

ANALYSIS OF A SUPERCONDUCTING TRANSFORMER WITH AN AMORPHOUS MAGNETIC CIRCUIT IN MOBILE POWER SUPPLY FACILITIES**Galeev R.***Assistant**«Novosibirsk State Technical University»***Manusov V.***Doctor of Technical Sciences**Professor**«Yugra State University»***Ivanov G.***PhD in Engineering sciences**Associate Professor**Surgut State University***АНАЛИЗ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА С АМОРФНЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ В МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ****Галеев Р.Г.***Ассистент**«Новосибирский государственный технический университет»***Манусов В.З.***Доктор технических наук**Профессор**«Югорский государственный университет»***Иванов Г.В.***Кандидат технических наук**Доцент**«Сургутский государственный университет»*<https://doi.org/10.5281/zenodo.14499292>**Abstract**

The issue of improving the efficiency of power equipment in autonomous and mobile power supply systems is always in the spotlight. One of the modern methods of reducing the mass of a transformer is the use of high-temperature superconductors (HTS). The purpose of the study is to analyze the available methods for reducing the weight and size characteristics of power transformers, as well as to study the magnetic circuit when operating at an increased frequency of electric current. A hysteresis loop of an amorphous iron magnetic core has been experimentally obtained, the characteristics of which allow it to be used at an increased frequency with a high magnetic induction value at low loss rates for magnetization reversal. An analysis of the transformer in the synthesis of HTS windings and an increase in the frequency of electric current with an amorphous iron core is given. The study made it possible to analyze in more detail the energy losses in the transformer elements associated with losses in the magnetic circuit, namely hysteresis and eddy currents. High-temperature superconductors that allow operation at a high current density, which can reach up to 500 A/mm², which reduces the mass and volume of the material used as a secondary winding. Increasing the frequency of the supply network provides a number of advantages and disadvantages.

Аннотация

Вопрос повышения эффективности энергетического оборудования в автономных и мобильных системах электроснабжения всегда находится в центре внимания. Одним из современных методов снижения массы трансформатора является применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Цель исследования заключается в анализе доступных методов снижения массогабаритных характеристик силовых трансформаторов, а также исследование магнитопровода при работе на повышенной частоте электрического тока. Экспериментально получена петля гистерезиса магнитопровода из аморфного железа, характеристики которого позволяют применять его при повышенной частоте с высоким значением магнитной индукции при низких показателях потерь на перемагничивание. Дан анализ трансформатора при синтезе ВТСП обмоток и повышения частоты электрического тока с сердечником из аморфного железа. Исследование позволило более детально проанализировать потери энергии в элементах трансформатора, связанные с потерями в магнитопроводе а именно гистерезисом и вихревыми токами. Высокотемпературные сверхпроводники, позволяющие работать при большой плотности тока, которая может достигать до 500 А/мм² что, позволяет уменьшить массу и объём материала.

Keywords: Superconducting transformer, amorphous magnetic circuit, increased frequency.**Ключевые слова:** Сверхпроводящий трансформатор, аморфный магнитопровод, повышенная частота.

В настоящее время к электрооборудованию транспортных средств воздушных судов, кораблей и т.д. предъявляются повышенные требования. В погоне за эффективностью и повышению КПД, к силовым агрегатам транспортных средств предъявляются повышенные требования, которые заключаются в снижении габаритов, массы, потерь электроэнергии и увеличение удельной мощности силового агрегата. К трансформаторам транспортных средств применяются жесткие требования по удельной мощности которая не должна быть в пределах 180 Вт/кг. Данное требование продиктовано увеличением полезной нагрузки.

Одним из очевидным, доступным и эффективным способом уменьшения массогабаритных характеристик трансформатора как не странно является увеличение частоты электрического тока. Основные применяемые материалы в качестве элементов трансформатора в данном решении не имеют потенциала для повышения эффективности. В связи с этим все чаще и чаще применяются инновационные материалы и не стандартные технические решения. Опытные образцы показывают эффективность, но при этом возникают дополнительные вопросы, требующие дополнительных исследований и нестандартных решений. Одной дополнительной задачей является экспоненциально возрастают потери в магнитопроводе.

