

High Temperature Superconducting Transformer Operating at an Increased Frequency of Alternating Current

Manusov V.Z., Galeev R.G.

Siberian State University of Water Transport,
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The study's aim is to substantiate and employ materials with high technical characteristics for the active elements of a transformer, particularly in the context of increased operating frequencies. To accomplish this objective, the following tasks were addressed: An analysis and synthesis of the properties of a magnetic core composed of amorphous iron and superconducting windings in a high-temperature superconducting transformer (HST) were conducted. Dependencies and graphs illustrating the impact of frequency increase on heat losses related to hysteresis and eddy currents were derived. These losses occur within the magnetic circuit. The study also demonstrates the relationship between reducing size and weight parameters and material consumption of windings in high-temperature superconducting (HST) tapes. Current densities in these tapes can reach up to 500 A/mm². The most noteworthy outcome, taking advantage of superconductivity in the HST, is that HST acts as an ideal diamagnetic material. Additionally, the windings exhibit high electrical conductivity. This resolves issues related to current displacement to the conductor's surface, commonly known as the "skin effect," and effectively addresses concerns about increased resistance in transformers and electrical machines. The absence of the skin effect in HST conductors has been rigorously demonstrated using Bessel functions. The significance of these results is in enhancing the efficiency of transformers operating at high frequencies. This is achieved by synthesizing the properties of the transformer's active elements, which include an amorphous iron magnetic core, HST windings, and a dielectric medium utilizing liquid nitrogen.

Keywords: increased frequency, magnetic circuit, energy efficiency, HTS transformer, skin effect.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.04>

UDC: 621.314.2

Transformator supraconductor la temperatură ridicată care funcționează la o frecvență crescută de curent alternativ

Manusov V.Z., Galeev R.G.

Universitatea de Stat Siberiană de transport pe apă, Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Scopul studiului constă în fundamentarea și aplicarea materialelor cu caracteristici tehnice superioare în elementele active ale transformatorului cu o creștere a frecvenței de funcționare. Pentru a atinge acest obiectiv, au fost rezolvate următoarele sarcini: s-a dat analiza și sinteza caracteristicilor unui miez magnetic realizat din fier amorf și înfășurări supraconductoare într-un transformator supraconductor la temperatură înaltă (HST). Studiul a obținut dependențe și grafice ale efectului creșterii frecvenței asupra pierderilor de căldură asociate cu histerezisul și curenții turbionari, care alcătuiesc pierderi în circuitul magnetic și arată, de asemenea, dependența reducerii parametrilor de greutate și dimensiune și a consumului de material al înfășurărilor de frecvență și densitatea curentului în benzile supraconductoare la temperaturi ridicate (HTS), care pot ajunge la 500 a / mm². Aceasta, la rândul său, afectează dimensiunile înfășurărilor transformatorului și, în consecință, dimensiunile circuitului magnetic. Cel mai impornat rezultat folosind fenomenul supraconductivității în VST este faptul că HTS este un diamagnet ideal, iar înfășurările au o cantitate mare de conductivitate electrică, prin urmare, în transformatoare și mașini electrice, problema deplasării curentului la suprafața conductorului dispare – "efectul pielii" și problema creșterii rezistenței. Din analiza teoretică utilizând condițiile funcțiilor Bessel, absența unui efect de piele în conductorii HTS este dovedită datorită rezistenței ohmice zero la 77 K. Semnificația rezultatelor constă în creșterea eficienței transformatorului atunci când funcționează la frecvențe înalte datorită sintezei proprietăților elementelor active ale transformatorului: un miez magnetic din fier amorf, înfășurări HTS și un mediu dielectric din azot lichid. Avantajele suplimentare ale acestui tip de echipamente electrice în sistemele autonome și mobile includ absența completă a siguranței la incendiu și explozie, precum și absența amprentei de carbon și asigurarea siguranței mediului.

Cuvinte-cheie: frecvență crescută, circuit magnetic, eficiență energetică, transformator HTS, efectul skin.

Высокотемпературный сверхпроводящий трансформатор работающий на повышенной частоте переменного тока

Манусов В.З., Галеев Р.Г.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», г. Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. В автономных и мобильных системах электроснабжения возникает вопрос энергоэффективности и массогабаритных размеров трансформаторного электрооборудования. Цель исследования состоит в обосновании и применении материалов с более высокими техническими характеристиками в активных элементах трансформатора при увеличении рабочей частоты. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: дан анализ и синтез характеристик магнитопровода из аморфного железа и сверхпроводящих обмоток в высокотемпературном сверхпроводящем трансформаторе (ВСТ). В исследовании получены зависимости и графики влияния повышения частоты на тепловые потери, связанные с гистерезисом и вихревыми токами, из которых складываются потери в магнитопроводе, а также показана зависимость уменьшения массогабаритных показателей и расхода материала обмоток от частоты и плотности тока в высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент, которая может достигать 500 А/мм^2 . Это в свою очередь влияет на размеры обмоток трансформатора и, следовательно, размеры магнитопровода. Наиболее существенным результатом с использованием явления сверхпроводимости в ВСТ, является тот факт, что ВТСП является идеальным диамагнетиком, а обмотки имеют высокую величину электрической проводимости, следовательно, в трансформаторах и электрических машинах исчезает проблема вытеснения тока к поверхности проводника – «скин-эффект» и проблема увеличения сопротивления. Из теоретического анализа с использованием условий функций Бесселя доказано отсутствие скин-эффекта в ВТСП проводниках по причине нулевого омического сопротивления при 77 К . Значимость результатов заключается в повышении КПД трансформатора при работе на повышенных частотах благодаря синтезу свойств активных элементов трансформатора: магнитопровода из аморфного железа, ВТСП обмоток и диэлектрической среды из жидкого азота. К дополнительным преимуществам такого рода электрооборудования в автономных и мобильных системах следует отметить полное отсутствие пожара и взрыва-безопасности, а также отсутствие углеродного следа и обеспечение экологической безопасности.

