, i_1, i_2 \dots$ в масштабе откладываются на диаграмме для каждого момента времени $t_0, t_1, t_2 \dots$. Отдельные точки соединяются плавной кривой, в результате чего получается графическая диаграмма искомой функции $i(t)$ (на рис. 240 показана жирной линией). Процедура построения

графической диаграммы искомой функции $i(t)$ на рис. 5 показана стрелками для 5 точек (0, 1, 2, 3, 4).

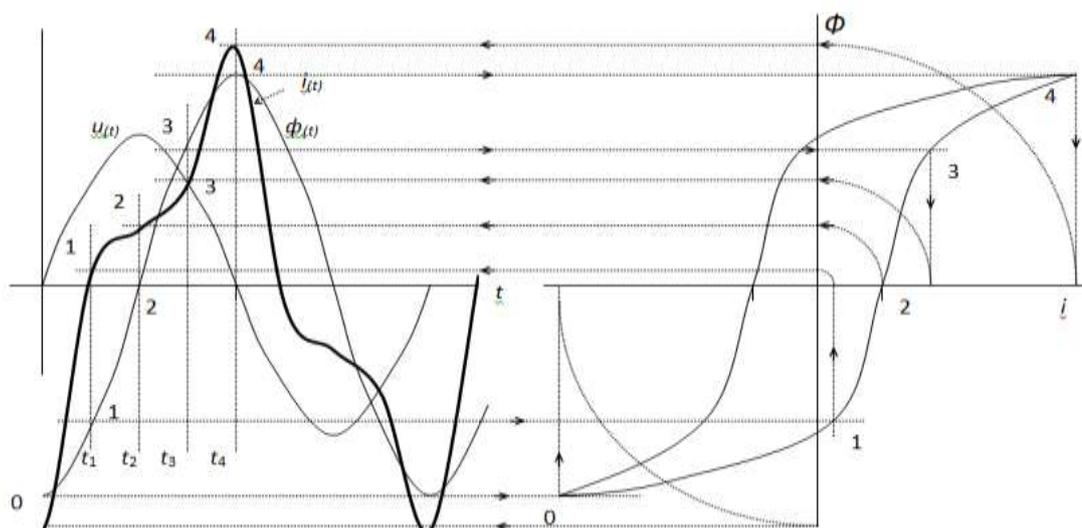


Рисунок 5. Графическая диаграмма

Анализ решения показывает, что намагничивающий ток катушки имеет несинусоидальную форму и содержит в своем составе только нечетные гармоники.

Результаты

Петля гистерезиса $\lambda-i$ дает мгновенное соотношение между током и потоком для периодического возбуждения, близкого к постоянному. Напомним, что $\lambda-i$ можно получить путем масштабирования характеристики В-Н. Спина петли гистерезиса $\lambda-i$ дает нормальную кривую магнитного насыщения, показанную на рис. 6. (В различных источниках кривая нормального насыщения также упоминается как «начальная», «постоянная» или «первичная» кривая насыщения). Гистерезисные потери можно рассматривать как нелинейное частотно-зависимое сопротивление. Потери на гистерезис напрямую зависят не от напряжения, а от магнитного потока. Следовательно, согласование средних потерь для частоты 60 Гц возбуждение не означает, что во временной области следует правильная траектория потока-тока. Остаточный поток трансформатора — еще один важный аспект, критически важный для моделирования пусковых токов. Следовательно, правильная траектория петли гистерезиса является необходимой частью правильной базовой модели во временной области. Обратите внимание, что $(H_{\text{stop}}, B_{\text{stop}})$ здесь определяется как коэрцитивная сила и плотность потока, соответствующие максимальному известному уровню возбуждения.

