

УДК 621.314

Г. В. Пуйло, д-р техн. наук,
Е. П. Насыпаная

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ СЛОЕВЫМИ ОБМОТКАМИ

Аннотация. Определены оптимальные значения технико-экономических показателей силовых трансформаторов при изменении уровня рабочей частоты в диапазоне 50- 500 Гц. Электромагнитные характеристики электротехнических сталей в зависимости от частоты определялись по уточненному методу. Оптимизационные исследования, реализованные методом циклического покоординатного спуска, показали, что повышение уровня рабочей частоты силовых трансформаторов до оптимального уровня позволяет существенно повысить их энерго и ресурсоэффективность.

Ключевые слова: силовой трансформатор, слоевые обмотки, частота, удельные потери, управляемые переменные, критерий, математическая модель, проектный синтез, проектные исследования

G. Puilo, ScD.,
E. Nasypanaya

OPTIMIZATION OF POWER TRANSFORMERS WITH CYLINDRICAL LAYERED WINDINGS WORKING FREQUENCY

Abstract. The optimal values of power transformers technical and economic parameters at the change of working frequency level in a range 50- 500 Hz were certain. Electromagnetic descriptions for electrotechnical steels depending on frequency were determined on the specified method. The optimization researches realized by the successive displacement method, showed that the increase of power transformers working frequency level to the optimal allowed substantially to promote them energy and resource efficiency.

Keywords: the power transformer, layered windings, frequency, specific losses, the operated variables, criterion, mathematical model, design synthesis, optimization researches

Г. В. Пуйло, д-р техн. наук,
О. П. Насыпана

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ЦИЛІНДРИЧНИМИ ШАРОВИМИ ОБМОТКАМИ

Анотація. Визначені оптимальні значення техніко-економічних показників силових трансформаторів при зміні рівня робочої частоти в діапазоні 50- 500 Гц. Залежність електромагнітних характеристик електро-технічних сталей від частоти визначались за уточненим методом. Оптимізаційні дослідження, реалізовані методом циклічного покоординатного спуску, показали, що підвищення рівня робочої частоти силових трансформаторів до оптимального є ефективним засобом суттєвого підвищення їх енерго- і ресурсоефективності.

Ключові слова: силовий трансформатор, шарові обмотки, частота, питомі втрати, керовані змінні, критерій, математична модель, проектний синтез, оптимізаційні дослідження

Введение. Основными целями совершенствования силовых трансформаторных является снижение потерь электрической энергии при ее трансформации и уменьшение расхода активных, изоляционных и конструктивных материалов при их производстве.

Современный уровень научно-технического прогресса в мировой электротехнической промышленности характеризуется созданием мощного базиса инновационных технических решений и новых электротехнических материалов, применение которых позволяет успешно решать проблемы совершенствования силовых трансформаторов [1], но требует значительных финансовых вложений, существенной технологической перестройки производства трансформаторных устройств и электротехнических материалов, значительных временных затрат.

Одним из менее затратных технических решений указанных проблем является оптимизация параметров преобразуемой электрической энергии и прежде всего частоты тока.

Постановка задачи исследования. Известно [2 – 3], что повышение уровня рабочей частоты преобразуемого напряжения позволяет значительно уменьшить расход активных материалов в электромагнитных и электромеханотронных преобразователях электрической энергии. Получило достаточно широкое применение для высокочастотного электроинструмента в строительстве, в сборочных цехах автопромышленности (175-200 Гц), для электропривода центрифуг в производстве искусственного волокна (100-200 Гц), для электропривода деревообрабатывающих станков (до 400 Гц), в военной технике, в установках индукционного нагрева.

Проблема повышения и оптимизации уровня рабочей частоты в силовых трансформаторах рассматривалась еще в 60-70 годах прошлого столетия [4 – 6]. Однако отсутствие в тот период эффективных и недорогих преобразователей частоты, а также высокие удельные потери в производимых тогда электротехнических сталях (ЭТС), не способствовали широкому применению повышенной частоты даже в автономных энергосистемах.

