

DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-46-57

УДК 621.31; 004.94

ББК 32.859

К.В. БЫКОВ, Н.М. ЛАЗАРЕВА, В.М. ЯРОВ

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА РАБОТУ ИНВЕРТОРА

Ключевые слова: инвертор с синусоидальным выходным напряжением; моделирование нелинейного трансформатора в Simulink Matlab; кривая намагничивания; петля гистерезиса; плавный пуск.

В статье рассматриваются режимы включения инвертора с синусоидальным выходным напряжением при работе с нелинейным трансформатором. Исследование реализуется имитационным моделированием в Simulink Matlab. Симуляция проводится с использованием SPS-модели нелинейного трансформатора с различными кривыми намагничивания сердечника. Показано, что плавный пуск инвертора, выполняемый постепенным увеличением синусоидального модулирующего напряжения, устраняет броски первичного тока и тока намагничивания независимо от угла включения модулирующего напряжения. Рассмотрен процесс формирования петли гистерезиса на заданный магнитный поток. Приведены временные диаграммы прямого пуска преобразователя при различных значениях начальной фазы модулирующего напряжения для сердечника с петлей гистерезиса. Показано, что статические характеристики инвертора не зависят от вида кривой намагничивания сердечника трансформатора.

В установках бесперебойного электропитания инвертор преобразует постоянное напряжение аккумуляторной батареи в переменное синусоидальное напряжение частоты ω благодаря фильтру $L_\phi C_\phi$ (рис. 1) и тому, что длительность импульсов управления транзисторами инвертора модулируется синусоидальным сигналом $U_m \sin(\omega t)$ в пределах каждого полупериода выходного напряжения [1].

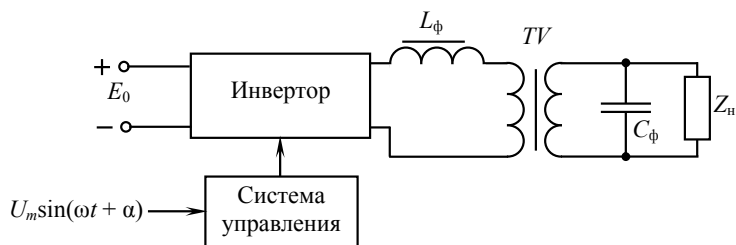


Рис. 1. Схема преобразования постоянного напряжения в синусоидальное переменное

Для выполнения имитационного моделирования режимов работы инвертора была разработана виртуальная Simulink-модель преобразователя (рис. 2) и системы управления силовыми ключами Subsystem, реализующей синусоидальное широтно-импульсное модулирование длительности включенного состояния транзисторов [5].

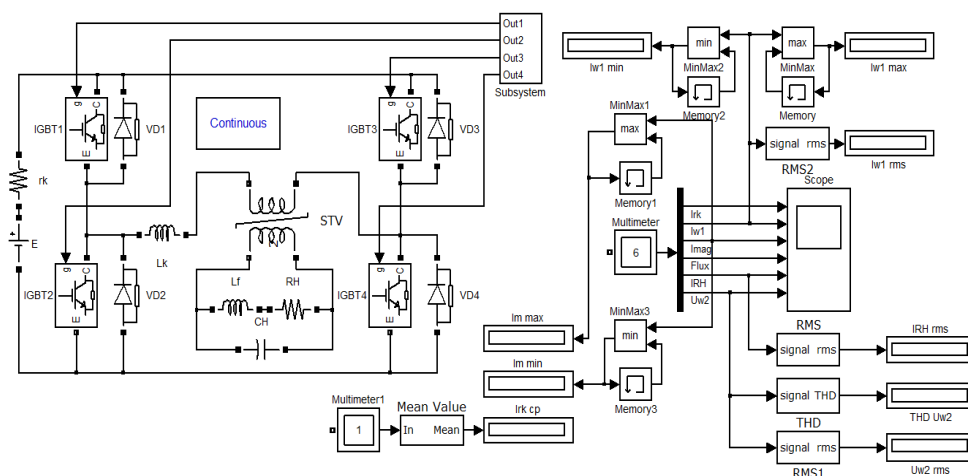


Рис. 2. Simulink-модель преобразователя с нелинейным трансформатором, измерительными и регистрирующими приборами

В пусковом режиме инвертора наблюдаются броски как тока первичной обмотки, так и тока намагничивания трансформатора, которые зависят от вида кривой намагничивания материала сердечника. В [2] было показано, что при одной и той же характеристике намагничивания амплитуды бросков токов трансформатора в значительной степени зависят от значения угла α включения синусоидального модулирующего напряжения. Причем характер этих зависимостей различен для тока первичной обмотки трансформатора (рис. 3) и тока намагничивания (рис. 4).

