

ВЛИЯНИЕ НЕИДЕАЛЬНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА НА ПРОЦЕССЫ В ПРЯМОХОДОВОМ ДВУХТАКТНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Ю.В. Руденко, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Предложена математическая модель для анализа процессов в прямоходовом преобразователе на основе полумостового инвертора с учетом неидеальности трансформатора. Рассчитаны графические зависимости среднего значения и коэффициента пульсаций выходного тока преобразователя при изменении индуктивности рассеяния обмоток и коэффициента трансформации силового трансформатора. Библ. 5, рис. 4.

Ключевые слова: прямоходовой двухтактный преобразователь, индуктивность рассеяния, высоковольтное электротехнологическое оборудование.

Прямоходовые двухтактные преобразователи широко применяются в системах электропитания различного назначения, в том числе электродугового технологического оборудования. Их особенностью является необходимость использования высокопотенциальных трансформаторов, обеспечивающих помимо основных функций преобразования энергии и гальваническую развязку между входными и выходными узлами системы. Однако конструктивное обеспечение высокопотенциальной гальванической развязки между обмотками в трансформаторе обуславливает наличие значительных по величине индуктивностей рассеяния обмоток, характеризующих неидеальность трансформатора. Такая неидеальность силового трансформатора существенным образом влияет на процессы передачи энергии преобразователем [1, 2]. Анализу процессов в прямоходовых двухтактных преобразователях посвящен ряд работ [3, 5]. Однако предлагаемые в основном подходы не позволяют в полной мере рассчитать параметры установившегося процесса с учетом паразитных параметров силового трансформатора. Поэтому анализ процессов в преобразователях с учетом больших индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора, выбор в связи с этим оптимальных параметров преобразователя, повышающих его эффективность, являются актуальной задачей. В работе [4] предложена математическая модель для исследования процессов с учетом индуктивности рассеяния в обратногоходовом преобразователе. Рассмотрим аналогичный подход к составлению математической модели для анализа процессов в двухтактном прямоходовом преобразователе.

Схема двухтактного прямоходового преобразователя на основе полумостового инвертора изображена на рис.1, где конденсаторы полумоста показаны в виде источников ЭДС с напряжением $E = U_{вх}/2$. В режиме максимальной длительности импульсов управления, выполняемых системой управления СУ, когда $T_i = T/2$ (T – период рабочей частоты), схемы замещения преобразователя имеют вид, представленный на рис. 2.

На схемах показаны элементы, величины которых приведены к первичной стороне схемы замещения трансформатора. На каждом полупериоде функционирования инвертора имеются по два интервала работы. После смены полярности напряжения на обмотках трансформатора ток дросселя I_{Ld} замыкается через оба диода выпрямителя на нагрузку R_n . Этот отрезок времени T_0 соответствует интервалу отдачи энергии дросселя L_d , накопленной на предыдущем интервале, в нагрузку (рис. 2 а). На этом отрезке времени напряжение на обмотках трансформатора равно нулю и входное напряжение E прикладывается к индуктивности рассеяния L_s . Ток индуктивности рассеяния изменяется от величины $+I_{Ls}$ до $-I_{Ls}$, где $I_{Ls} = I_{dav}/K_{TP}$, I_{dav} – среднее значение тока дросселя; K_{TP} – коэффициент трансформации силового трансформатора Tr . Обозначая полное изменение тока индуктивности рассеяния как ΔI_{Ls} , можем записать

$$\Delta I_{L_s} = 2 \frac{I_{dav}}{K_{TP}}. \quad (1)$$

После достижения величиной тока индуктивности рассеяния предельного значения I_{L_s} начинается интервал T_H накопления дросселем L_d энергии от источника E . При этом напряжение на индуктивности рассеяния практически равно нулю. Напряжение источника E прикладывается к приведенным к первичной стороне дросселю $L'_d = K_{TP} L_d$ и нагрузке $R'_n = K_{TP} R_n$ (рис. 2 б). Данный интервал накопления энергии продолжается до следующего момента переключения транзисторов инвертора. Таким образом,

$$T_O + T_H = T/2. \quad (2)$$

Подобное рассмотрение процессов в инверторе позволяет записать систему дифференциальных уравнений, описывающих взаимосвязь параметров процессов в преобразователе:

$$\begin{aligned} L_s \frac{dI_{L_s}}{dt} &= E; \\ L'_d \frac{dI'_d}{dt} &= -R'_n I'_d; \\ L'_d \frac{dI'_d}{dt} + R'_n I'_d &= E. \end{aligned} \quad (3)$$

