

¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»²ООО «НПК»**РАСЧЕТ И АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ ОАО «ММК»**

В данной статье рассмотрена созданная в среде MATLAB SIMULINK математическая модель для определения потерь электроэнергии. Разработанная модель позволяет производить расчет нагрузочных потерь в воздушных и кабельных линиях, в трансформаторах, потерь холостого хода, также изучать влияние режимов и различных параметров сети на величину потерь. С ее помощью проводились расчеты нагрузочных потерь, потерь холостого хода для трансформаторов и линий различных классов напряжения на участках ОАО «ММК».

Ключевые слова: нагрузочные потери электроэнергии, потери холостого хода, методы определения потерь, математическая модель расчета потерь электроэнергии

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с ростом электропотребления, концентрацией производства электроэнергии остро встает вопрос учета, планирования и сокращения потерь электроэнергии и мощности. Целью расчётов и анализа потерь электрической энергии (ПЭЭ) является их снижение с помощью экономически оправданных мероприятий. С точки зрения оптимальности режима потери могут рассматриваться как один из критериев [1-3].

Известные методы и алгоритмы расчёта потерь можно разделить на детерминированные и вероятностно-статистические [4-6]. До 1960-х годов наибольшее распространение получил метод расчета ПЭЭ по числу часов максимальных потерь [7]. И только в начале 60-х годов 20-го века находят применение вероятностные методы расчета, в течение последующих почти 30 лет эти методы активно развивались.

Нормативные методы расчета нагрузочных потерь основаны на использовании всего объема имеющейся информации о схемах и нагрузках сетей. При недостаточном объеме информации они обеспечивают наименьшую допустимую точность для сетей рассматриваемого напряжения. По мере увеличения оснащенности сетей средствами измерения и оперативного контроля режимов возможен переход на любой более точный метод [8].

При расчете нагрузочных потерь электроэнергии в качестве нормативных используют: метод оценки потерь на основе зависимостей потерь от обобщенной информации о схемах и нагрузках сети - в сетях 0,38 кВ [9]; метод средних нагрузок — в сетях 6-20 кВ [10, 11]; в сетях 35 - 220 кВ при отсутствии реверсивных потоков энергии по межсетевым связям — метод расчетных суток, а при наличии реверсивных потоков энергии — метод средних нагрузок [10]; метод оперативных расчетов — в сетях 330-750 кВ.

В [6] наиболее подробно рассмотрены детерминированные методы расчета ПЭЭ, а в работе Ю.С. Железко [4] – вероятностные методы. Оценочные методы используют в сетях 0,4 кВ [9]. Метод средних нагрузок применяют в сетях 6-20 кВ и в разомкнутых электрических сетях 110 кВ. Метод графического интегриро-

вания используют для расчета ПЭЭ в дальних линиях электропередачи и в сетях напряжением 110 кВ [4,6]. В сетях напряжением 220 кВ применяют метод оперативных расчетов, в замкнутых электрических сетях применяют метод контрольных суток. В [12] наиболее подробно рассмотрен расчет ПЭЭ от транзита. В [13] рассмотрен долевого вклад сторонних потребителей в потери холостого хода.

В настоящей работе расчет потерь выполняется в соответствии с Приказом Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 [14]. Для разработанной имитационной модели наиболее рациональным является метод средних нагрузок, который позволяет рассчитать потери в каждом элементе сети.

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Пакет имитационного моделирования MATLAB Simulink позволяет исследовать процессы и параметры, которые зачастую недоступны в реальных объектах. Расчет потерь идет после расчета установившегося режима энергосистемы. Для расчета потерь в блок *constant* необходимо ввести данные по средней и максимальной мощностях, для расчета коэффициента формы, а также число часов в базовом периоде. В блоке *f(u)* производится расчет нагрузочных потерь, которые выводятся на экран пользователя. Ток, необходимый для расчета потерь, и сопротивления линий и трансформаторов берутся исходя из текущей схемы энергоблока. Модель производит расчеты нагрузочных потерь в воздушных и кабельных линиях, в трансформаторах, потерь холостого хода. Математическая модель позволяет изучать влияние режимов и различных параметров сети на величину потерь.

Для расчета потерь электрической энергии необходимо определить параметры схемы замещения электрической сети и рассчитать установившийся режим системы электроснабжения.

Схема замещения сети составлялась на основе схем замещения основных элементов сети – трансформаторов, кабельных и воздушных линий электропередач и т.д. Расчеты параметров схемы замещения выполнены по нижепредставленным формулам:

а) трансформаторы:

$$R_T = \frac{\Delta p_k \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10^3}{n \cdot S_{\text{T,НОМ}}^2}, \quad (1)$$

где Δp_k – потери активной мощности в опыте короткого замыкания, кВт; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение обмотки ВН трансформатора, кВ; n – количество параллельно работающих трансформаторов; $S_{\text{T,НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$$X_T = \frac{u_k \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10}{n \cdot S_{\text{T,НОМ}}}, \quad (2)$$

где u_k – напряжение короткого замыкания, %.