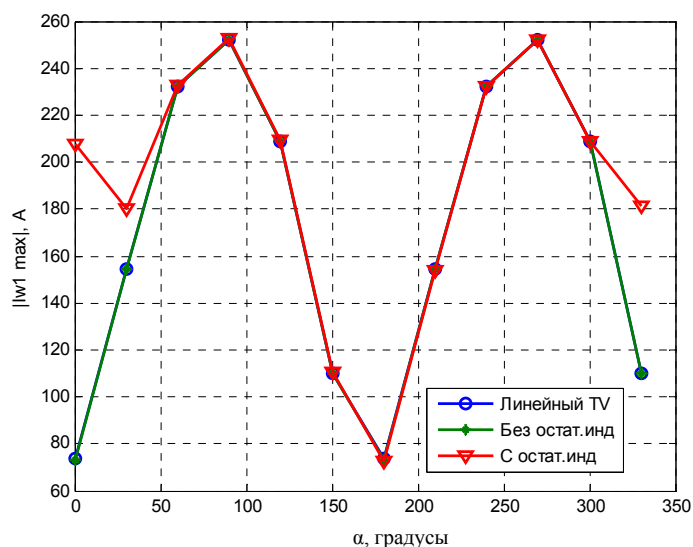


Рис. 3. Зависимость амплитуды тока первичной обмотки трансформатора от угла включения модулирующего напряжения

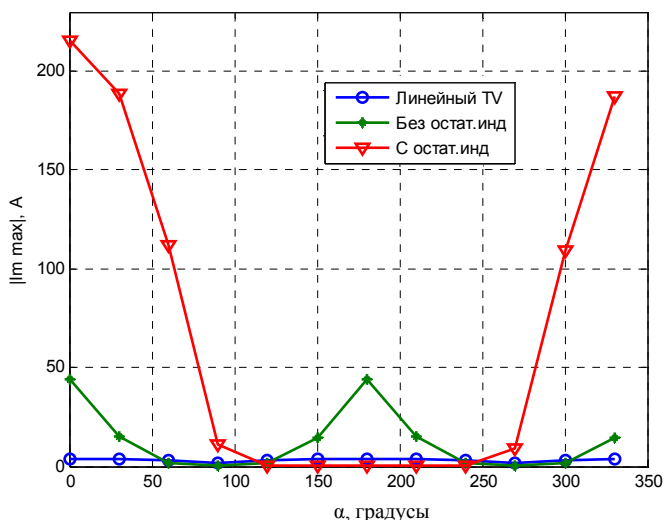


Рис. 4. Зависимость амплитуды тока намагничивания трансформатора от угла включения модулирующего напряжения

Наибольшее значение броска первичного тока трансформатора наблюдается при угле включения модулирующего напряжения $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 270^\circ$ независимо от того, какая виртуальная модель трансформатора использовалась при имитационном моделировании. Это можно объяснить тем, что длительность включенного состояния транзисторов инвертора при таких значениях угла α максимальная. Соответственно наименьшее значение броска тока первичной обмотки имеет место при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$, при которых обеспечивается минимальная длительность включенного состояния транзисторов инвертора. Исключение составляет трансформатор, кривая намагничивания которого имеет ненулевое значение остаточного потокоцепления: при $\alpha = 0^\circ$ бросок тока первичной обмотки трансформатора не является минимальным.

Для тока намагничивания нелинейного трансформатора, кривая намагничивания которого без остаточного потокоцепления, картина с точностью до наоборот: наибольшие броски при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$, наименьшие – при $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 270^\circ$ (рис. 4). Ток намагничивания нелинейного трансформатора с ненулевым остаточным потокоцеплением имеет максимальное значение при угле включения модулирующего напряжения $\alpha = 0^\circ$.

На практике затруднительно реализовать включение инвертора на заданный угол α . Значение бросков первичного тока и тока намагничивания в пусковом режиме можно уменьшить, используя плавный пуск инвертора. На рис. 5 приведены временные диаграммы плавного пуска инвертора, при котором синусоидальное модулирующее напряжение плавно увеличивается на интервале времени от 0 до 0,01 с.