Цель исследования: необходимо провести анализ возможности снижения массогабаритных характеристик трансформатора и оценить возможность применения предлагаемых технических решений, а именно:

- Ступенчатое повышение частоты питающей электрической сети;
- Применение высокотемпературных сверхпроводников для обмоток трансформатора;
- Применение магнитопровода из магнитомягкого материала.

Дать анализ активным элементам (обмотки, магнитопровод) сверхпроводящего трансформатора при работе на частотах питающей сети до 800 Гц.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Массогабаритные размеры трансформатора, связанные геометрическими и электромагнитными параметрами возможно определить по формулам (1, 2, 3):

$$(S \cdot S_k) = \frac{P_T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot K_m \cdot J \cdot f \cdot B_m} \quad (1)$$

$$W_1 = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot S} \quad (2)$$

$$W_2 = W_1 \cdot \frac{U_2}{U_1} \quad (3)$$

где, $S \cdot S_k$ – размер магнитопровода (площадь сечения стержня и окна сердечника); B_m – максимальная магнитная индукция в магнитопроводе; K_m – коэффициент заполнения площади круга сталью; P_T –

активная мощность трансформатора; f – частота питающей сети; J – плотность тока обмотки проводника; S – полная мощность трансформатора.

Согласно формуле (1) возможно сделать выводы, что частота переменного тока обратно пропорциональна диаметру сердечника. Следовательно, увеличение частоты позволит увеличить напряжения витка с неизменной электромагнитной индукцией. Данное обстоятельство в свою очередь позволяет снизить количество витков обмоток трансформатора.

Справедливо заметить, что расстояние между стержнями и площадь окон магнитопровода на прямую зависят от диаметра обмоток. Следовательно, логично утверждать, что это позволит уменьшить объём и массу сердечника (2, 3).

В настоящее время для изготовления магнитопроводов применяют электротехнические стали. К данным материалам применяются определенные требования, такие как содержание кремния в пределах (от 0,8 до 4,8 %). Свойства магнитопровода должны отвечать требованиям магнитной индукции на перемагничивание (гистерезис) и быть в пределах от 1,6 до 1,8 Тл. Если увеличить индукцию сверх этого значения, сердечник станет работать в режиме насыщения, что приведёт к увеличению магнитного потока рассеяния и как следствия возрастут электродинамические нагрузки на обмотки и увеличатся потери мощности в магнитопроводе.

На данный момент самым эффективным материалом магнитопровода трансформатора является аморфное железо, применение которого позволяет в разы уменьшить потери на перемагничивание и ток холостого хода. Однако еще одним перспективным направлением для увеличения КПД и уменьшения массогабаритных характеристик на сегодня является применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) второго рода. [1,2,3]. При температуре кипения жидкого азота -198°C (77 К) ВТСП имеют нулевое активное сопротивление переменному току. Экспериментальная плотность тока ВТСП превышает значение меди более чем в 150 раз и достигает 500 А/мм², медь же может достигать значения 2,8 А/мм². Увеличение плотности тока, позволяет сократить количество витков обмотки трансформатора что неизменно влечет за собой снижение объема и массы. [4, 5]

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из эффективных способов уменьшения массогабаритных показателей трансформаторов является повышение рабочей частоты переменного тока. Во всем мире промышленные частоты переменного тока составляют 50 и 60 Гц.