Ключевые слова: повышенная частота, магнитопровод, энергоэффективность, ВТСП трансформатор, скин-эффект.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании систем электроснабжения автономных и мобильных объектов электротранспортной и логистической структуры, морских и воздушных судов, остро стоит вопрос энергоэффективности и массогабаритных размеров трансформаторного электрооборудования и накопителей энергии. Применение полупроводниковых устройств преобразования напряжения является перспективным направлением развития и замене электрическим машинам основанных на физическом явлении электромагнитной индукции, но на данный момент полупроводниковые устройства являются весьма дорогостоящим оборудованием и к тому же являются весьма не надежными, что при определенных обстоятельствах может привести к нарушениям электроснабжения и даже несчастным случаям. Приоритетным устройством трансформации напряжения при заданной частоте является трансформаторное

электрооборудование на основе магнитосвязанных катушек индуктивности.

Трансформатор при своих качествах высокой надежности и простоте конструкции имеет малую удельную мощность на единицу массы, приблизительно 180 Вт/кг . Учитывая, что трансформаторное электрооборудование включено в мобильную систему электроснабжения его энергоэффективность и массогабаритные параметры оказывают существенное влияние на возможности транспортировки полезной нагрузки.

Цель работы состоит в повышении энергоэффективности, снижении массогабаритных характеристик трансформаторов, что для автономных систем электроснабжения является весьма значимым аспектом энергоэффективности, и в выполнении анализа используемых активных материалов для обмоток и магнитопровода трансформаторного электрооборудования.

На практике применяют несколько методов уменьшения массогабаритных показателей

трансформаторного электрооборудования, а именно:

- Применение материала магнитопровода с высокой индукцией насыщения;
- Применение материалов с высокой плотностью тока для обмоток трансформатора;
- Увеличение рабочей частоты электрической системы.

ОСНОВНЫЕ ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

В настоящее время основная доля магнитопроводов трансформатора изготавливают из электротехнических сталей и ферритов. Максимальная рабочая индукция, при которой трансформатор имеет потери в магнитопроводе приемлемые техническим требованиям, находятся в диапазоне $B_c = 1,7 - 1,9$ Тл. По мере того, как насыщение сердечника становится более сильным, увеличивается поток рассеяния, связанный с обмоткой высокого напряжения [1]. Дальнейшее увеличение рабочей индукции будет способствовать уменьшению магнитной проницаемости и, следовательно, понизится индуктивность обмоток, что приведет к увеличению потерь в магнитопроводе. По этой причине увеличение индукции не целесообразно с применением доступных магнитомягких материалов. Снижение габаритов трансформатора за счет увеличения плотности тока является перспективным направлением в связи с появления ВТСП проводников 2-го рода [2, 3, 4].

Создание обмоток трансформатора из сверхпроводящего провода, который при температуре кипения жидкого азота (77 К) - 198°С имеет нулевое активное сопротивление переменному току, что исключает потери на активное сопротивление [5]. Плотность тока в сверхпроводящем проводе может достигать 500 А/мм², по сравнению с медью 2,8 А/мм², разница в 250 раз оказывает существенную роль в уменьшении объема и массы обмоток трансформатора [6, 7, 8, 9].

Самый эффективный метод уменьшения размеров и массы трансформатора связан с увеличением рабочей частоты электрического тока, но требует тщательного подхода к выбору используемых материалов и конструкции трансформатора [10, 11, 12].

$$(S \cdot S_{ок}) = \frac{P_T}{\sqrt{2} \pi K_{м1} J f B_c} \quad (1)$$

где $S \cdot S_{ок}$ – геометрический размер магнитопровода (площадь сечения стержня и площадь окна сердечника); f – частота сети; B_c – максимальная индукция в стержне; $K_{м1}$ – коэффициент заполнения площади круга сталью; J – плотность тока проводника [13].

Из формулы (1) следует, что частота переменного тока и диаметр сердечника обратно пропорциональны. Вследствие этого существенно уменьшается масса магнитопровода сверхпроводящего трансформатора. При увеличении рабочей частоты уменьшается количество витков обмоток трансформатора. Нужно заметить, что при уменьшении диаметра обмотки уменьшается расстояние между стержнями и тем самым уменьшается площадь окна Ш-образного магнитопровода, следовательно, уменьшается объем и масса железа сердечника.

$$W = \frac{U}{4,44 f B_c S} \quad (2)$$

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЕ «СКИН-ЭФФЕКТ» ПРИ РАБОТЕ ТРАНСФОРМАТОРА НА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ.

Применение повышенной частоты всегда приводит к вытеснению тока к внешней периферии проводника, которое получило название «скин-эффект» [14, 15, 16].

При промышленной частоте 50 и 60 Гц, используемой во всем мире, сопротивление скин-эффекту незначительно и обычно не учитывается. Эффект вытеснения возникает вследствие магнитного потока во внутреннем пространстве проводника, созданным действующим током в проводе. Ток, индуцируемый внутренним магнитным потоком, ближе к центру провода имеет противоположное направление действующему току I и попутное направление по внешнему контуру проводника. Скин-эффект приводит к экспоненциальному уменьшению плотности тока с глубиной.