Быстрый плавный пуск позволил избавиться от бросков тока, потребляемого из сети, и тока первичной обмотки трансформатора. Амплитуда тока намагничивания также значительно снизилась – при прямом пуске ее значение превышало 200, а при плавном – не достигает и 40 А. При необходимости

еще большего ограничения тока намагничивания время плавного пуска можно увеличить.

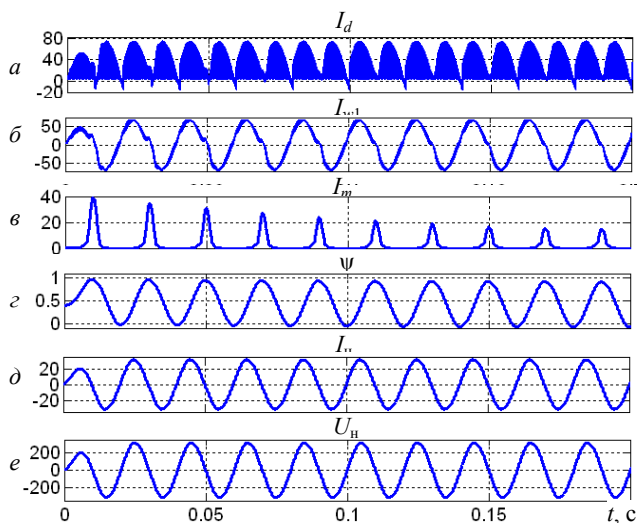


Рис. 5. Временные диаграммы плавного пуска инвертора с нелинейным трансформатором с остаточным потокоцеплением $\psi_0 = 0,4$ Вб при угле включения модулирующего напряжения $\alpha = 0^\circ$:

a – ток, потребляемый от источника; *b* – ток первичной обмотки трансформатора; *в* – ток намагничивания; *г* – потокоцепление; *д* – ток нагрузки; *e* – напряжение нагрузки

На рис. 6. представлены осциллограммы, аналогичные таковым на рис. 5, но интервал плавного пуска увеличен в десять раз. В результате максимальное значение тока намагничивания снизилось до 35 А, токи I_d и I_{w1} значительных изменений не претерпели.

Симуляция показала, что если синусоидальное модулирующее напряжение на интервале плавного пуска изменять от значения 10–20 % амплитуды установившегося значения до номинальной амплитуды, то при пуске инвертора значение первичного тока не превысит установившегося значения при любом угле α , т.е. выбросов не будет. В качестве примера на рис. 7 показаны временные диаграммы плавного пуска инвертора для значения угла $\alpha = 90^\circ$.

При периодическом включении и выключении трансформатора необходимо использовать кривую намагничивания с гистерезисом (рис. 8) [3, 6]. Материалы с низкими потерями, например аморфные, имеют узкую петлю гистерезиса, поэтому для упрощения часто используют безгистерезисную основную кривую намагничивания. Электротехнические стали имеют более широкую петлю гистерезиса, и для симуляции процессов необходимо учитывать не только основную кривую, но и нисходящую и восходящую ветви петли. В этом случае для выполнения моделирования необходимо сформировать внешний mat-файл, содержащий координаты, задающие кривую намагничивания [5]. Параметры настройки блока Saturable Transformer для модели трансформатора с сердечником из электротехнической стали 3413 с петлей гистерезиса с остаточным потокоцеплением 0,4 Вб показаны на рис. 9.