В настоящее время увеличение частоты сети возможно лишь в автономных и мобильных системах электроснабжения. Данное техническое решение требует индивидуального подхода к выбору материалов и конструкции трансформатора [6,7]

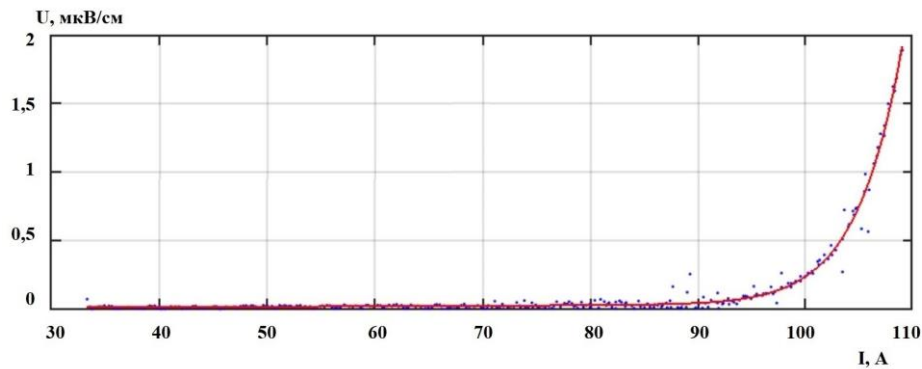


Рис. 3. Вольт амперная характеристика ВТСР от компании «С-Инновации»

ВТСР 2-го поколения подвержен меньшему влиянию внешнего магнитного поля (Рис. 4), для примера рассмотрим материал с артикулом «04-

20Ag-05Cu-40H-PI» стабилизированный медью и изоляционным покрытием производства компании «С-Инновация».

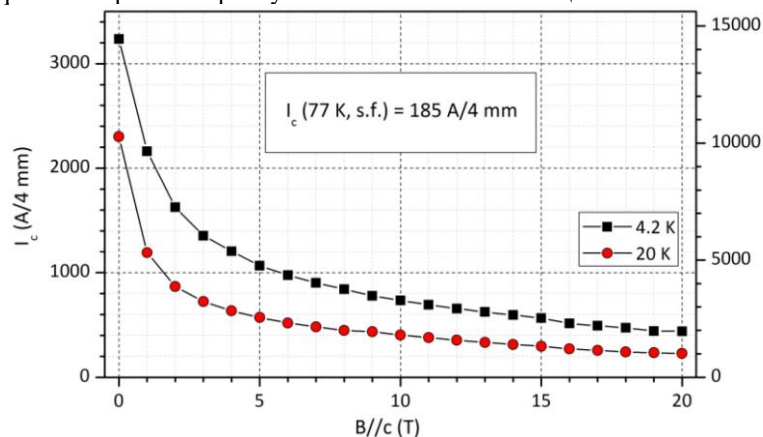


Рис. 4. Влияние внешнего магнитного поля на критический ток ВТСР

Материалы магнитопровода

Проведено исследование трансформатора при использовании тока разной частоты. В качестве материала сердечника использован сплав марки 1СР с типом магнитопровода 1В АМЕТ. Данный сплав представляет собой магнитомягкий быстро закаленный аморфный сплав в составе которого содержатся легирующие элементы: В, Si, Р, С, Со, Ва.

Закалка с высокой скоростью охлаждения (>1000 К/с) способствует переходу металла из жидкого в пассивное состояние. Аморфные сплавы

имеют высокую коррозионную стойкость к агрессивным средам и имеют свойства аналогичные электротехнической стали. Данное обстоятельство позволяет применять её для изготовления магнитопроводов силовых трансформаторов [8,9].

На графике (Рис. 5) представлена петля гистерезиса аморфного сердечника, полученная экспериментальным методом при помощи осциллографа. Прямоугольная форма петли является особенностью аморфных сплавов, благодаря чему значение коэрцитивной силы соответствует рабочему значению напряженности магнитного поля.