Значения Δp_k , $U_{\text{НОМ}}$, $S_{\text{T,НОМ}}$, u_k определены из справочников. Для трансформаторов с расщепленной обмоткой низшего напряжения сопротивление определяется по формулам (1) и (2) в предположении, что обмотки низшего напряжения включены параллельно;

б) кабельные и воздушные линии:

$$R_L = r_0 \cdot l; \quad (3)$$

$$L_L = \frac{x_0 \cdot l}{2\pi f}, \quad (4)$$

где l – длина кабельной или воздушной линии, км; f – частота, Гц; x_0 , r_0 – удельные значения активного и индуктивного сопротивлений (зависят от типа, напряжения, сечения линии);

в) электрическая нагрузка:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}, \quad (5)$$

где P – активная нагрузка, МВт; Q – реактивная нагрузка, МВАр.

Разработанная модель при расчетах использует фазные напряжения и мощности, поэтому при выводе на экран исследуемых значений используются соответ-

ствующие коэффициенты.

На **рисунке** представлена математическая модель для расчета потерь одной из узловых подстанций 220/110/10 кВ.

Отображение потерь выводится на экран пользователя в специальном блоке «потери» на каждой из подстанций.

Результаты расчетов нагрузочных потерь, потерь холостого хода для трансформаторов и линий различных классов напряжения представлены в **табл. 1**.

Для более подробного и наглядного анализа потери выделены по элементам (**табл. 2**).

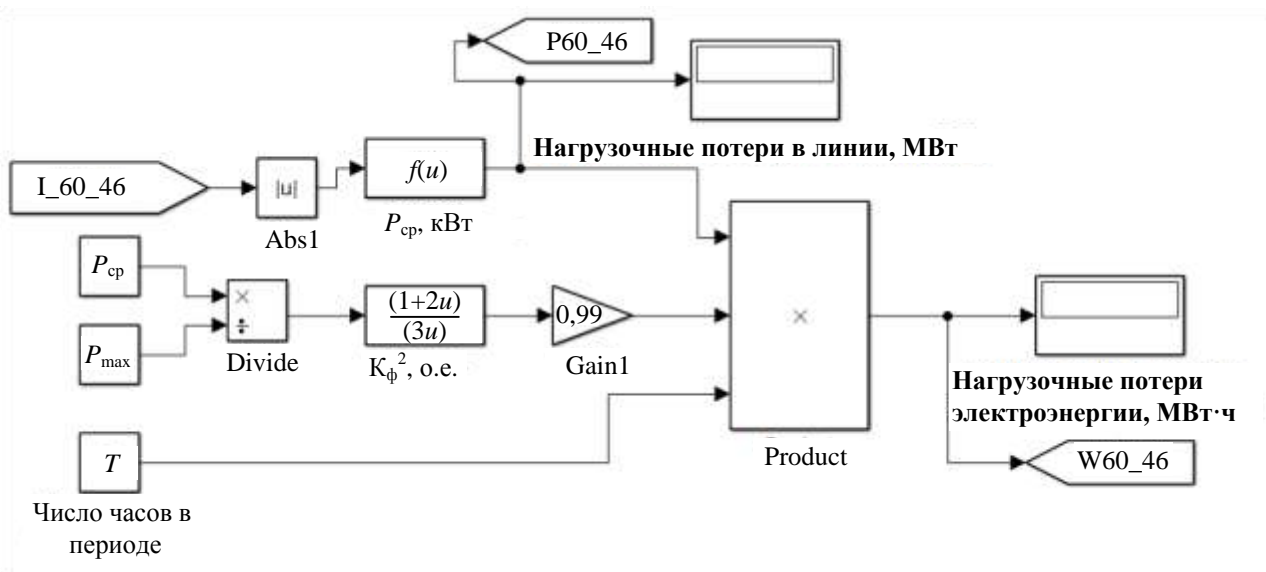
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель позволяет производить расчет нагрузочных потерь в воздушных и кабельных линиях, в трансформаторах, потерь холостого хода, возможно изучение влияния режимов и различных параметров сети на величину потерь.

В питающих линиях 110 кВ и внутрицеховых сетях потери составляют 41% от общего числа потерь. Следовательно, основной упор на уменьшение потерь будет делаться именно в данных участках исследуемого энергорайона. Из-за того, что на комбинате большое количество трансформаторов работает с малым коэффициентом загрузки, величина потерь холостого хода имеет весомую значимость в суммарных потерях. Как видно из **табл. 2**, потери холостого хода в силовых трансформаторах составляют 24 %.