Неравномерное распределение тока по поперечному сечению проводника

отображаются теоретическим анализом с использованием функций Бесселя, которые представляют наличие внутренней индукции в проводнике, на несколько порядков меньше внешней индукции. Для комплексных амплитуд плотности тока и напряженности магнитного поля описываются следующие уравнения.

$$\frac{d^2 J_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dJ_m}{dr} = j\omega\mu\gamma J_m \quad (3)$$

$$\frac{d^2 \dot{H}_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{H}_m}{dr} - \frac{\dot{H}_m}{r^2} = j\omega\mu\gamma \dot{H}_m \quad (4)$$

Сопротивление цилиндрического проводника определяют суммой сопротивлений внутреннего импеданса проводника и внешнего импеданса.

$$Z = Z_{in} + Z_{ex} \quad (5)$$

Внутреннее сопротивление определяется по выражению.

$$Z_{in} = R_{dc} \cdot \frac{u_a J_0(u_a)}{2 J_1(u_a)} = Re(Z_{in}) + I_m(Z_{in}) \quad (6)$$

где R_{dc} – сопротивление провода на постоянном токе в установившемся режиме; $J_0(u_a)$ и $J_1(u_a)$ – функции Бесселя нулевого порядка и первого рода первого рода соответственно; $Re(Z_{in})$ – действительная составляющая внутреннего сопротивления; $I_m(Z_{in})$ – комплексная индуктивная составляющая внутреннего сопротивления

Внешнее сопротивление определяется по выражению.

$$Z_{ex} = jX_{ex} = j2\pi f L_{ex} \quad (7)$$

Разложение ряда функции Бесселя задается следующим образом.

$$\frac{u_a J_0(u_a)}{2 J_1(u_a)} = 1 - \frac{u_a^2}{8} - \frac{u_a^4}{192} - \frac{u_a^6}{3074} - \dots \quad (8)$$

Электромагнитная поверхностная глубина δ , на которой плотность тока составляет $1/e$ ($\approx 37\%$) от его поверхностной плотности, определяется уравнением [17].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\sigma f\mu}} \quad (9)$$

где σ – проводимость проводника; μ – проницаемость проводника.

От поверхности к оси провода плотность тока J уменьшается по экспоненциальной зависимости.

$$J_z = J_0 \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (10)$$

где J_0 – плотность тока на поверхности; z – глубина производимого расчета;

Из (6) и (7) следует, что чем ближе к оси проводника, тем меньше плотность тока тем самым значительная площадь сечения провода не задействована в передаче электроэнергии.

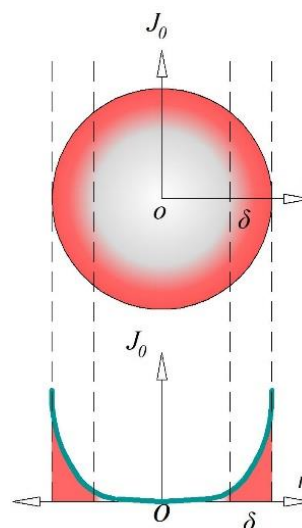


Рис. 1. Графическое отображение плотности тока по сечению проводника.¹

Из анализа следует, что при проектировании сверхпроводящего трансформатора на повышенной частоте необходимо принимать во внимание скин-эффект. В программной среде Elcut профессиональной версии 6.6 методом конечных элементов произведено моделирование вытеснения тока к поверхности для медного проводника диаметром 5,7 мм и плотностью тока 2,4 А/мм² при частоте переменного тока: 200, 400 и 800 Гц. На рисунке 2 представлена цветовая диаграмма вытеснения тока к поверхности проводника. В поперечном сечении медного

¹ Appendix 1

провода площадью 25,5 мм² с шагом дискретизации 0,05 мм получена сетка конечных элементов с 1306 узлами, что в полной мере отображает картину на которой видно, что при частоте 400 Гц и выше более явно проявляется скин-эффект. Медь по магнитным свойствам относится к диамагнетикам, но её магнитная проницаемость больше нуля $\mu = 0,999990$. Это приводит к проникновению магнитного поля вглубь проводника и образованию магнитной индукции определенной напряженностью, что ведет к образованию вихревых токов. Их повышение, в свою очередь, влечет за собой к более интенсивному вытеснению тока к поверхности проводника. В связи с этим возрастает выделение тепла и падение напряжения.

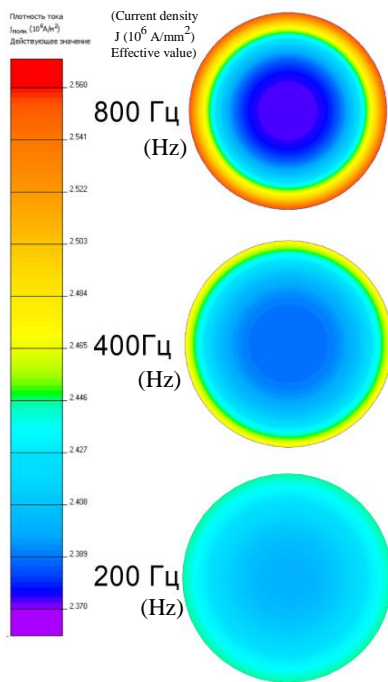


Рис. 2. Цветовая диаграмма вытеснения тока к поверхности проводника при повышении частоты.²

Сверхпроводники являются абсолютными диамагнетиками, магнитная проницаемость которых равна нулю при этом происходит полное вытеснение магнитного поля из объема проводника в сверхпроводящем состоянии. В сверхпроводнике электроны формируют пары, называемые куперовскими парами, которые образуют сверхпроводящее состояние. Они обладают нулевым спином и могут передвигаться без взаимодействия с

кристаллической решеткой, вызывая нулевое сопротивление в материале. Эта подтверждается эффектом вытеснения внешнего магнитного поля из тела сверхпроводника за счет внутреннего вихревого тока (эффект Мейснера) в сверхпроводниках.