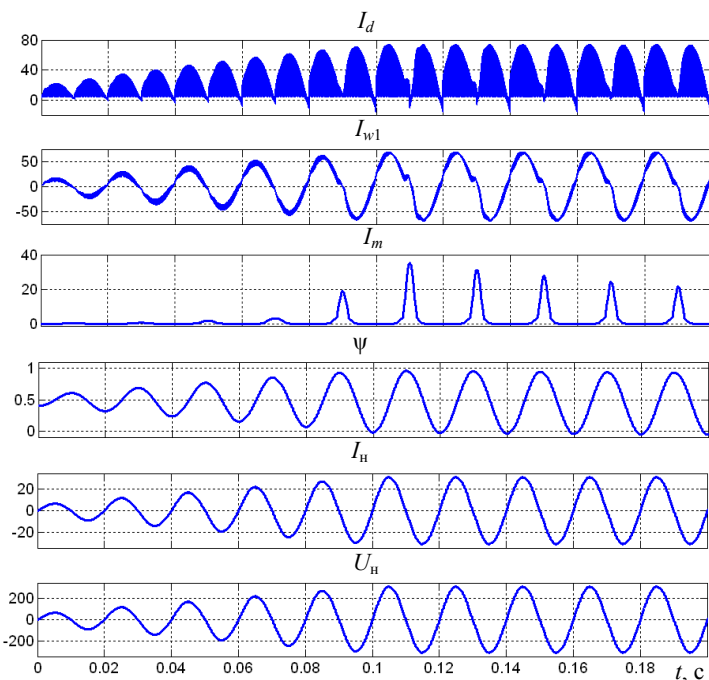


Рис. 6. Временные диаграммы плавного пуска инвертора продолжительностью 0,1 с с нелинейным трансформатором с остаточным потокоцеплением $\psi_0 = 0,4$ Вб при угле включения модулирующего напряжения $\alpha = 0^\circ$ (обозначения кривых соответствуют таковым на рис. 5)

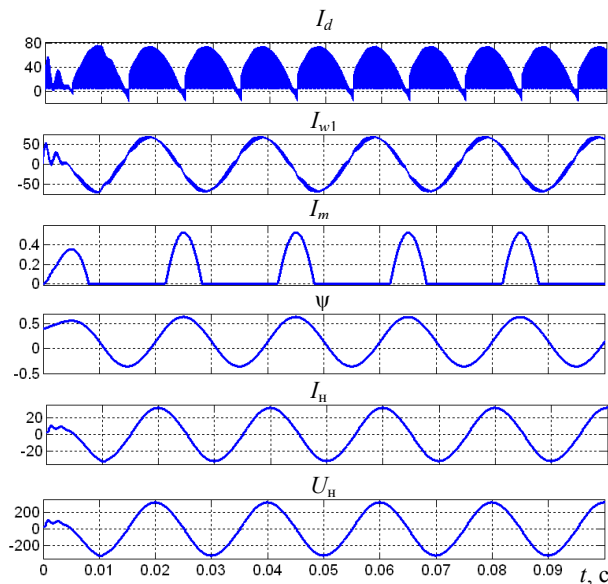


Рис. 7. Временные диаграммы плавного пуска инвертора с нелинейным трансформатором, характеристика намагничивания которого имеет остаточное потокоцепление $\psi_0 = 0,4$ Вб, при угле включения модулирующего напряжения $\alpha = 90^\circ$ (обозначения кривых соответствуют таковым на рис. 5)

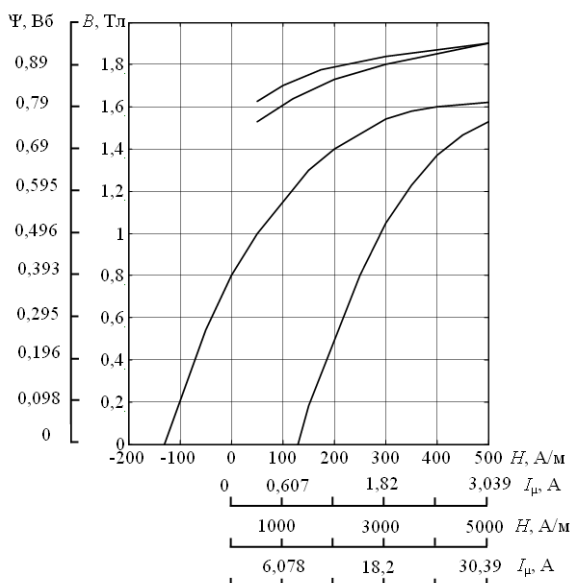


Рис. 8. Петля гистерезиса трансформатора с сердечником из электротехнической стали 3413