Большими нагрузочными потерями обладают линии 110 кВ, порядка 19 %, что вызвано большими длинами и слабой загруженностью. При расчетах не учитывались линии, которые находятся на балансе производственных цехов. Этим объясняется относительно малая величина потерь в линиях 10 кВ.

Большой процент нагрузочных потерь (75 % от суммарных потерь) связан с потоками реактивной мощности от генератора к потребителям по элементам электрической сети.



Математическая модель расчета потерь

Таблица 1

Потери активной мощности на различных участках исследуемого района

Энергетический объект	Величина потерь, МВт	Процент от суммарных потерь, %
Автотрансформаторы 550/220 кВ и линии передачи по 220 кВ	4,78	26,99
Автотрансформаторы 220/110 кВ	0,8	4,52
Трансформаторы 110/35/10 кВ	2,73	15,4
Линии электропередачи 110 кВ	3,1	17,5
Трансформаторы 110/10 кВ и линии 35; 10 кВ	4,3	24,28
Суммарные потери	15,71	100

Таблица 2

Структура потерь исследуемого энергорайона

Составляющая потерь		Величина потерь, МВт	Процент от суммарных потерь, %
Трансформаторы 550/220 кВ	Потери холостого хода	0,36	
	Нагрузочные потери	0,56	
	Суммарные	0,92	5,86
Трансформаторы 220/110 кВ	Потери холостого хода	0,44	
	Нагрузочные потери	0,36	
	Суммарные	0,8	5,09
Трансформаторы 110/35/10 кВ	Потери холостого хода	0,8	
	Нагрузочные потери	2,1	
	Суммарные	2,9	18,46
Трансформаторы 110/10 кВ	Потери холостого хода	2,32	
	Нагрузочные потери	1,11	
	Суммарные	3,43	21,83
Линии 220 кВ		0,86	5,47
Линии 110 кВ		3,1	19,73
Линии 35 кВ		1,43	9,1
Линия 10 кВ		2,27	14,45
Суммарные потери в сети	Потери холостого хода	3,92	24,9
	Нагрузочные потери	11,79	75,05
	Суммарные	15,71	100

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Napis N.F., Sulaima M.F., Arif R.M., Yusof R.A., Kadir A.F.A., Baharom M.F. A power distribution network restoration via feeder reconfiguration by using EPSO for losses reduction // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2015, vol. 79, то. 2, pp. 346-350.
- Rajabi-Ghahnavieh A., Fotuhi-Firuzabad M., Othman M. Optimal unified power flow controller application to enhance total transfer capability // IET Gener. Transm. Distrib. 2015. vol. 9, iss. 4, pp. 358-368.
- Wedeward K., Adkins C., Schaffer S., Smith M., Patel A. Inventory of load models in electric power systems via parameter estimation // Engineering Letters. 2015, vol. 23, iss. 1, p. 20-28.
- Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. Руководство для практических расчетов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 176 с.
- Казанцев В.Н. Потери электроэнергии в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1983. 368 с.
- Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч, под ред. Г.Е. Поспелова. М.: Энергоиздат, 1981. 216 с.
- Потребич А.А. Методы расчета потерь энергии в питающих электрических сетях энергосистем // Электричество. 1995. №8. С.8-12.
- Российская Федерация. Методика расчета нормативных (технологических) потерь электроэнергии в электрических сетях [Электронный ресурс]. Приложение №1 к инструкции, зарег. в Минюсте РФ №13314 по состоянию на 12.02.2009г. СПС «Консультант плюс»
- Российская Федерация. Об утверждении методики расчета нормативных (технологических) потерь электроэнергии в электрических сетях [Электронный ресурс]. Приказ Минпромэнерго РФ от 03.02.2005 №21. СПС «Консультант плюс».
- Пейзель В.М., Степанов А.С. Расчет технических потерь энергии в распределительных электрических сетях с использованием информации АСКУЭ и АСДУ // Электричество. 2002. №3. С.10-15.
- Цырук С.А., Кошарная Ю.В., Евграфов С.А. и др. Влияние нагрузки субабонентов на уровень потерь электроэнергии в сетях электроснабжающих организаций // Промышленная энергетика. 2010. №8. С.9-15.
- Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2003. 280 с.
- Алгоритм расчета долевого вклада в потери холостого хода активной мощности сторонних потребителей промышленного предприятия на примере ОАО «ММК» / А.В. Малафеев, Е.Б. Ягольникова, Г.Ю. Савинова, А.А. Антоненко // Главный энергетик. 2012. №4. С.50-54.
- Российская Федерация. Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передачи по электрическим сетям [Электронный ресурс]. Приказ Министерства энергетики РФ от 30.12.2008 № 326. СПС «Консультант плюс».