ВТСП проводники обладают нулевым сопротивлением при температуре 77 К, следовательно выражение (9) трудно применимо.

Исследование ВТСП трансформатора на повышенных частотах.

В целях исследования произведен анализ характеристик магнитопровода трансформатора на различных частотах электрической сети из магнитомягкого быстрозакаленного аморфного сплава марки 1СР с типом магнитопровода 1В АМЕТ, с магнитными характеристиками ленты указаны на рисунке 3 [18, 19, 20].

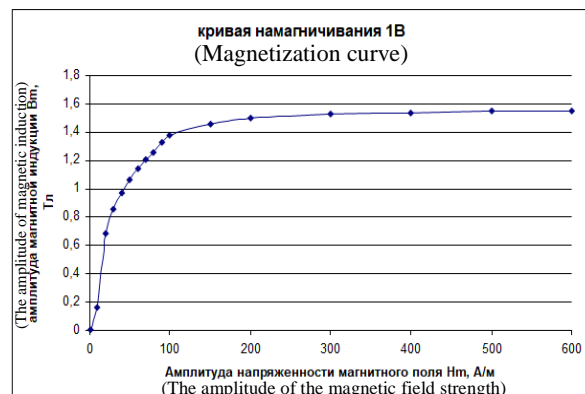


Рис. 3. Магнитная характеристика магнитопровода марки 1В АМЕТ.³

Лента марки 1СР имеет следующие легирующие элементы: В, Si, Р, С, Со, Ва. Полученная закалкой из жидкого состояния вследствие высокой скорости охлаждения (>1000 К/с) металл переходит в пассивное состояние, что приводит к высокой коррозионной стойкости в различных агрессивных средах. Данные свойства аморфных сплавов делают его отличным аналогом обычной электротехнической стали для создания силовых трансформаторов с высокими показателями энергоэффективности [21, 22].

В таблице 1 приведены технические характеристики ВТСП трансформатора.

^{2,3} Appendix 1

Исходные технические характеристики ВТСП трансформатора⁵

Параметр (Parameter)	Величина (Value)	Единица измерения (Unit)
Номинальная мощность (Nominal power)	100	кВА (kVA)
Число фаз (Number of phases)	3	-
Напряжения обмоток ВН (Primary voltage)	10000	В (V)
напряжения обмоток НН (Secondary voltage)	400	В (V)
Схема соединения обмоток (Winding connection)	Δ/Y_H-0	-
Напряжение короткого замыкания (Short-circuit impedance)	4	%
Индукция магнитопровода (core induction)	1,5	Тл (T)
Частота электрического тока (Grid frequency)	50, 200, 400, 800	Гц (Hz)

Ниже в таблице 2 приведена ВТСП трансформатора, работающего при математическая модель и алгоритм расчета различных частотах.

Таблица 2⁶

Алгоритм расчета трансформатора⁷

	Формула (Formula)	Обозначение (Designation)
1	$(S \cdot S_{ок}) = \frac{P_T}{\sqrt{2\pi} K_{мл} J f B_c}$	Габаритный параметр (произведение площади сечения стержня к площади окна магнитопровода) Dimensional parameter (product of the cross-sectional area of the rod to the area of the core window)
2	$E_B = \sqrt{2\pi} f B_c S$	Электродвижущая сила витка (Turnover voltage)
3	$W = \frac{U_{\phi}}{E_B}$	Количество витков обмотки (Number of turns)
4	$S_{пр} = \frac{I_{\phi}}{j}$	Площадь сечения проводника обмотки (The cross-sectional area of the winding conductor) I_{ϕ} – фазный ток; j – плотности тока в проводнике (current densities in the conductor)
5	$W_{сл} = \frac{l_{\phi}}{d}$	Число витков в слое (The number of turns in the layer). Где l_{ϕ} – высота обмотки (Winding height); d – ширина провода (width of the conductor)
6	$N_{сл} = \frac{W}{W_{сл}}$	Количество слоев в обмотке. (Number of layers in the winding)
7	$a_{об} = a N_{сл} + a_g$	Толщина обмотки. (Coil thickness) a – толщина проводника (Conductor thickness); a_g – вентиляционный канал (Ventilation duct).
8	$G_{сл} = V_{см} K_3 \rho_{см}$	Масса магнитопровода (Core weight)

Особый интерес исследования заключается в зависимости между частотой перемагничивания сердечника трансформатора с изменением размеров магнитопровода, потерь на петлю гистерезиса и вихревые токи[23].

Потери на перемагничивании и вихревые токи посчитаны в соответствии с формулой Штейнмеца[13]:

$$P_h = n f B_c^2 G_{сл} \quad (11)$$

$$P_B = y f^2 B_c^2 G_{ct} \quad (12)$$

где y и n – коэффициент, характеризующий ферромагнитный материал;

G_{ct} – масса сердечника трансформатора.

Полученные зависимости потерь в магнитопроводе с увеличением частоты приведены на рисунке 3.