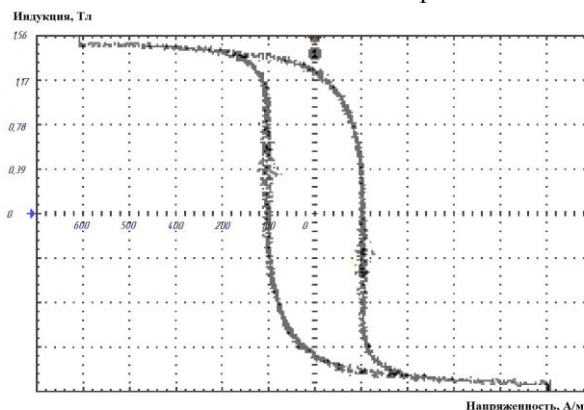


Рис. 5. Магнитная характеристика магнитопровода марки 1В АМЕТ

Анализ потерь перемагничивание (гистерезиса) и вихревые токи в зависимости от частоты перемагничивания сердечника и размера магнитопровода трансформатора (Рис. 6).

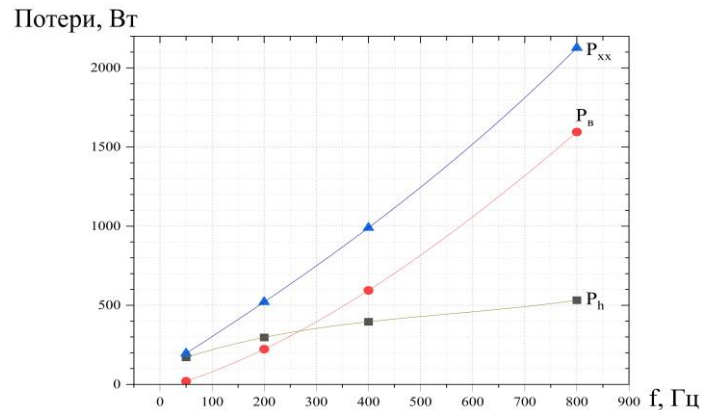


Рис. 6. Зависимости потерь на гистерезис и вихревые токи от частоты

С увеличением частоты потери вихревые токи имеют экспоненциальную зависимость, однако потери на перемагничивание (гистерезис) имеют практически линейную зависимость.

Электротехнические стали обладают большой магнитной индукцией насыщения, но меньшую магнитную проницаемость. Аморфные сплавы имеют более низкий показатель магнитной индукции, но при этом показатель магнитной проницаемости намного выше. [10] Эти свойства приводят к увеличению намагничивающего тока в сердечнике, повышая напряженность магнитного поля, площадь петли гистерезиса и, следовательно, возрастают потери на перемагничивание.

В аморфных сплавах, в отличие от кристаллической структуры магнитомягких электротехнических сталей, нет строгой периодичности и дальнего расположения атомов. Благодаря этому удельным

сопротивлением аморфного сплава находится в пределах 100-300 мкОм·см, что в несколько больше сопротивления холоднокатаной стали, которая находится в диапазоне 40-80 мкОм·см. Поэтому имеет смысл использовать аморфные сплавы для снижения потерь в магнитопроводе из-за перемагничивания сердечника. Аморфные сплавы подходят для использования в высокочастотных трансформаторах благодаря их достаточной прочности и высоким магнитным свойствам, проницаемость порядка ($\mu=60\,000$) в совокупности с низкими показателями коэрцитивной силы ($H_c \leq 100$ А/м).

Согласно формуле (1) которая показывает обратную зависимость между массой магнитопровода ($G_{ст}$) и частотой (f) (Рис. 7) справедливо сделать закономерный вывод что, при повышении частоты питающей сети решается одна из главных и основных задач – уменьшается объем и масса сердечника.