© Пуйло Г.В., Насыпаная Е.П., 2015

Существенное (на порядок) уменьшение удельных потерь в современных ЭТС, а также огромный прогресс в развитии силовых полупроводниковых преобразователей частоты позволяет значительно расширить применение трансформаторов повышенной (оптимальной) частоты в автономных энергосистемах, на железнодорожном и водном транспорте. Уровень рабочей частоты оказывает значительное влияние на технико-экономические параметры электромагнитных преобразователей, поэтому для определения целесообразности её изменения в силовом электрооборудовании необходимо, прежде всего определить ее оптимальные значения на основе минимизации критерия полной капитализированной стоимости (C_k) [1; 7 – 8].

Следует отметить, что получение напряжения повышенной частоты обычно связано с необходимостью преобразования промышленной частоты (50-60 Гц), это приводит к дополнительным расходам. Однако использование повышенной частоты в автономных энергетических системах обуславливает значительное снижение затрат электротехнических материалов и уровня потерь не только в силовых трансформаторах, но и в питаемых ими электромеханических и электромагнитных потребителях электрической энергии.

Для определения эффективности трансформаторов с повышенным уровнем рабочей частоты, необходимо выполнить сопоставление их параметров, оптимизированных по общепромышленному критерию C_k , с параметрами трансформаторов стандартной частоты (50 Гц). Решения этой задачи требует достаточно высокой точности определения зависимости удельных потерь и намагничивающей мощности от индукции в используемых электротехнических сталях (ЭТС) при частотах в диапазоне 50-500 Гц, поэтому в проектной математической модели (ММ) для оптимизационных исследований используется уточнённый метод определения этих характеристик [9 – 11]. В качестве основных управляемых переменных (УП) выбраны переменные, характеризующие ресурсо-энергетические показатели трансформатора – отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода ξ , отношение стоимостей обмоток к стоимости МС x , а также индукция в стержне B_{cm} и частота f .

Основные результаты исследований. Оптимизация

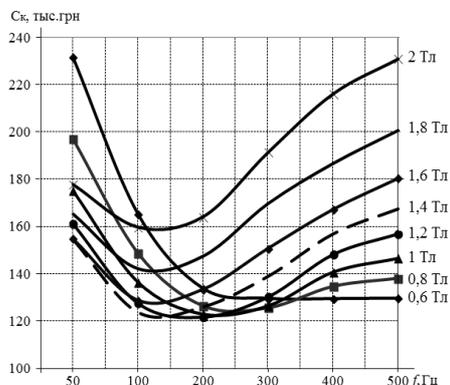


Рис. 1. Зоны оптимальных рабочих частот для трансформаторов ТМ400/10 при изменении индукции B_{cm} .

рабочей частоты выполняется с целью определения значения частоты, при котором обеспечивается наилучшее (наименьшее) значение критерия C_k . Однако это значение может не соответствовать стандартным значениям повышенной частоты, принятым в промышленности. В этом случае следует выбрать стандартное значение повышенной частоты, наиболее близкое к оптимальному значению и выполнить оптимизацию параметров трансформатора со стандартной повышенной частотой. Для анализа зависимости технико-экономических параметров от значений стандартной повышенной частоты необходимо выполнить комплекс проектных исследований путем оптимизации вариантов трансформаторов при различных стандартных значениях повышенной частоты в диапазоне 50-500 Гц. Поэтому решение задачи определения оптимальной частоты целесообразно выполнять в два этапа: на первом – определить уровень оптимальной рабочей частоты при выбранном сочетании активных материалов (марки ЭТС, материала провода), а на втором – определять оптимальные технико-экономические параметры трансформатора при заданном сочетании активных материалов и стандартных уровнях повышенных частот.