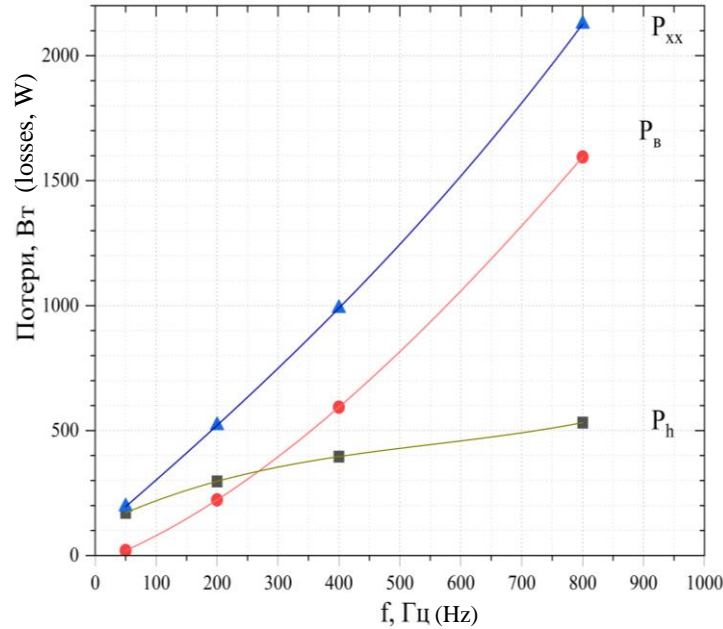
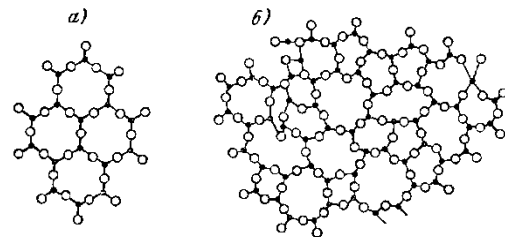


Рис. 4. Зависимости потерь на гистерезис и вихревые токи.⁸

Согласно выражению Штейнмеца (11, 12) и Рис. 4 следует линейная зависимость от повышения частоты для потерь на гистерезис и экспоненциальная зависимость для потерь на вихревые токи. Современные электротехнические стали имеют относительно большую магнитную индукцию насыщения до 2 Тл [24], но низкую магнитную проницаемость, что в свою очередь приводит к значительному увеличению напряженности магнитного поля для достижения необходимой индукции в сердечнике. Тем самым приводит к увеличенной площади петли гистерезиса, что говорит о потерях на перемагничивании.

Для снижения потерь в магнитопроводе, связанных с перемагничиванием сердечника, целесообразно использовать аморфные сплавы, в которых отсутствует строгая периодичность и дальний порядок в расположении атомов, присущая кристаллическому строению магнитомягких электротехнических сталей, которые не имеют меж доменных границ. Благодаря высоким значениям магнитной проницаемости ($\mu = 50000 - 70000$), прочности и твердости, низким значениям

коэрцитивной силы ($H_c \leq 8$ А/м), аморфные сплавы предпочтительно использовать в высокочастотных трансформаторах [25].



а) Кристаллическая решетка; б) аморфная структура

a- Crystal structure; b- amorphous structure

Рис. 5. Сравнение строения кристаллической структуры стали и аморфной структуры.⁹

В современной электротехнической стали, применяемой в трансформаторе, при толщине пластин 0,17–0,5 мм и в зависимости от конструкции магнитопровода соотношение P_B / P_h может изменяться в пределах 0,2–7. При использовании аморфного железа отношение P_B / P_h находится в диапазоне от 0,17–2,9 при повышенных частотах сети 50–800 Гц. Связано это с высоким удельным сопротивлением в пределах 100-300 мкОм·см,

^{8,9}Appendix 1

что несколько больше сопротивления холоднокатаной стали, которая находится в диапазоне 40-80 мкОм·см. [26, 27]

Следующим важным моментом является уменьшение объема сердечника, следовательно, его массы согласно (1).

Зависимость f и массы магнитопровода обратно пропорциональны, как представлено на рисунке 6

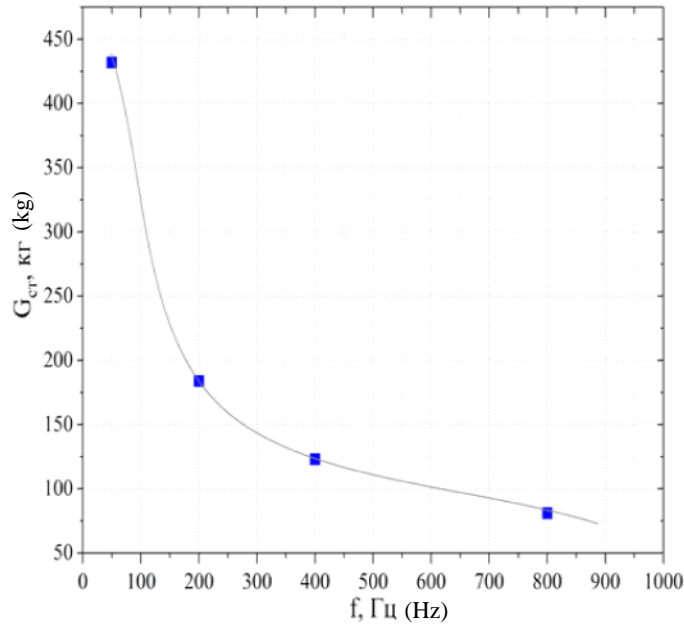


Рис. 6. Зависимость между частотой перемagnичивания и массой сердечника.¹⁰

В работе получена зависимость влияния повышения частоты к увеличению ЭДС, что непосредственно влияет на число витков обмоток трансформатора, как представлено на

рисунке 7. Полученные характеристики ВТСП трансформатора при повышении частоты сведены в таблицу 3.