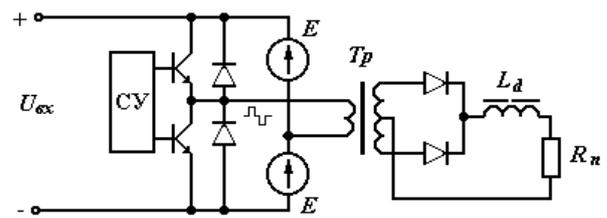


Рис. 1

Для дальнейшего анализа будем пренебрегать активными потерями в обмотках трансформатора, считать пульсации тока дросселя несоизмеримо малыми по сравнению с постоянной составляющей и принимать во внимание линейный характер изменения токов в индуктивностях схемы замещения.

Учитывая взаимосвязь приведенных величин схемы замещения трансформатора с реальными значениями $L'_d = L_d K_{TP}^2$, $R'_n = R_n K_{TP}^2$, $I'_d = I_d / K_{TP}$, а также используя в системе с записанными дифференциальными уравнениями (3) дополнительные соотношения (1), (2) и переходя от функций дифференцирования к приращениям, получаем окончательную систему уравнений:

$$\begin{aligned} K_{TP} \left(L_d \frac{\Delta I_d}{T_H} + R_n I_{dav} \right) &= E; \\ L_s \frac{\Delta I_{L_s}}{T_O} &= E; \\ L_d \frac{\Delta I_d}{T_O} &= R_n I_{dav}; \end{aligned} \quad (4)$$

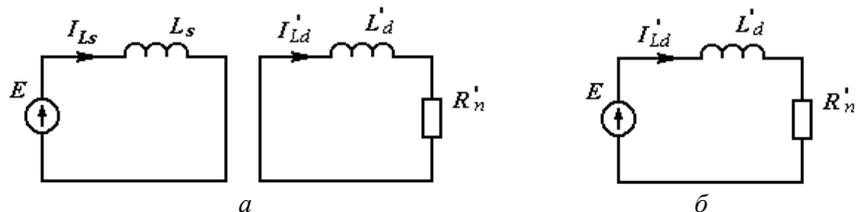


Рис. 2

$$\Delta I_{L_s} = 2 \frac{I_{dav}}{K_{TP}};$$

$$T_O + T_H = T/2.$$

Полученная система нелинейных уравнений (4) позволяет рассчитать основные параметры работы инвертора и определить замкнутое решение для установившегося процесса с помощью любого математического обеспечения. Например, задавая параметры входного напряжения $E = U_{вх} / 2$, сопротивления нагрузки R_n , измеренного значения индуктивности рассеяния обмоток L_s , величины индуктивности выходного дросселя L_d , периода T рабочей частоты инвертора, а также необходимую величину среднего выходного тока преобразователя (тока дросселя I_{dav}), можно определить не только требуемую величину коэффициента трансформации трансформатора, но также проанализировать и величину пульсаций выходного тока ΔI_d , временные интервалы процесса - T_H , T_O .

Используя полученную математическую модель преобразователя, с помощью программного пакета *Mathcad* определяем зависимости среднего выходного тока преобразователя (тока дросселя) I_{dav} и коэффициента пульсаций выходного тока $K_{П}$ от величины индуктив-

ности рассеяния L_s при различных коэффициентах трансформации K_{TP} . На рис. 3 представлены данные зависимости при заданных параметрах схемы: $U_{вх} = 300$ В, $R_n = 5$ Ом, $L_d = 1$ мГн, $T = 40$ мкс. Результаты расчетов подтверждают, что увеличение индуктивности рассеяния обмоток трансформатора приводит к уменьшению средней величины выходного тока, которую можно обеспечить при данных параметрах. Причем наиболее резкое уменьшение величины среднего тока с наибольшим диапазоном его изменения происходит при малых коэффициентах трансформации.