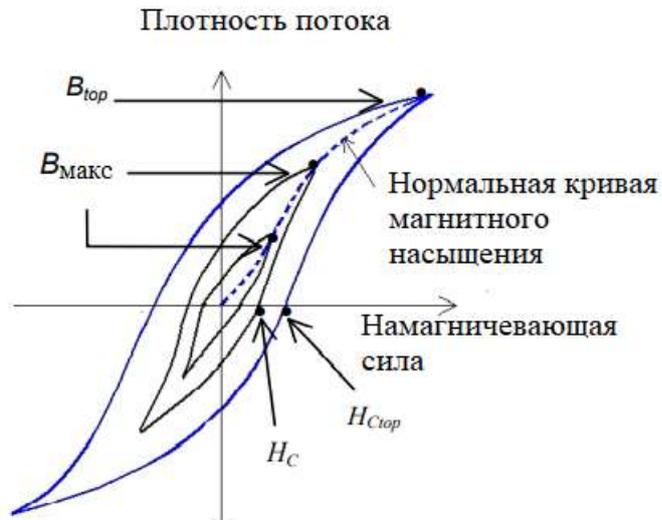


Рисунок 6. Петля гистерезиса λ - i

Одним из методов представления петли гистерезиса является уравнение (3), в котором используются две гиперболические функции. Получившийся цикл показан на рис. 7. Однако для этих функций требуются B_r , B_{sat} и H_c , определенные для каждой петли [5-7].

$$B_+ = B_{sat} \times \frac{H + H_c}{|H + H_c| + H_c \cdot \left(\frac{B_{sat}}{B_r} - 1\right)} \quad \text{and} \quad B_- = B_{sat} \times \frac{H - H_c}{|H - H_c| + H_c \cdot \left(\frac{B_{sat}}{B_r} - 1\right)} \quad (3)$$

где B_{sat} - индукция при насыщении (Т); B_r - остаточная намагниченность (Т); H_c - коэрцитивная сила (А/м).

Из B_+ и B_- безгистерезисная кривая определяется как $B(\text{безгистерезисная}) = (B_+ + B_-) / 2$.

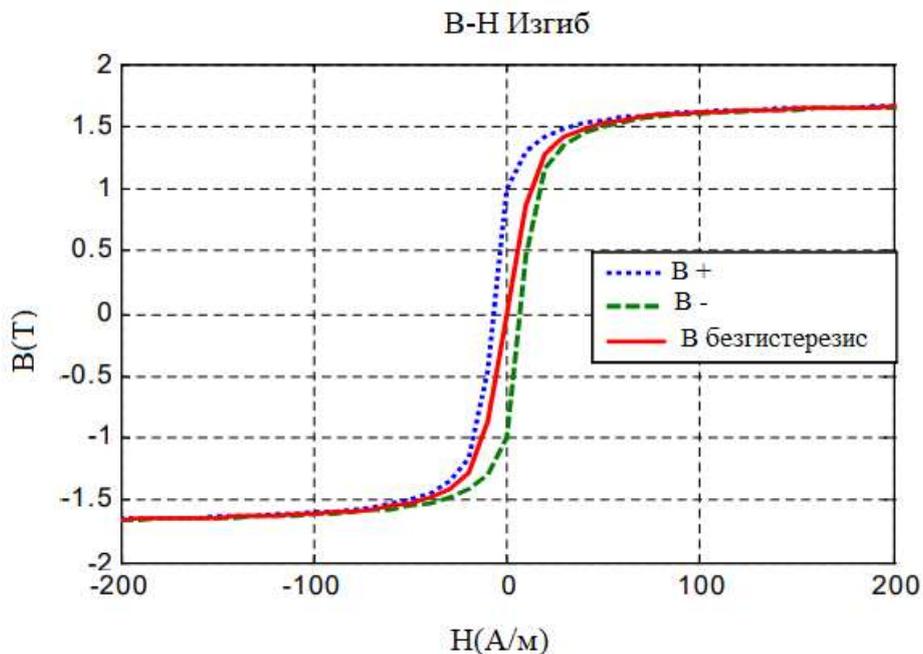


Рисунок 7. Примеры петли гистерезиса с использованием двух гиперболических функций [8]