Проектные исследования выполнены для отрезка серии трансформаторов 63-630 кВА и представлены на примере трансформатора ТМ400/10 с плоской шихтованной магнитной системой (МС), изготовленной из ЭТС марки 3407, толщиной 0,35 мм и цилиндрическими слоевыми обмотками из алюминиевого провода в диапазоне изменения частоты 50-500 Гц. Поиск оптимальных значений реализован в подсистеме «Ametist» методом циклического покоординатного спуска [12]. Результаты исследований представлены на рисунках 1; 2; 3 и в таблице.

На рис. 1 представлены диапазоны оптимальной по критерию C_k рабочей частоты для трансформаторов ТМ400/10, с МС из ЭТС 3407 толщиной 0,35 мм и алюминиевыми обмотками при изменении величины индукции в диапазоне 0,6-2 Тл и условиях, что $\xi \neq const$, а $x = const$, так как величина x с ростом частоты изменяется незначительно.

На рис. 2 представлены зависимости $C_k = f(B_{cm})$, позволяющие определять оптимальные значения B_{cm} для соответствующих рабочих частот в диапазоне 50-500 Гц.

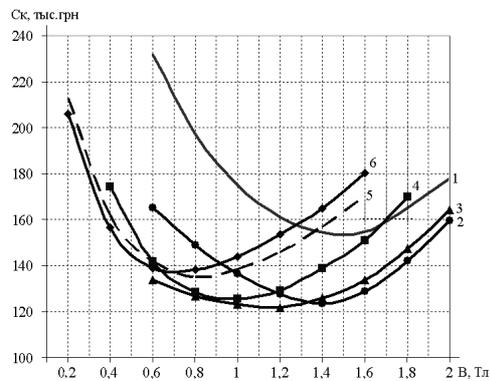


Рис. 2. Зоны оптимальных значений индукции для трансформаторов ТМ400/10 при изменении частоты: 1 – 50 Гц; 2 – 100 Гц; 3 – 200 Гц; 4 – 300 Гц; 5 – 400 Гц; 6 – 500 Гц

1. Основные технико-экономические параметры оптимальных вариантов трансформатора ТМ400/10 с МС из ЭТС 3407 толщиной 0,35 мм и алюминиевыми обмотками при различных рабочих частотах

Частота, Гц	50	100	200	300	400	500
Масса МС, кг	722	433	284	220	199	186
Масса обмоток, кг	194	119	67	45	32	24
Масса активных материалов, кг	916	552	351	265	231	210
Потери холостого хода, Вт	858	1076	1430	1872	2411	2687
Потери короткого замыкания, Вт	4075	3380	2900	2620	2480	2418
Сумма потерь, Вт	4933	4456	4330	4492	4891	5105
C_k , тыс. грн.	164	133	126	131	145	154

На рис. 3 представлены зависимости $C_k=f(\xi)$, позволяющие определять оптимальные значения параметра ξ , при условии, что $B_{cm} = B_{cm\text{opt}}$ для соответствующей частоты из диапазона 50-500 Гц.

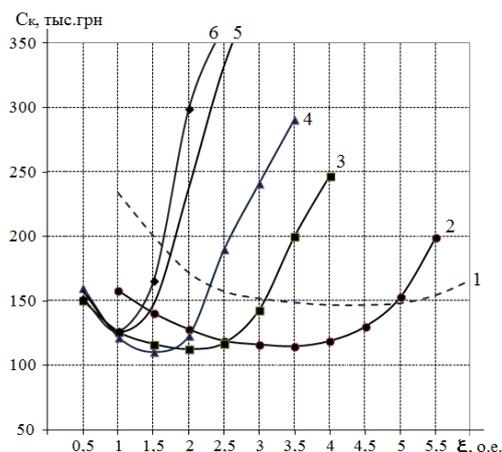


Рис. 3. Оптимальные значения соотношений потерь для трансформаторов ТМ400/10 при изменении рабочей частоты:

- 1 – $f=50$ Гц, $B_{cm\text{opt}} = 1,58$ Тл ;
- 2 – 100 Гц, 1,4 Тл;
- 3 – 200 Гц, 1,2 Тл;
- 4 – 300 Гц, 1 Тл;
- 5 – 400 Гц, 0,8 Тл;
- 6 – 500 Гц, 0,7 Тл

Выводы. По результатам проектных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Для трансформатора ТМ400/10 с плоской шихтованной МС, изготовленной из ЭТС марки 3407 толщиной 0,35 мм и цилиндрическими слоевыми обмотками из алюминиевого провода оптимальным по критерию полной капитализированной стоимости является:

- частотный диапазон 100-200 Гц;
- B_{cm} в пределах от 1,4 до 1,2 Тл;
- соотношение потерь от 3,1 до 2;
- x принимается равным 0,5 во всем диапазоне частот.