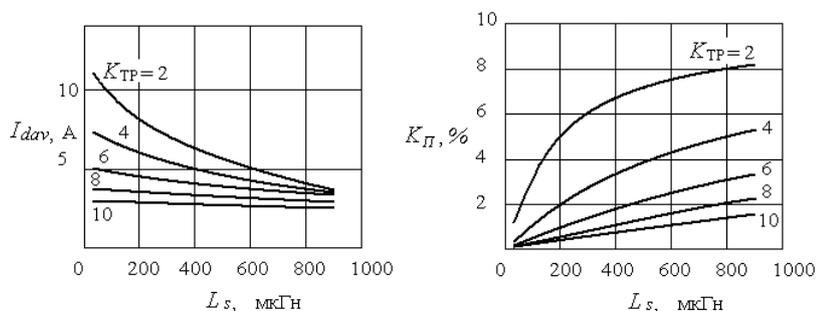


Рис. 3

Коэффициент пульсаций выходного тока преобразователя $K_{П} = (\Delta I_d / I_{dav}) \cdot 100$ также зависит от индуктивности рассеяния в разной степени при различных коэффициентах трансформации. При малых коэффициентах трансформации величина индуктивности рассеяния имеет наибольшее влияние на коэффициент пульсаций.

Коэффициент пульсаций.

Рассмотрим процессы в преобразователе с управляемым инвертором, когда ширина управляющих импульсов T_i системы управления может изменяться от 0 до $T/2$. В этом случае схемы замещения преобразователя имеют такой же вид, как и на рис. 2. Однако при этом этап отдачи энергии дросселем в нагрузку после окончания очередного импульса управления содержит следующие интервалы:

- этап разряда индуктивности рассеяния током первичной обмотки от величины $+I_{L_s}$ до нуля, к индуктивности рассеяния приложено напряжение E ;
- этап нулевого тока индуктивности рассеяния, продолжающийся до начала нового импульса управления T_i ;
- этап перезаряда индуктивности рассеяния током первичной обмотки от нулевого значения в момент начала нового импульса управления до момента достижения значения $-I_{L_s}$, к индуктивности рассеяния приложено напряжение $-E$ в связи с включением противоположной диагонали полумоста инвертора.

Таким образом, в управляемом инверторе интервал этапа накопления энергии T_H в выходном дросселе L_d меньше интервала импульса управления T_i на величину времени перезаряда T_{L_s} индуктивности рассеяния L_s от 0 до I_{L_s} :

$$T_H = T_i - T_{L_s}. \quad (5)$$

Соответственно интервал времени отдачи энергии дросселем L_d в нагрузку определяется таким образом:

$$T_O = T/2 - T_i + T_{L_s}. \quad (6)$$

Следовательно, запишем окончательную систему уравнений как результат перехода от дифференциальных уравнений (3) к уравнениям с приращениями для преобразователя с управляемым инвертором, используя условия (5), (6):

$$\begin{aligned} K_{TP} \left(L_d \frac{\Delta I_d}{T_H} + R_n I_{dav} \right) &= E; \\ L_s \frac{\Delta I_{L_s}}{T_{L_s}} &= E; \\ L_d \frac{\Delta I_d}{T_O} &= R_n I_{dav}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta I_{L_s} = \frac{I_{dav}}{K_{TP}};$$

$$T_H = T_i - T_{L_s};$$

$$T_O = T/2 - T_i + T_{L_s}.$$

Полученная система уравнений (7) позволяет определить замкнутое решение для установившегося процесса в преобразователе с управляемым инвертором с учетом индуктивности рассеяния. В качестве заданных параметров могут служить следующие: E , R_n , T , T_i , K_{TP} , L_s , L_d . Тогда, решая систему уравнений (7), можно определить такие параметры: среднее значение выходного тока I_{dav} , величину пульсации выходного тока ΔI_d , величину тока перезаряда индуктивности ΔI_{L_s} и время ее перезаряда T_{L_s} между нулевым и максимальным значением, временные интервалы установившегося процесса – время накопления T_H и отдачи T_O энергии дросселем L_d .

Воспользовавшись системой уравнений (7), определим зависимости среднего значения выходного тока I_{dav} и коэффициента пульсаций $K_{П}$ выходного тока преобразователя от величины индуктивности рассеяния L_s при различных коэффициентах трансформации K_{TP} силового трансформатора, которые показаны на рис. 4.