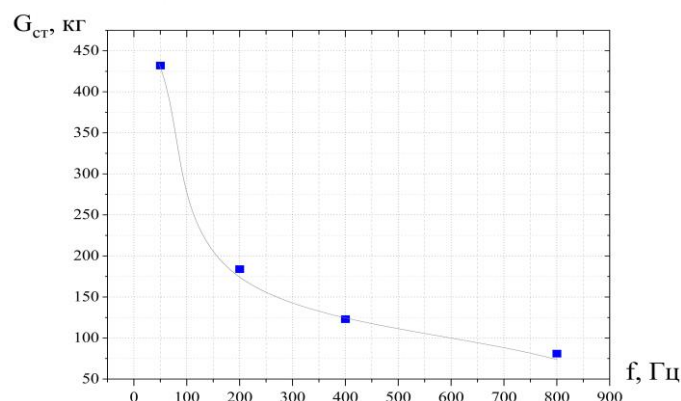


Рис. 7. Зависимость между массой сердечника и частотой

Кроме снижения массы магнитопровода, с ростом частоты прямо пропорционально растет ЭДС витка трансформатора, что ведет к сокращению числа витков. Таким образом, уменьшается объем и масса обмоток (см. Рис.8).

Представленные графики показывают влияния увеличение рабочей частоты на активные элементы трансформатора, но при этом значительно увеличивается мощность трансформатора на единицу

массы, что с экономической точки зрения является рациональным решением.

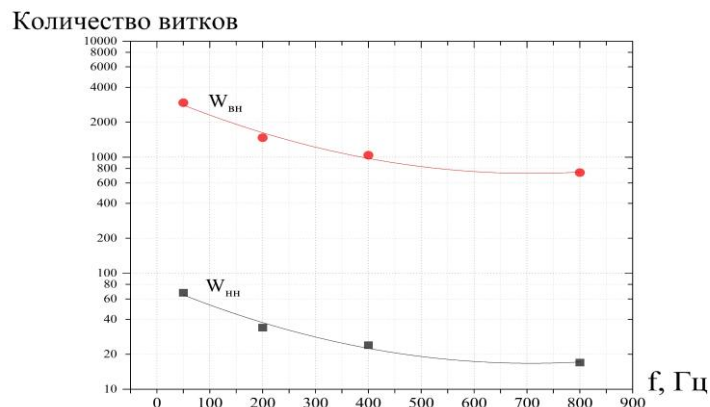


Рис. 8. Зависимость количества витков в обмотках ВН и НН от частоты

ОБСУЖДЕНИЯ

Исследование позволяет сделать вывод, что повышение частоты электрической сети автономных систем электроснабжения открывает возможность решить вопросы снижения габаритов и массы трансформатора.

Особенностью ВТСП 2-го рода является, то что сверхпроводимость достигается при температуре 77 К, чему соответствует температура кипения жидкого азота. Трансформаторы, функционирующие на частоте 400 Гц, в 2,5 раза компактнее трансформаторов работающих на частоте 50 Гц [11].

В настоящее время активно происходит изучение и применение сверхпроводящих материалов которые имеют высокие эксплуатационные свойства при частотах выше 400 Гц [12]. Применение частоты 800 Гц и выше подтверждается графиками (Рис. 6, Рис. 7, Рис. 8), это позволит снизить массогабаритные размеры трансформатора и увеличить полезную нагрузку.

Показатели массогабаритных размеров трансформатора возможно рассчитать согласно алгоритма изложенного в источнике. Результаты расчета для трансформатора мощностью 100 кВА сведен в таблицу для удобства анализа (Табл. 1). Как показали расчеты, масса трансформатора на частоте питающей сети 50 Гц составляет приблизительно 500 кг, а с применением высокотемпературных сверхпроводников при частоте 800 Гц масса снижается более чем в 5 раз. Для сравнения при частоте 50 Гц обычный трансформатор имеет массу приблизительно 700 кг.

При эксплуатации силовых трансформаторов зачастую происходит неравномерное распределение нагрузки между обмотками, что очень сильно влияет на КПД. Высокая удельная мощность в совокупности с современными программными комплексами позволяет производить расчет режимов работы оборудования с достаточно высокой точностью, что положительно скажется на эксплуатационных характеристиках проектируемых ВТСП трансформаторов.