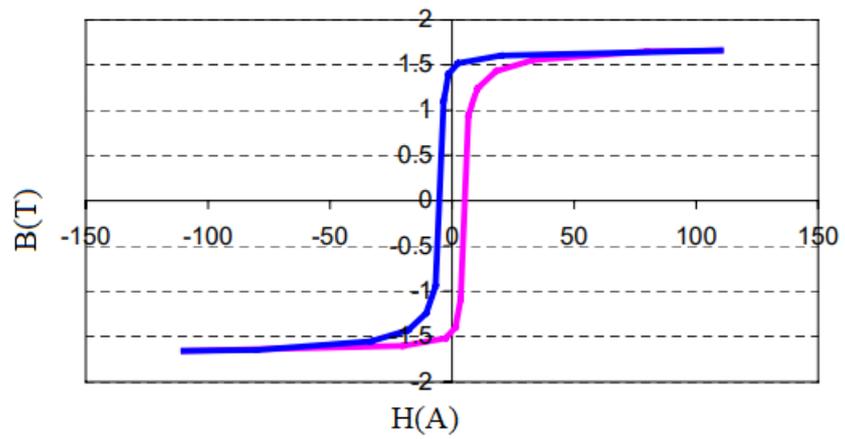


Рисунок 8. Типичная петля гистерезиса [8]

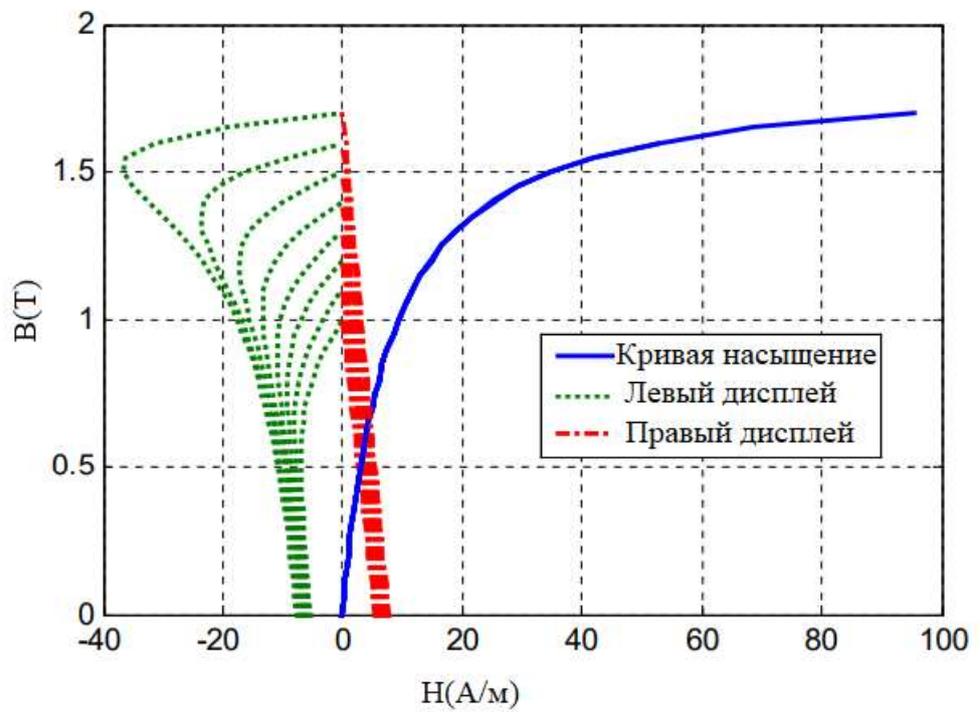


Рисунок 9. Левое и правое смещения тока резистивного гистерезиса [8]