Поступила в редакцию 18 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CALCULATION AND ANALYSIS OF COMPONENTS OF POWER LOSS USING ON JSC "MMK" AS AN EXAMPLE

Evgeniya B. Yagol'nikova

Assistant Professor, the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yagolnikovaevgenia@inbox.ru.

Nikita A. Rudakov

Metrology engineer, "NPK" LLC, Magnitogorsk, Russia.

Maksim A. Shoshin

Metrology engineer, "NPK" LLC, Magnitogorsk, Russia.

The paper is concerned with the mathematical model developed in MATLAB SIMULINK, which is used to calculate electric power losses. The developed model allows the calculation of load losses in the overhead and cable lines, transformers, standby losses, it also makes it possible to study the impact of various modes and network parameters on the loss amount. The model was used to calculate load losses, standby losses of transformers and lines of different voltage classes in different departments of the OJSC "MMK".

Keywords: Load power loss, standby losses, methods for determination of losses, mathematical model for calculating electric power losses.

REFERENCES

- Napis N.F., Sulaima M.F., Arif R.M., Yusof R.A., Kadir A.F.A., Baharom M.F. A power distribution network restoration via feeder reconfiguration by using EPSO for losses reduction. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2015, vol. 79, no. 2, pp. 346-350.
- Rajabi-Ghahnavieh A., Fotuhi-Firuzabad M., Othman M. Optimal unified power flow controller application to enhance total transfer capability. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2015, vol. 9, iss. 4, pp.358-368.
- Wedeward K., Adkins C., Schaffer S., Smith M., Patel A. Inventory of load models in electric power systems via param-eter estimation. *Engineering Letters*. 2015, vol. 23, iss.1, p.20-28.
- Zhelezko Y.S. *Vybor meropriyatiy po snizheniyu poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Choice of Measures to Reduce Energy Losses in Electric Networks]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1989. 176 p.
- Kazantsev V.N. *Poteri elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Energy Losses in Electric Networks]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1983. 368 p.
- Pospelov G.E., Sych N.M. *Poteri moschnosti i energii v elektricheskikh setyakh* [Power and Energy Losses in Electric Networks]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 216 p.
- Potrebich A.A. Methods for Calculating Energy Losses in Electric Networks of Power Supply. *Elektrichestvo* [Electricity], 1995, no. 8, pp.8-12. (In Russian)
- The Russian Federation. *Metodika rascheta normativnykh (tehnologicheskikh) poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Method of calculation of normative (technological) losses of electric power in electric networks]. Appendix no.1 to the instructions eV. Russian Ministry of Justice no.13314 from 12.02.2009. ATP "Consultant Plus"
- The Russian Federation. *Ob utverzhdenii metodiki rascheta normativnykh (tehnologicheskikh) poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Approval of the methodology for calculating regulatory (technological) power losses in electric networks]. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation from 03.02.2005 no. 21. ATP "Consultant Plus".
- Peysel' V.M., Stepanov A.S. Calculation of Technical Energy Losses in Distribution Electric Networks using AMR and ADCS information. *Elektrichestvo* [Electricity], 2002, no.3, pp.10-15. (In Russian)
- Tsyruk S.A., Kosharnaya Yu.V., Evgrafova S.A. et al. Load Effect on the Level of Sub-consumers of Electricity Losses in Networks of Electricity Supplying Companies. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2010, no. 8, pp. 9-15. (In Russian)
- Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. *Raschet, analiz i normirovanie poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Calculation, Analysis and Regulation of Electricity Losses in Electrical Networks]. Moscow, Publishing House of the NTs ENAS, 2003. 280 p.
- Malafeev A.V., Yagol'nikova E.B., Savinova G.Yu., Antonenko A.A. Algorithm for Calculating the Contribution to Standby Losses of Active Power of Consumers Outside of the Industrial Enterprise using the OJSC "MMK" as an Example. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2012, no.4, pp.50-54. (In Russian)
- The Russian Federation. *Ob organizatsii v Ministerstve energetiki Rossiyskoy Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tehnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredachi po elektricheskim setyam* [The Ministry of Energy of the Russian Federation project concerning the standards of power losses during its transmission through electric grids]. Order of the Ministry of Energy of Russia from 30.12.2008 number 326. ATP "Consultant Plus".

Ягольникова Е.Б., Рудаков Н.А., Шошин М.А. Расчет и анализ составляющих потерь электроэнергии на примере ОАО «ММК» // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.25-28. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-25-28

Yagol'nikova E.B., Rudakov N.A., Shoshin M.A. Calculation and Analysis of Components of Power Loss Using JSC "MMK" as an Example. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.25-28. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-25-28