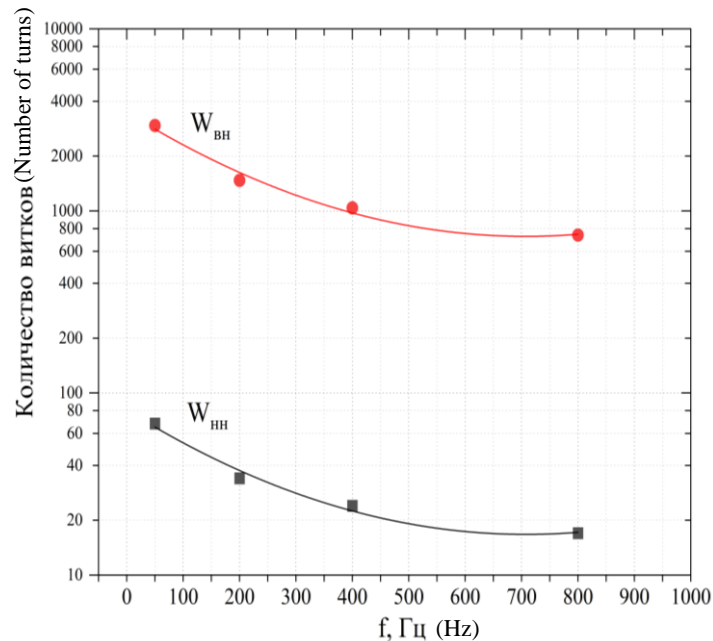


Рис. 7. Зависимость между частотой перемagnичивания сердечника и количества витков на обмотках ВН и НН.¹¹

^{10,11}Appendix 1

Технические параметры ВТСП трансформатора¹³

f частота сети (Grid frequency), Hz	50	200	400	800
d (rod diameter), m	0.135	0,095	0,08	0.067
G _{ст} (the mass of the magnetic circuit), kg	432	184	123	81
E _в (Turnover voltage), V	3.382	6.701	9.623	13.32
w _{нн} (Number of secondary turns)	68	34	24	17
w _{вн} (Number of primary turns)	2945	1473	1040	737
Φ _м (Magnetic flow), Wb	0.015	0.008	0.005	0,004
P _h (Losses on gizeresis), W	171	297	396	532
P _в (Eddy current lose), W	25	223	594	1595
P _{ст} (Core losses), W	196	521	990	2127

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования, подтверждают целесообразность повышение частоты переменного тока питающей электрической сети до значений 400 и далее 800 Гц. Это особенно важно для уменьшения массогабаритных размеров электрооборудования в автономных системах электроснабжения [28].

Показано отдельное влияние повышения частоты на сечение проводников обмоток в связи с явлением «скин-эффекта», на характеристики магнитопровода для которого целесообразно использовать аморфное железо и в целом на массогабаритные размеры трансформатора в целом. Последнее это обстоятельство играет особо важную роль там, где речь идет об увеличении полезной нагрузки за счет элементов системы электроснабжения (проводников, трансформаторов, генерирующих источников) [29].

Полученные зависимости, представленные на Рис. 4, Рис. 6, Рис. 7, показывают, что синтез указанных выше параметров с повышением частоты имеет нелинейный характер по причине экспоненциального возрастания тепловых потерь в магнитопроводе исходя из формул Штейнмеца (11) и (12). Это требует уменьшение магнитной индукции сердечника с повышением частоты электрического тока, что в конечном итоге отражается на количестве витков обмоток и массы сердечника. Наличие криостата требует 20-50 мм толщины стенок для поддержания температуры криогенной среды 77 К. Что в целом компенсируется изоляционными слоями между обмотками и магнитопроводом.

Так, например, массогабаритные размеры ВТСП трансформатора при промышленной

частоте 50 Гц составляют 432 кг, при частоте 400 Гц 123 кг, то есть, 3,5 раза меньше, а при частоте 800 Гц более чем в 5 раз меньше трансформатора на промышленной частоте.

Учитывая, что ВТСП трансформатор при одинаковой частоте более чем в 2-2,5 раза меньше по габаритам традиционного трансформатора. С учетом повышения частоты его массогабаритные размеры почти в 10 раз меньше традиционного трансформатора на промышленной частоте, то есть на «порядок» энергоэффективнее традиционного трансформатора [26], [27].

Отсюда следует, что указанная в регистре частота 200 Гц для судов на подводных крыльях не высока из-за увеличения потерь активной мощности в проводниках с учетом скин-эффекта.

В работе [10] проведено практическое исследование высокочастотного импульсного силового трансформатора со смешанным сердечником при 200 кГц. Автор пришел к выводу, что комбинирование слоев сердечника из аморфного, ферритового и электротехнического железа привело к снижению температуры горячих точек, что позволило повысить номинальную мощность трансформатора. В [14] выполнено численное моделирование скин-эффекта, его влияние на реактивное сопротивление и сравнение с экспериментальными замерами медных трубок при 0,1 – 10⁴ кГц. В работе [28] описывают анизотропию критического тока в сверхпроводящем воздушном трансформаторе при частоте 2,2 кГц. В [24] показано влияние криогенной среды на характеристики магнитопроводов из электротехнического и аморфного железа. Основной новизной и ключевым моментом данной работы является то, что сверхпроводящие обмотки открывают возможность практически неограниченного