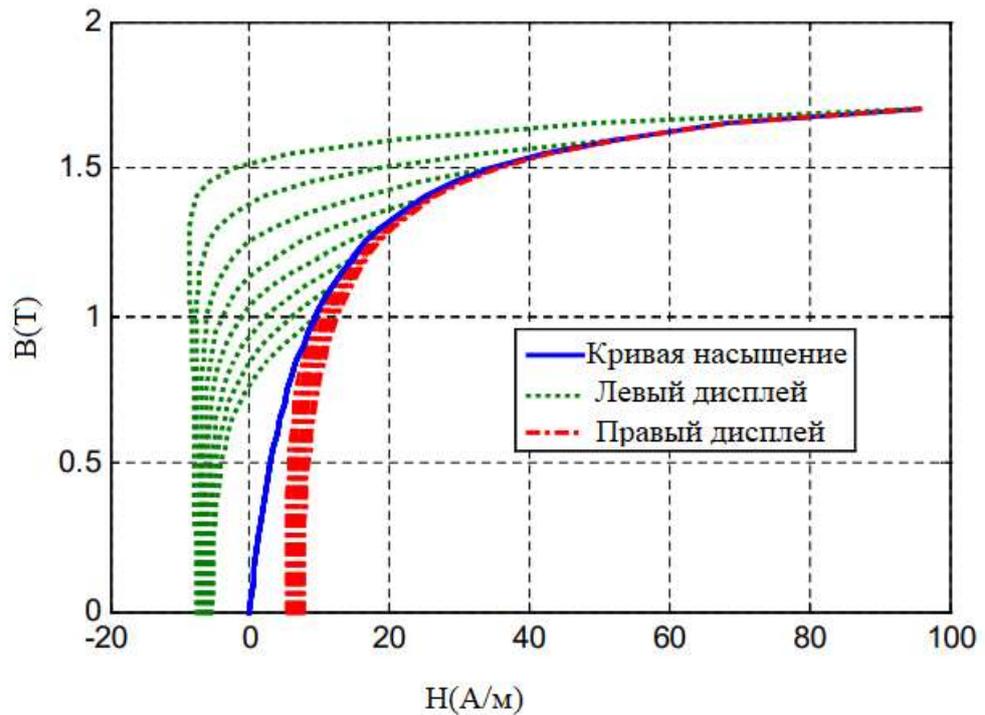


Рисунок 10. Петля гистерезиса постоянного тока, созданная моделью [8]

Обсуждение.

Рассмотрены схемы замещения и параметры основных элементов: линий электропередачи, трансформаторов, нагрузок. Приведены выражения для определения параметров элементов электрической сети.

Рассмотрена методика расчета установившегося режима электрической сети. Приведен вывод уравнений установившегося режима.

Рассмотрена методика оптимизации установившихся режимов по напряжению и коэффициентам трансформации регулируемых трансформаторов с применением генетического алгоритма.

Основными элементами электрических сетей, моделирование которых необходимо проводить, являются:

- линии электропередач (ЛЭП);
- трансформаторы (двухобмоточные, двухобмоточные с расщепленной обмоткой НН, трехобмоточные, автотрансформаторы);
- нагрузочные и генерирующие узлы.

При моделировании реальных элементов следует учитывать тот факт, что они являются нелинейными элементами, однако при ряде допущений возможно их математическое описание с помощью линейных дифференциальных или алгебраических уравнений, что значительно упрощает анализ протекающих процессов в электрических сетях.

На основании исходных данных составляется расчетная схема сети, представленная в однолинейном изображении. Расчетная схема включает в себя все элементы исследуемой электрической сети, для каждого элемента указываются соответствующие ему параметры [9].

Расчетную схему преобразуют в модель электрической сети, которая представляет собой совокупность схем замещения элементов с соответствующими параметрами. Преобразование исходных параметров в параметры режима работы электрической сети – основная цель по расчету режима.

Исходными параметрами модели электрической сети являются:

- номинальные параметры элементов (удельные сопротивления, проводимости, длины, напряжение, мощности и т. д.);
- значения активных и реактивных нагрузок исследуемой сети;
- напряжение базисного узла, которое принимается за исходное.

Заключение.

Методы оценивания параметров были разработаны для определения параметров данной модели.

Параметры модели потерь в сердечнике трансформатора можно оценить, используя основные данные заводских испытаний и методы оптимизации. Потери на вихревые токи можно моделировать постоянным сопротивлением. Однако для моделирования гистерезисных потерь следует использовать текущий метод инъекции из-за его частотной зависимости.