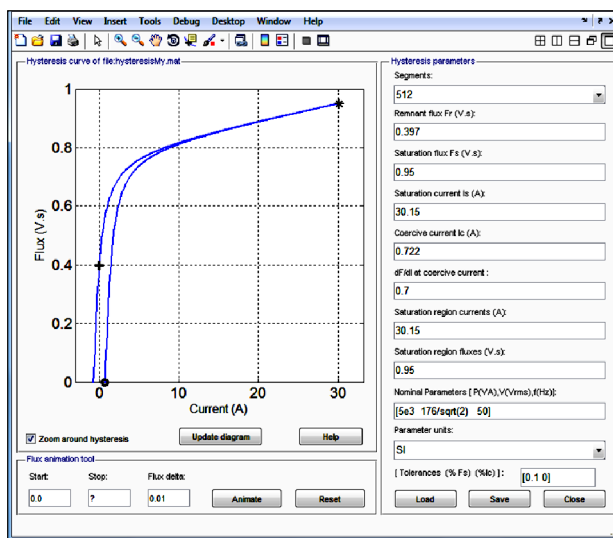


Рис. 9. Задание петли гистерезиса в Simulink-модели нелинейного трансформатора

Для моделирования гистерезиса в Simulink необходимо задать координаты трех точек: остаточное потокосцепление Remanent flux Fr (на рис. 9 эта точка отмечена крестиком); ток при нулевом потокосцеплении Coercive current (точка отмечена кружком); потокосцепление и ток насыщения Saturation flux Fs и Saturation current Is, соответственно (точка отмечена символом "x").

Временные диаграммы прямого пуска инвертора с углом $\alpha = 90^\circ$ и нелинейным трансформатором с гистерезисом (рис. 8) представлены на рис. 10. Наблюдаются броски тока, потребляемого от сети и первичного тока трансформатора, превышающие 250 А. Искажение режима коснулось и нагрузки – в кривых тока и напряжения появились значительные выбросы. На рис. 11 приведена петля гистерезиса, полученная в результате моделирования режима работы инвертора в Simulink Matlab [5].

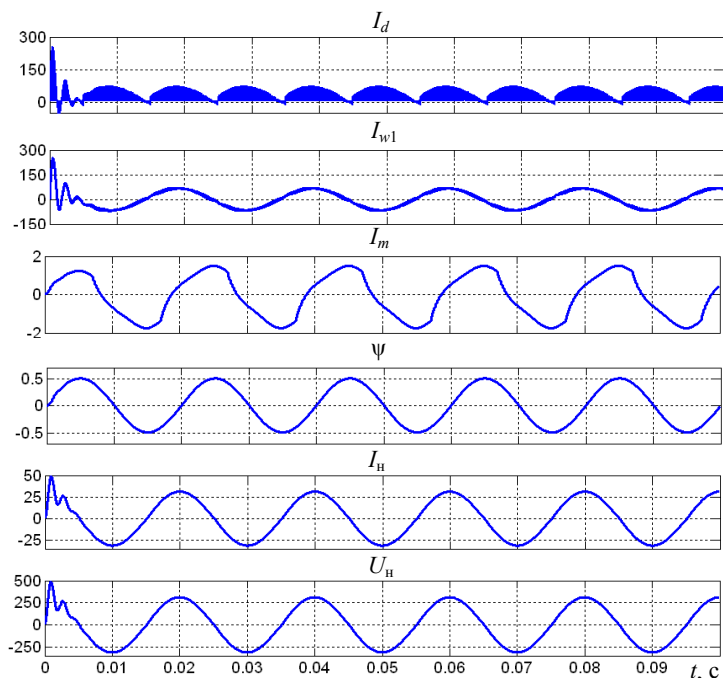


Рис. 10. Временные диаграммы работы инвертора с углом включения модулирующего напряжения $\alpha = 90^\circ$ и нелинейным трансформатором, имеющим кривую намагничивания с гистерезисом (обозначения кривых соответствуют таковым на рис. 5)

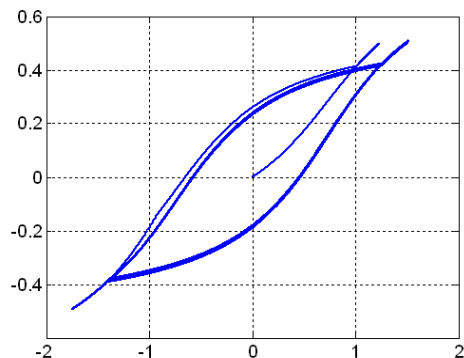


Рис. 11. Петля гистерезиса, полученная моделированием режима работы инвертора с углом включения модулирующего напряжения $\alpha = 90^\circ$

Как и в случае нелинейного трансформатора с кривой намагничивания без гистерезиса, снижение бросков тока можно обеспечить, выполнив плавный пуск преобразователя или уменьшив значение остаточного потокосцепления.