2. У оптимального варианта трансформатора с рабочей частотой 150 Гц суммарная масса активных материалов уменьшается на 60 %, суммарные потери на 10 %, а полная капитализированная стоимость на 23 % по сравнению с параметрами трансформатора, с частотой 50 Гц.

3. С повышением уровня оптимальной частоты уменьшается не только суммарный расход активных материалов, но и значительно уменьшается доля проводникового материала по отношению к массе стали.

Поэтому повышение частоты эффективно при применении дорогого провода с высокотемпературной сверхпроводимостью.

Таким образом, одним из эффективных способов повышения энерго- и ресурсоэффективности силовых трансформаторов является создание и внедрение трансформаторов с повышенным уровнем рабочей частоты.

Список использованной литературы

1. Лизунов С. Д. Силовые трансформаторы. Справочная книга / С. Д. Лизунов, А. К. Лоханин. – М.: Энергоиздат. – 2004. – 616 с.
2. Бальян Р. Х. Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств / Р. Х. Бальян, В. П. Обрусник. – Томск: Изд. Том. ун-та, 1987. – 168 с.
3. Petkov R., (1996), Optimum Design of a High-Power, High-Frequency Transformer, *Transactions on Power Electronics, IEEE*, No. 11(1), pp. 33 – 42.
4. Бертинов А. И. Влияние частоты на размеры и потери трансформатора / А. И. Бертинов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1958. – № 1. – С. 107 – 113.
5. Балашов К. К. Оптимальная частота силовых трансформаторов / К. К. Балашов, В. В. Курилов // Электротехника. – 1968. – № 6. – С. 7 – 9.
6. Тюрин Е. П. Трансформаторы повышенной частоты с медными и алюминиевыми обмотками / Е. П. Тюрин // Электротехника. – 1966. – № 6. – С. 31 – 35.
7. ABB green Distribution Transformer Program. Partnership for a Sustainable Environment (2010), *ABB Ltd. Publ.*, pp. 1 – 6, available at: www.abb.com/transformers (accessed 15.06.2010).
8. Corhodzic S., and Kalam A., (2000), Assessment of Distribution Transformers' using Loss Capitalization Formulae, *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Australia, Vol. 1, pp. 43 – 48.
9. Насыпаная Е. П. Подход к расчету удельных потерь в электротехнических сталях / Е. П. Насыпаная // Труды Одесского нац. политехн. ун-та: науч. и производственно-практический сб. по техн. и естествен. наукам. – 2010. – № 1. – С. 116 – 123.
10. Пуйло Г. В. Идентификация удельных потерь в электротехнической стали магнитных систем преобразователей электрической энергии при различных рабочих частотах / Г. В. Пуйло, Е. П. Насыпаная // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2011. – № 02(78). – С. 42 – 47.

11. Pluta W.A., (2011), Core Loss Models in Electrical Steel Sheets with Different Orientation *Journal of Przeglad Elektrotechniczny Publ.*, Vol.9, pp. 37 – 42.

12. Пуйло Г. В. Подсистема автоматизированного синтеза силовых трансформаторов со слоевыми обмотками / Г. В. Пуйло, Д. М. Левин, Е. В. Трищенко // *Электротехника і Електромеханіка*. – 2004. – № 1. – С. 49 – 52.

Получено 05.06.2015

References

1. Lizunov S. D., and Lokhanin A.K. Silovye transformatory. Spravochnaya kniga [Power Transformers. Handbook], (2004), Moscow, Russian Federation, *Energoizdat Publ.*, 616 p. (In Russian).