Предположения о том, что смещение вправо для каждой петли гистерезиса линейно, а смещение влево нелинейно и медленно увеличивается при малом потоке и быстрее при большем потоке, а затем спадает до нуля при максимальном потоке, были очень эффективными, и полученные кривые хорошо согласовывались.

Литературы

[1] Агеев В. А. Оптимизация режимов электрических сетей по напряжению и коэффициентам трансформации регулируемых трансформаторов с применением генетического алгоритма / В. А. Агеев, Д. С. Репьев, П. А. Волгушев, А. И. Бурнаев, Д. В. Пяткин. // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материалы Междунар. науч.-практ. конф., 21- 22 ноября 2019 г. [Электронный ресурс] / редкол.: П. В. Сенин [и др.]; сост. П. А. Волгушев ; отв. за вып. В. А. Агеев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2019. - С. 141–148

[2] Агеев В. А. Применение метода Ньютона при расчете режимов электроэнергетических систем / В. А. Агеев, К. А. Душутин, П. А. Волгушев, А. В. Дудин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузов. сб. науч. тр. / редкол.: П. В. Сенин [и др.]; отв. за вып. А. В. Безруков. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. – 347–351 с.

[3] Агеев В. А. Способы учета нагрузки при расчете режимов электроэнергетических систем / В. А. Агеев, К. А. Душутин, П. А. Волгушев, Д. С. Репьев // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. – Саранск, 2017. – С. 351–357.

[4] Агеев В. А. Способ учета трансформаторов при расчете режимов электроэнергетических систем / В. А. Агеев, К. А. Душутин, П. А. Волгушев, А. В. Дудин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузов. сб. науч. тр. / редкол.: П. В. Сенин [и др.]; отв. за вып. А. В. Безруков. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. – 318–323 с.

[5] Агеев В. А. Сравнительный анализ методов расчета режимов электрических сетей / В. А. Агеев, К. А. Душутин, А. В. Дудин // Сельский механизатор. – 2018. – No. 1. – С. 30–33.

[6] Анисимов Т. С. Регулирование напряжения в распределительных сетях с помощью теории нечеткой логики // Введение в энергетику. Материалы I Всероссийской молодежной научно-практической конференции. – 2014. – С. 33.

[7] Душутин К. А. Обзор методов расчета режимов районных электрических сетей / К. А. Душутин, Е. И. Абросимова, И. В. Ракова, В. В. Фролкин // Материалы XXIII научно-практической конф. молодых ученых. : в 3 ч. / отв. за вып. П. В. Сенин. – Саранск: Мордов. гос. ун-т, 2019. – Ч. 1: Технические науки / сост.: А. В. Столяров. – С. 183–188

[8] Cho, Sung Don, "Parameter estimation for transformer modeling", Dissertation, Michigan Technological University, 2002. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etsds/60>

[9] Переходные процессы в электроэнергетических системах : учебное пособие / Ю. А. Куликов. – М.: Омега – Л, 2013. – 380 с.

Б. Онгар^{1,2}, Г.К. Смагулова³, Е.А. Сарсенбаев¹, Э.А. Нурмадиева³, Е.Е. Сеитбек².

¹ Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті (ҚазҰТУ), Алматы қ., Қазақстан, b.ongar@satbayev.university

² Логистика және көлік академиясы, Алматы қ., Қазақстан, e.seyitbek@alt.edu.kz

³ КЕАҚ «Ғ.Дәукеев атындағы Алматы Энергетика және байланыс университеті», Алматы қ., Қазақстан.
gu.smagulova@aes.kz, e.nurmadieva@aes.kz

Стационарлық режимдерді есептеуде электр желілерінің режимдерін модельдеу және оңтайландыру

Аңдатпа

Бұл жұмыс энергетиктерге арналған оқулық болып табылады және оның ішінде энергетикалық режимді басқару мәселелерінің шағын бөлігі қарастырылады, бұл тек режимді басқару мәселелері бойынша білімге негіз болады.