Для уменьшения значения ψ_0 в петле гистерезиса можно ввести немагнитный зазор в магнитопроводе трансформатора. Получить модифицированную петлю $\psi'(I_m)$ можно, используя диаграмму сдвига Релея (рис. 12) [4].

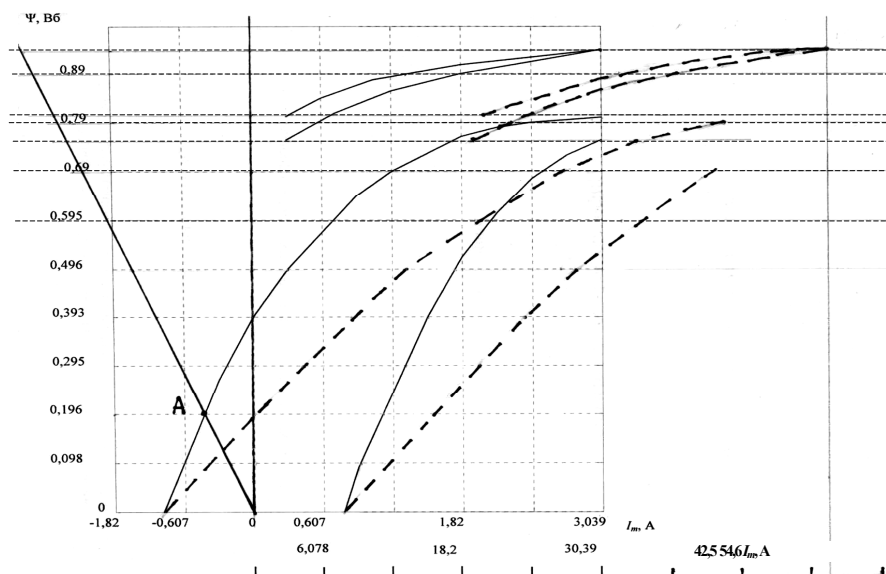


Рис. 12. Иллюстрация метода сдвига Релея для построения характеристики сердечника с зазором

Технология использования метода сдвига Релея заключается в выполнении следующих шагов. На ниспадающей ветви исходной петли гистерезиса откладывается точка A , ордината которой соответствует требуемому значению остаточного потокосцепления, например, $\psi'_0 = 0,2$ Вб. Из точки $(0,0)$ через точку A проводится прямая OA . Точки петли $\psi'(I_m)$ получаются путем смещения по горизонтали соответствующих точек исходной петли $\psi(I_m)$ на расстояния, определяющиеся отрезками, заключенными между OA и вертикалью, восстановленной в точке $(0,0)$.

Изменение потокосцепления в зависимости от тока намагничивания, полученное в результате моделирования в Simulink Matlab пуска инвертора, приведено на рис. 13 для двух значений остаточного потокосцепления ψ_0 0,2 и 0,4 Вб.

На рис. 14 показаны осциллограммы тока намагничивания трансформатора, имеющего кривую намагничивания с гистерезисом, для двух значений остаточного потокосцепления при прямом пуске инвертора. Снижение остаточного потока за счет введения немагнитного зазора приводит к увеличению тока намагничивания для $\psi_0 = 0,2$ Вб по сравнению с таковым для случая петли с остаточным потокосцеплением, равным 0,4 Вб.

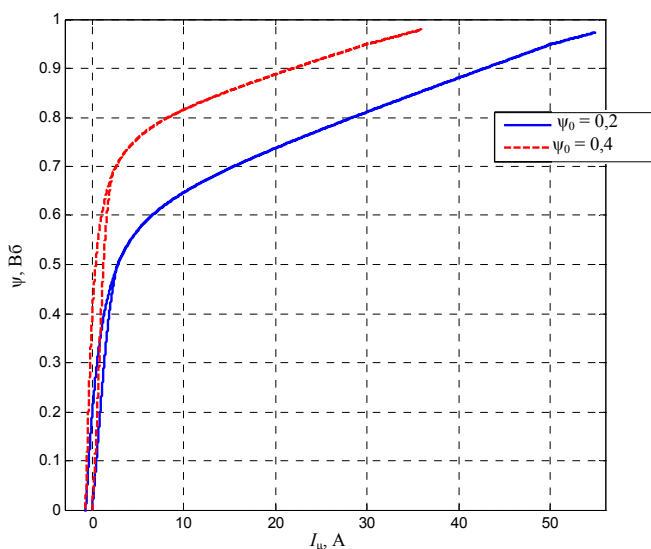


Рис. 13. Изменение потокосцепления в зависимости от тока намагничивания, полученное в результате моделирования режимов работы инвертора для двух значений остаточного потокосцепления ψ_0 0,2 и 0,4 Вб