Таблица 1

Параметры ВТСП трансформатора при различной частоте

f (частота сети), Гц	50	200	400	800
1	2	3	4	5
d (диаметр стержня), м	0.135	0,095	0,08	0.067
$G_{ст}$ (масса магнитопровода), кг	432	184	123	81
E_v (ЭДС витка), В	3.382	6.701	9.623	13.32
$w_{нн}$ (Число витков вторичной обмотки)	68	34	24	17
$w_{вн}$ (Число витков первичной обмотки)	2945	1473	1040	737
Φ_m (Магнитный поток), Вб	0.015	0.008	0.005	0,004
P_h (Потери на гистерезис), Вт	171	297	396	532
P_v (Потери на вихревые токи), Вт	25	223	594	1595
$P_{ст}$ (Потери в сердечнике), Вт	196	521	990	2127

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании проанализирована и доказана целесообразность повышения частоты питающей сети до значений 800 Гц, что позволит снизить габариты и массу трансформатора. В сочетании с ин-

новационными материалами такими как сверхпроводники в качестве обмоток, а также аморфного железа в качестве магнитопровода.

Явление сверхпроводимости открыто не одно десятилетие назад, но работы по его изучению продолжают и сегодня. Применение ВТСП позволит

совершенствовать методы применения данных материалов как в опытных, так и в промышленных образцах.

Применение в качестве сердечника в высокочастотном трансформаторе с обмотками из сверхпроводника следует применять аморфное железо, которое позволяет снизить потери и повысить значение индукции в магнитопроводе.

ВТСП трансформатор меньше традиционного трансформатора приблизительно в 3 раза при одинаковой частоте. С повышением рабочей частоты трансформатора с обмотками из материала ВТСП массогабаритные размеры снижаются более чем 10 раз.

Список литературы:

1. Grilli F., Ashworth S. Measuring transport AC losses in YBCO-coated conductor coils. *Superconductor Science and Technology*, 2007, vol. 20, pp. 794-799.
2. Lee S., Petrykin V., Molodyk A., et al. Development and production of second generation high Tc superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. *Superconductor Science and Technology*, 2014, vol. 27, no. 4, Art. no. 044022.
3. Zhou J., Chan W., Schwartz J. Quench Detection Criteria for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Coils Monitored via a Distributed Temperature Sensor for 77 K Cases. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 5, Art. no. 4703012.
4. Hu M., Zhou Q.B., Wang X., et al. Study of Liquid Nitrogen Insulation Characteristics for Superconducting Transformers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2022, vol. 32, no. 4, pp. 1-5, Art. no. 5500305.
5. Jaroszynski L., Wojtasiewicz G., Janowski T. Considerations of 2G HTS Transformer Temperature During Short Circuit. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 4, doi: 10.1109/TASC.2018.2806561.
6. Arun P., Practical Study of Mixed-Core High Frequency Power Transformer. *Magnetism*, 2022, no. 2, pp. 306-327. doi: 10.3390/2030022
7. Arun P. Application prospects of hybrid magnetic circuits in high frequency power transformers. *Techrxiv*, 2022, doi: 10.36227/techrxiv.21737858.v1.
8. Azuma D., Ito N., Ohta M. Recent progress in Fe-based amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2020, vol. 501, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166373>
9. Suzuki K. Amorphous metals Suzuki K., Fujimori H., Hashimoto K. – edited by Masumoto Ts. per. from Japanese – *Metallurgy*, 1987 328 p.
10. Lenke R. U., Rohde S., Mura F., De Doncker R. W. Characterization of amorphous iron distribution transformer core for use in high-power medium-frequency applications. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, Conference Location: San Jose, CA, USA doi: 10.1109/ECCE.2009.5316134.
11. Oliveira S.V.G., Barbi I. A three-phase step-up DC-DC converter with a three-phase high frequency transformer. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2005. ISIE 2005. doi: 10.1109/ISIE.2005.1528980.
12. Chan, H. L., Cheng, K. W. E., Sutanto, D. Calculation of inductances of high frequency air-core transformers with superconductor windings for DC-DC converters. *IEE Proceedings: Electric Power Applications*, 2003, vol. 150, no. 4, p.p 447-454, doi.org/10.1049/ip-epa:20030257.