повышения частоты в мобильной системе электроснабжения. При этом в последние годы ярко проявляется тенденция к повышению частоты электрооборудования, что позволяет существенно снизить габариты этого электрооборудования особенно это важно для мобильных систем электроснабжения морского, водного транспорта (кораблей и судов) и авиации, так как это позволяет увеличить вес полезного груза и снизить мощность источника генерации на борту. Наряду с этим улучшаются характеристики взлета и посадки и увеличиваться дальность хода транспортного средства. Однако эта тенденция сильно ограничивается явлением вытеснения тока к поверхности проводника, так называемым «скин-эффектом», который увеличивает активное сопротивление проводников и потери активной мощности в них, что снижает энергоэффективность электрооборудования. Так, например, при частоте 400 Гц активное сопротивление возрастает примерно в 2,5-3 раза по сравнению с сопротивлением при промышленной частоте 50 Гц [30]. Вследствие этого потери активной мощности в обмотках трансформаторного электрооборудования возрастают пропорционально от сопротивления. Именно поэтому в оборонной промышленности многих стран частота в качестве приоритетной выбирается величина 400 Гц. В то время как при обмотках из сверхпроводниковых материалов вполне целесообразно использовать частоту 800 и 1000 Гц [31], [32]. Применение ВТСП проводников в электрооборудовании повышенной частоты имеет синергетический эффект ввиду того, что ВТСП является абсолютным диамагнетиком в сверхпроводящем состоянии, что препятствует проникновению магнитного поля вглубь проводника и созданию поверхностного слоя.

Явление сверхпроводимости и возможность обеспечивать ее при температуре жидкого азота (77 К) открывают неограниченные возможности для использования повышенных частот, так как активное сопротивление равно нулю при любой частоте и, следовательно, проблема ограничения частоты полностью исчезает. В настоящее время это еще не осознано электроэнергетическим сообществом. В

работе предпринята попытка показать, что массогабаритные характеристики электрооборудования при принятой для мобильных систем частоте 400 Гц с учетом сверхпроводящих обмоток снижаются в 5-6 раз, а при частоте 800 Гц 9-12 раз, которую мы обосновано предлагаем осваивать.

Синтез характеристик аморфного железа, при сверхпроводимости и повышении частоты решительным образом повышает энергоэффективность электрооборудования с учетом улучшения его массогабаритных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Доказана целесообразность повышения частоты в локальных и автономных системах электроснабжения в место 50 Гц промышленной частоты до значений 800 Гц, а в перспективе до 1000 Гц, что позволяет существенно улучшить энергетические характеристики и значительно снизить массогабаритные параметры трансформаторов с ВТСП обмотками и источников генерации установленных на объекте.

2. Проведенное в работе исследование позволяет утверждать, что явление сверхпроводимости, реализуемое жидким азотом (77 К), как диэлектрической средой, которое ранее практически не использовалось, устраняет скин-эффект в ВТСП проводниках электрического тока, так как активное сопротивление переменному току обнуляется, тем самым открывая возможность неограниченного повышения частоты в системе электроснабжения.

3. Наряду с этим показано, что применение аморфного железа в качестве сердечника высокочастотного трансформатора позволяет существенно снизить потери и повысить значение индукции в магнитопроводе на повышенной частоте, что так же благотворно влияет на технико-экономические показатели электрооборудования.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема "Разработка моделей вейвлет анализа нестационарных режимов электрических сетей для повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей", код темы: FENG-2023-0005)

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

- ¹ Fig. 1. Graphical representation of the current density along the conductor.
- ² Fig. 2. Color diagram of current displacement to the surface of the conductor with increasing frequency.
- ³ Fig. 3. Magnetic characteristic of the magnetic circuit of grade 1 B AMET.
- ^{4,5} Table 1 Initial technical characteristics of the HTS transformer.
- ^{6,7} Table 2. Transformer calculation algorithm.
- ⁸ Fig. 4. Dependences of losses on hysteresis and eddy currents.
- ⁹ Fig. 5. Comparison of the structure of the crystal structure of steel and amorphous structure.
- ¹⁰ Fig. 6. The relationship between the frequency of remagnetization and the mass of the core.
- ¹¹ Fig. 7. The relationship between the frequency of remagnetization of the core and the number of turns on the windings HV and LV.
- ^{12,13} Table 3. Technical parameters of the HTS transformer