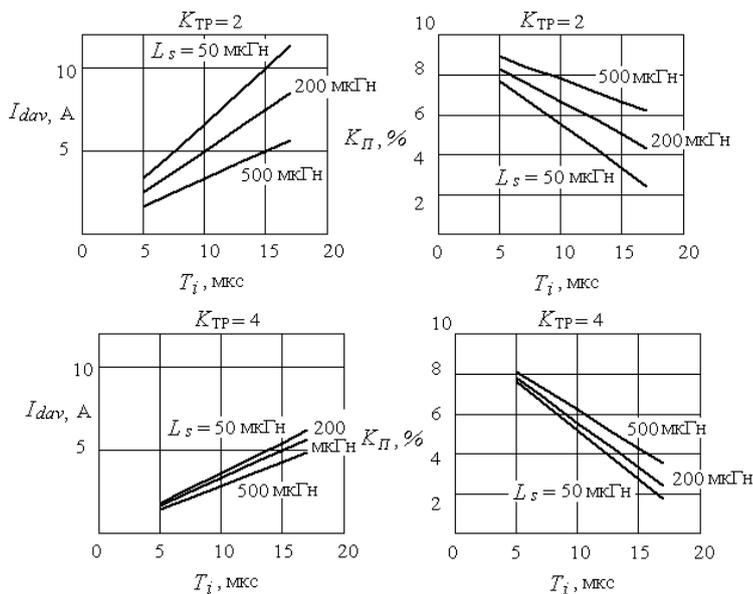


Рис. 4

Анализ этих зависимостей также подтверждает, что увеличение индуктивности рассеяния обмоток трансформатора приводит к уменьшению возможного среднего значения выходного тока преобразователя. Причем, чем выше коэффициент трансформации, тем меньше возможный выходной ток и диапазон его изменения в пределах диапазона регулирования. Для рассматриваемого процесса также характерно уменьшение коэффициента пульсаций выходного тока при максимальных его средних значениях. Кроме того, влияние коэффициента трансформации в анализируемом диапазоне выражено слабо.

Выводы. В результате исследования электромагнитных процессов в прямоходовом двухтактном преобразователе на основе полумостового инвертора разработана его математическая модель.

Анализ процессов с помощью данной модели позволяет получить решение установившегося режима и исследовать свойства преобразователя с учетом неидеальности трансформатора – индуктивности рассеяния обмоток. Показано, что на величину выходного тока и коэффициента его пульсаций в преобразователе одновременное действие оказывают как индуктивность рассеяния, так и коэффициент трансформации силового трансформатора. Достоинством предложенной математической модели является возможность поиска и выбора тех параметров преобразователя, которые обеспечивают требуемые параметры процесса с учетом неидеальности трансформатора. Например, при заданном диапазоне регулирования (длительности управляющих импульсов T_i) и известном значении индуктивности рассеяния предложенная модель позволяет выбрать необходимое значение коэффициента трансформации силового трансформатора для обеспечения требуемого диапазона выходного тока и величины его пульсаций.

1. Гаврилюк О.Я., Несынов В., Комаров Н.С., Руденко Ю.В., Лебедев Б.Б., Подольцев А.Д. Регулятор анодного тока электронно-лучевых пушек с подогреваемым катодом // Современная электрометаллургия. – 2004. – № 3. – С. 25–32.
2. Мартынов В.В., Лебедев Б.Б. Энергия выходной цепи источника ускоряющего напряжения // Техн. электродинамика. – 2013. – № 4. – С. 50–55.
3. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
4. Руденко Ю.В. Анализ процессов в обратноточном преобразователе с учетом неидеальности трансформатора // Пр. Ин-ту электродинамики НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – Вип. 30. – С. 108–116.
5. Хныков А.В. Теория и расчет трансформаторов источников вторичного электропитания. – М.: Солон-пресс, 2004. – 125 с.

УДК 621.314

Ю.В. Руденко, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Вплив неідеальності трансформатора на процеси в прямоходовому двотактному перетворювачі

Запропоновано математичну модель для аналізу процесів в прямоходовому перетворювачі на основі напівмостового інвертора з урахуванням неідеальності трансформатора. Розраховано графічні залежності середнього значення та коефіцієнта пульсацій вихідного струму перетворювача при зміні індуктивності розсіювання та коефіцієнта трансформації силового трансформатора. Бібл. 5, рис. 4.

Ключові слова: прямоходовий двотактний перетворювач, індуктивність розсіювання, високовольтне електро-технологічне обладнання.

Yu.V. Rudenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Transformer faultiness influence on processes at forward push-pull converter

The mathematical model for analysis of processes at forward push-pull converter on basis of half-bridge inverter is proposed taking into account transformer faultiness. Graphic dependences of average value and ripple factor of output converter's current are calculated with change of leakage inductance and turns ratio of power transformer. References 5, figures 4.

Key words: forward push-pull converter, leakage inductance, high voltage electric technology equipment.

Надійшла 25.09.2014

Received 25.09.2014