Мақалада режимді оңтайландырудың заманауи мүмкіндіктеріне көп көңіл бөлінеді. Қазіргі уақытта режимді оңтайландырудың көптеген мәселелері бойынша әдістемелік материал мен есептеу әдістерін құру бойынша белсенді жұмыстар жүргізілуде.

Режимді оңтайландыру - әрқашан өзекті болған тақырып.

Түйінді сөздер: модернизация, оқшаулау, орамдар, оңтайландыру, магниттеу, гистерезис тұзағы

B. Ongar^{1,2}, Ye.A. Sarsenbaev¹, G.K.Smagulova³, E.A.Nurmadieva³, Ye.Ye. Seitbek²

Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (KazNITU), Almaty, Kazakhstan

E-mail: b.ongar@alt.edu.kz

Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, e.seyitbek@alt.edu.kz

NJSC "Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek Daukeev", Almaty, Kazakhstan, gu.smagulova@aes.kz, e.nurmadieva@aes.kz

Models and optimization of the mode of electrical networks in the calculations of steady-state modes

Annotation.

This work is a textbook for power engineers, and in it a small part of the issues of energy regimes management is considered, which will only provide a foundation of knowledge on the issues of regimes management.

In the article, much attention is paid to modern features of mode optimization. Currently, active work is being carried out to create methodological material and calculation methods for many problems of mode optimization.

Mode optimization is a topic that has always been relevant.

Key words: modernization, isolation, coil, optimization, magnetization, hysteresis loop

Онгар Булбул, қауымдастырылған профессор, PhD доктор. Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті (ҚазҰТУ), Алматы қ., Қазақстан, b.ongar@satbayev.university

Онгар Булбул, ассоциированный профессор, PhD доктор. Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), г.Алматы, Казахстан, b.ongar@satbayev.university

Ongar Bulbul, Associate Professor, PhD. Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (KazNITU), Almaty, Kazakhstan, b.ongar@satbayev.university

Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович, қауымдастырылған профессор, PhD доктор. Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті (ҚазҰТУ), Алматы қ., Қазақстан, y.sarsenbayev@satbayev.university

Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович, ассоциированный профессор, PhD доктор. Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), г.Алматы, Казахстан, y.sarsenbayev@satbayev.university

Sarsenbaev Yerlan Aliaskarovich, Associate Professor, PhD. ¹Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (KazNITU), Almaty, Kazakhstan, y.sarsenbayev@satbayev.university

Смагулова Гулдана Кашкинбаевна, аға оқытушы, КЕАҚ «Ғ.Даукеев атындағы Алматы Энергетика және байланыс университеті», Алматы қ., Қазақстан, gu.smagulova@aes.kz

Смагулова Гулдана Кашкинбаевна, старший преподаватель, НАО "Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева", г.Алматы, Казахстан, gu.smagulova@aes.kz

Smagulova Guldana Kashkinbaevna, senior lecturer, NJSC "Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek Daukeev", Almaty, Kazakhstan, gu.smagulova@aes.kz

Нурмадиева Эльмира Амиржановна, аға оқытушы, КЕАҚ «Ғ.Даукеев атындағы Алматы Энергетика және байланыс университеті», Алматы қ., Қазақстан, e.nurmadieva@aes.kz

Нурмадиева Эльмира Амиржановна, старший преподаватель, НАО "Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева", г.Алматы, Казахстан, e.nurmadieva@aes.kz

Nurmadieva Elmira Amirzhanovna, senior lecturer, NJSC "Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek Daukeev", Almaty, Kazakhstan, e.nurmadieva@aes.kz

Сеитбек Ерлан Ержанұлы, магистрант, Логистика және көлік академиясы (ЛЖКА), Алматы қ., Қазақстан, e.seyitbek@alt.edu.kz

Сеитбек Ерлан Ержанұлы, магистрант, Академия логистики и транспорта, г.Алматы, Казахстан, e.seyitbek@alt.edu.kz

Seitbek Yerlan Yerzhanuly, master student, Academy of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan, e.seyitbek@alt.edu.kz