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Yingying W. Xingyu Z., Xu C. Influence of saturation levels on transformer equivalent circuit model. *Electrical Engineering*, 2021, vol 72, no. 6, pp.381–387.
- [2] Kryukov D.O., Manusov V.Z. Obzor konstruktсии transformatorov so sverkhprovodyashchimi obmotkami [Overview of transformer designs with superconducting windings]. *Electricity*. 2019, no. 8, pp. 4-16. (In Russian).
- [3] Grilli F., Ashworth S. Measuring transport AC losses in YBCO-coated conductor coils. *Superconductor Science and Technology*, 2007, vol. 20, pp. 794-799.
- [4] Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilenkov S., Kaul A., Vavilov A., Vysotsky V., Fetisov S. 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.
- [5] Zhou J., Chan W., Schwartz J. Quench Detection Criteria for YBa₂Cu₃O_{7-δ} Coils Monitored via a Distributed Temperature Sensor for 77 K Cases. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 5, Art. no. 4703012.
- [6] Hu M., Zhou Q.B., Wang X., Tang F.P., Sheng J., Bian X.Y., Jin Z.J. 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.
- [7] Hellmann S., Abplanalp M., Elschner S., Kudymow A., Noe M. Current limitation experiments on a 1 mva-class superconducting current limiting transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 5, doi: 10.1109/TASC.2019.2906804.
- [8] Lei W., Jiaojiao W., Tian Y., Xiaoning H., Fushou X., Yanzhong L. Film boiling heat transfer prediction of liquid nitrogen from different geometry heaters. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, vol. 129, no. 103294.
- [9] Jaroszynski L., Wojtasiewicz G., Janowski T. Considerations of 2G HTS Transformer Temperature During Short Circuit. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol.28, no4, doi: 10.1109/TASC.2018.2806561.
- [10] Arun P., Practical Study of Mixed-Core High Frequency Power Transformer. *Magnetism*, 2022, no 2, pp. 306-327. doi: 10.3390/2030022 сравнить
- [11] Arun P. Application prospects of hybrid magnetic circuits in high frequency power transformers. *Techrxiv*, 2022, doi: 10.36227/techrxiv.21737858.v1.
- [12] Zabariilo D.A. Features of the calculation of a high-frequency power transformer. *Bulletin of the Dnepropetrovsk National. University of Railway Transport*. 2013, 3 (45), p. 29-35
- [13] Starodubtsev Yu.N. Teoriya i raschet transformatorov maloy moshchnosti [Theory and calculation of a low-power transformer]. – M.: IP Radiosoft 2017. 320 p. ISBN 978-5-93037-321-9.
- [14] Malcolm S. R. Experimental measurements of the skin effect and internal inductance at low frequencies *Article in Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*, 2015 vol.60 , pp.51–69.
- [15] Pein A. *Skin effect, proximity effect and the resistance of circular and rectangular conductors*. 2022. 41 p.
- [16] Corcoran J. Nagy P. B. Compensation of the Skin Effect in Low-Frequency Potential Drop Measurements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, vol. 35, no. 4, doi: 10.1007/s10921-016-0374-4.
- [17] Ibrahim M., Pillay P. Core loss prediction in electrical machine laminations considering skin effect and minor hysteresis loops. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013 vol. 49, no. 5, p.p. 2061-2068, doi: 10.1109/TIA.2013.2260852.
- [18] PJSC "Ashinsky Metallurgical Plant" magnetic tape pipelines made of soft magnetic amorphous alloys and soft magnetic composite material (nanocrystalline alloy) technical specifications 14-123 -215-2009.
- [19] 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
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166373>
- [20] Suzuki K. Amorphous metals Suzuki K., Fujimori H., Hashimoto K. – edited by Masumoto Ts. per. from Japanese – Metallurgy, 1987 328 p.
- [21] Pavlenko T. P. Investigation of amorphous alloys in current transformers of semiconductor circuit breakers. *NTI and production efficiency*, 2013, no. 5(m), pp. 42-46.
- [22] 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.
- [23] Kurita N., Nishimizu A., Kobayashi C., Tanaka Y., Yamagishi A., Ogi M. Magnetic properties of simultaneously excited amorphous and silicon steel hybrid cores for higher efficiency distribution transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, vol. 54, no. 11, doi: 10.1109/TMAG.2018.2835498.
- [24] Pronto1 A. G., Maurício A., Pinal J. M. Magnetic properties measurement and discussion of an amorphous power transformer core at room and liquid nitrogen temperature. *Journal of Physics: Conference Series* 507 (2014) 032018 doi:10.1088/1742-6596/507/3/032018.
- [25] Tchaikovskiy V. P., Nasypanaya E. P., Martynyuk A. I. Opredelenie poter v stali transformatora pri razlichnykh chastotakh i nesinusoidalnosti magnitnogo potoka s uchetom sootnosheniya gisterezisnykh i vikhrevykh poter [Determination of losses in transformer steel at different frequencies and non-sinusoidal magnetic flux, taking into account the ratio of hysteresis and vortex losses]. *Electrical Engineering and Electrical Equipment*, 2008, no. 71, p.p. 61–63. (In Russian).
- [26] Shen B., Grilli F., Coombs T. Review of the AC loss computation for HTS using H formulation. *Superconductor Science and Technology*, 2020 vol. 33, no. 3, Art. no. 033002.
- [27] Kondratowicz-Kucewicz B., Wojtasiewicz G. The proposal of a transformer model with winding made of parallel 2g hts tapes with transpositioners and its contact cooling system. *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 4., doi: 10.1109/TASC.2018.2807585.
- [28] Liu G., Zhang G., Liu G., Wang H., Jing L. Experimental and numerical study of high frequency superconducting air-core transformer. *Superconducting Science Technology*, 2021, vol. 34, no. 8, Art. no. 85011.
- [29] Nanato N., Adachi T., Yamanishi T. Development of single-phase bi2223 high temperature superconducting transformer with protection system for high frequency and large current source. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1293, 31st International Symposium on Superconductivity (ISS2018) 12–14 December 2018, Tsukuba, Ibaraki, Japan doi 10.1088/1742-6596/1293/1/012072.
- [30] 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.
- [31] Sarker P. C., Md. Islam R., Guo Y., Zhu J., Lu H. Y. State of art technologies for development of high frequency transformers with advanced magnetic materials. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 2, DOI: 10.1109/TASC.2018.2882411.
- [32] 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.

Сведения об авторах



Манусов Вадим Зиновьевич
 д. т. н., профессор кафедры «ЭиА». Сибирский государственный университет водного транспорта. Область научных интересов: применение искусственного интеллекта для планирования и оптимизации режимов электроэнергетических систем
 E-mail: manusov36@mail.ru



Галеев Ратмир Гаязович
 аспирант кафедры «ЭиА». Сибирский государственный университет водного транспорта. Область научных интересов. Исследование и разработка высокотемпературных сверхпроводящих трансформаторов
 E-mail: galeew.ratmir@yandex.ru