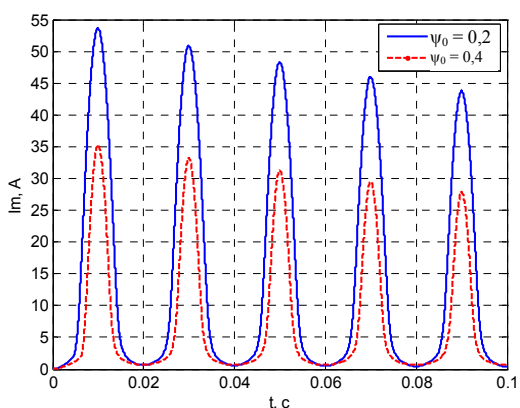


Рис. 14. Осциллограммы тока намагничивания трансформатора с различными значениями остаточного потокосцепления петли гистерезиса

Изменение петли гистерезиса не сказалось на параметрах установившегося режима преобразователя. Нагрузочные характеристики инвертора с нелинейным трансформатором с учетом петли гистерезиса для двух значений остаточного потокосцепления приведены на рис. 15, а на рис. 16 представлены зависимости КПД преобразователя от тока нагрузки.

Статические характеристики практически не зависят от значения остаточного потокосцепления в петле гистерезиса, следовательно, для данного трансформатора введение немагнитного зазора, снижающего ψ_0 , не оказывает влияния на установившийся режим работы инвертора.

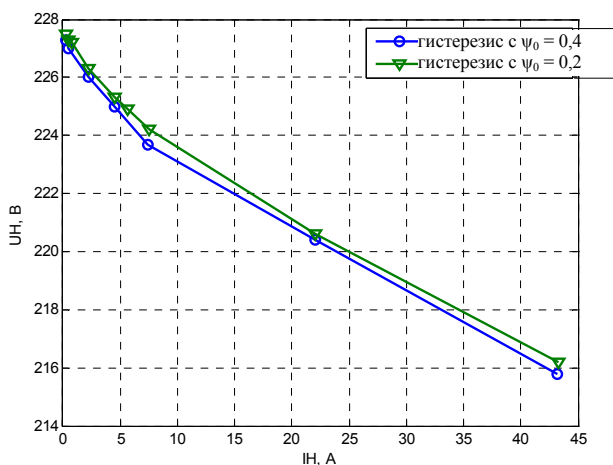


Рис. 15. Нагрузочные характеристики инвертора с нелинейным трансформатором с учетом петли гистерезиса для двух значений остаточного потокосцепления

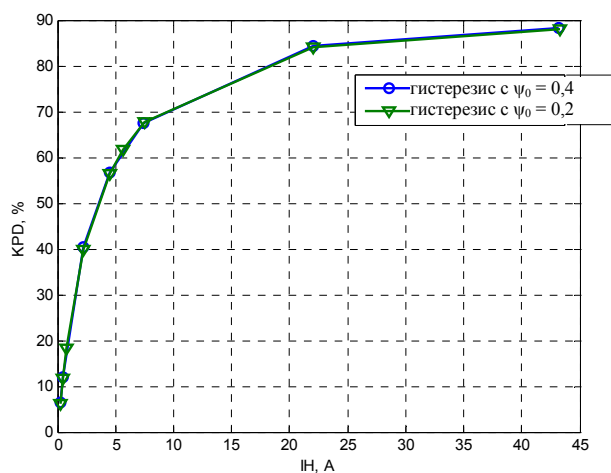


Рис. 16. Зависимости КПД от тока нагрузки инвертора с нелинейным трансформатором с учетом петли гистерезиса для двух значений остаточного потокосцепления

Выводы. 1. Вид характеристики намагничивания сердечника трансформатора $B = f(H)$ определяет значение бросков токов трансформатора в переходном режиме.

2. Для исключения бросков первичного тока трансформатора необходим плавный пуск инвертора.

3. Уменьшение остаточного потокосцепления путем введения немагнитного зазора позволяет снизить броски тока первичной обмотки трансформатора в переходном режиме.