2. Balyan R.H., and Obrusnik V.P. Optimalnoe proektirovanie silovykh vysokochastotnykh ferromagnitnykh ustroystv [Optimum Design of Power high-frequency Ferromagnetic Devices], (1987), Tomsk, Russian Federation, *Tomsk University Publ.*, 168 p. (In Russian).

3. Petkov R. Optimum Design of a High-Power, High-Frequency Transformer, 1996, *Journal of Transactions on power Electronics Publ.*, Vol. 11(1), pp. 33 – 42.

4. Bertinov A.I. Vliyanie chastoty na razmery i poteri transformy [The Frequency Influence on the Transformer Sizes and Losses], (1958), *Izvestiya Vysshykh Uchebnykh Zavedeniy Elektromekhanika Publ.*, Moscow, Russian Federation, Vol. 1, pp. 107 – 113 (In Russian).

5. Balashov K.K., and Kurilov V.V. Optimalnaya chastota silovykh transformatorov [The Power Transformers Optimal Frequency], (1968), *Elektromekhanika Publ.*, Moscow, Russian Federation, Vol. 6, pp. 7 – 9 (In Russian).

6. Tyurin E.P. Transformatory povyshenoy chastoty s mednymi i aluminiyevymi obmotkami [The High Frequency Transformers with Cuprum and Aluminum Windings], (1966), *Elektromekhanika Publ.*, Moscow, Russian Federation, Vol. 6, pp. 31 – 35 (In Russian).

7. ABB green Distribution Transformer Program. Partnership for a Sustainable Environment, (2010), *ABB Ltd. Publ.*, pp. 1 – 6, available at: www.abb.com/transformers (accessed 15.06.2010).

8. Corhodzic S., and Kalam A., (2000), Assessment of Distribution Transformers' using Loss Capitalization Formulae, *Journal of Electrical and Electronics Engineering Publ.*, Vol. 1, pp. 43 – 48.

9. Nasypanaya E.P. Podchod k raschetu udelnykh poter v elektrotshnicheskikh stalyakh [Approach to Calculation of Specific Losses in Electrotechnical Steels], (2010) *Journal of Tr. Odes. Nac. Politeshn. un.: Nauch. i Proizvodstvenno-prakticheskiy Sb. po Teshn. i Estestven. Naykam Publ.*, Odessa, Ukraine, Vol. 1, pp. 116 – 123 (In Russian).

10. Puilo G.V., and Nasypanaya E.P. Identifikaciya udelnykh poter v elektrotechnicheskoy staly magnitnykh sistem preobrazovateley elektricheskoy energiyi pri razlichnykh rabochikh chastotakh [Identification of Specific Losses in Electrotechnical Steel of Electric Energy Converters Magnetic Systems with Various Working Frequencies], (2011), *Journal of Elektromashinobudivannaya ta Elektroobladnannya Publ.*, Odessa, Ukraine, Vol. 02 (78), pp.

42 – 47 (In Russian).

11.. Pluta W.A., (2011), Core Loss Models in Electrical Steel Sheets with Different Orientation, *Journal of Przeglad Elektrotechniczny Publ.*, Vol. 9, pp. 37 – 42 (In Russian).

12. Puilo G.V., Levin D.M., and Trishenco E.V. Podsystema avtomatizirovannogo sinteza silovykh transformatorov so sloevymi obmotkami [Subsystem of the Power Transformers with Layered Windings Automated Synthesis], (2004), *Elektrotekhnik i Elektromekhanika Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 2, pp. 42 – 45 (In Russian).



Пуйло

Глеб Васильевич, д-р техн. наук, проф. каф. электрических машин Одесского нац. политехнического ун-та, тел. (+38048) 734-8479. E-mail: puiilo@ukr.net



Насыпанная

Елена Петровна, аспирант каф. электрических машин Одесского нац. политехнического ун-та. E-mail: naspanaya_elena@mail.ru