Литература

1. Быков К.В., Лазарева Н.М., Мальшев Д.Г., Павлов Ю.В., Яров В.М. Транзисторный инвертор с синусоидально широтно-импульсной модуляцией // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та, 2018. С. 390–392.
2. Быков К.В., Лазарева Н.М., Яров В.М. Влияние характеристик трансформатора на работу инвертора // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 57–66.
3. Важнов А.Н. Электрические машины. Л.: Энергия, 1969. 360 с.
4. Ицхоки Я.С. Импульсные трансформаторы. М.: Сов. радио, 1950. 745 с.
5. Лазарева Н.М., Яров В.М. Компьютерное моделирование резонансных инверторов. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. 498 с.
6. Яров В.М., Вебер В.Л. Переходные процессы при периодическом включении трансформатора // Специальные вопросы электротермии. Вып. 10. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1984. С. 83–95.

БЫКОВ КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ – заместитель директора департамента низковольтных комплектных устройств и комплектных распределительных устройств по НИОКР, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (bykov_kv@ekra.ru).

ЛАЗАРЕВА НАДЕЖДА МИХАЙЛОВНА – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (lana21lana21@mail.ru).

ЯРОВ ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (vicjar@mail.ru).

Konstantin V. BYKOV, Nadezhda M. LAZAREVA, Viktor M. YAROV
INFLUENCE OF CHARACTERISTICS
OF A NONLINEAR TRANSFORMER TO WORK THE INVERTER

Key words: inverter with a sinusoidal output voltage; simulation of a nonlinear transformer in Simulink Matlab; magnetization curve; hysteresis loop; smooth start.

The article deals with the modes of switching on an inverter with a sinusoidal output voltage when working with a nonlinear transformer. The study is implemented by simulation modeling in Simulink Matlab. Simulation is carried out using the SPS model of a nonlinear transformer with various core magnetization curves. It is shown that a soft start of the inverter, performed by a gradual increase in the sinusoidal modulating voltage, eliminates in-rushes of the primary current and the magnetization current, regardless of the modulation voltage switching angle. The process of forming a hysteresis loop for a given magnetic flux is considered. The time diagrams of the direct starting-up the converter are given at various values of the modulation voltage initial phase for a core with a hysteresis loop. It is shown that the statistical characteristics of the inverter do not depend on the type of the transformer's core magnetization curve.

References

1. Bykov K.V., Lazareva N.M., Malyshev D.G., Pavlov Yu.V., Yarov V.M. *Tranzistornyi inverter s sinusoidal'no shirotno-impul'snoi modulyatsiei* [Sinusoidal PWM Transistor Inverter]. *Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy 11-i Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Proc of 11th Russ. Conf. «Information technologies in electronics and power»]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2018, pp. 390–392.

2. Bykov K.V., Lazareva N.M., Yarov V.M. *Vliyaniye kharakteristik transformatora na rabotu invertora* [Influence of transformer characteristics to work the inverter]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2020, no. 1, pp. 57–66.

3. Vazhnov A.N. *Elektricheskiye mashiny* [Electric cars]. Leningrad, Energiya Publ, 1969, 360 p.

4. Itskhoki YA.S. *Impul'snyye transformatory* [Pulse transformers]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1950, 745 p.

5. Lazareva N.M., Yarov V.M. *Komp'yuternoye modelirovaniye rezonansnykh invertorov* [Computer simulation or resonant inverters]. Cheboksary, Chuvash Publishing House, 2011, 498 p.

6. Yarov V.M., Veber V.L. *Perekhodnyye protsessy pri periodicheskom vklyuchenii transformatora* [Transient processes with periodic switching on of the transformer]. *Spetsial'nyye voprosy elektrotermii*. Вып. 10 [Special questions of electrothermia. Issue 10]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 1984, pp. 83–95.

KONSTANTIN V. BYKOV – Deputy Director, Department of Low Voltage Complete Devices and Complete Switchgears for R&D, EKRA Research and Production Enterprise Ltd, Russia, Cheboksary (bykov_kv@ekra.ru).

NADEZHDA M. LAZAREVA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Electronics, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (lana21lana21@mail.ru).

VIKTOR M. YAROV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Electronics, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (vicjar@mail.ru).

Формат цитирования: *Быков К.В., Лазарева Н.М., Яров В.М.* Влияние характеристик нелинейного трансформатора на работу инвертора // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 46–57. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-46-57.