

УДК 621.314.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ
В ИНВЕРТИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ
С ГРАНИЧНЫМ РЕЖИМОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

Кадацкий А.Ф., Русу А.П., Криль А.С.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
kafedra.eteg-mk@onat.edu.ua*

**ДОСЛІДЖЕННЯ МАКСИМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ НАПРУГ
В ІНВЕРТУВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ
З ГРАНИЧНИМ РЕЖИМОМ ФУНКЦІОНУВАННЯ**

Кадацький А.Ф., Русу О.П., Криль О.С.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
kafedra.eteg-mk@onat.edu.ua*

**THE RESEARCH OF MAXIMUM VOLTAGES IN THE BACK-BOOST
DC-DC CONVERTERS WITH BOUNDARY MODE OPERATION**

Kadatskyu A.F., Rusu A.P., Kril A.S.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
kafedra.eteg-mk@onat.edu.ua*

Аннотация. Получены расчетные соотношения для определения влияния коэффициента трансформации дросселя на максимальные напряжения на силовых коммутирующих элементах импульсных преобразователей постоянного напряжения инвертирующего типа с граничным режимом функционирования. Проведено исследование влияния автотрансформаторного включения дросселя на величину максимальных значений напряжений на ключах накопления и возврата в силовой части импульсных инвертирующих преобразователей. Показано, что путем выбора коэффициента трансформации дросселя можно перераспределить величину максимальных значений напряжения на силовых коммутирующих элементах и тем самым увеличить коэффициент полезного действия преобразователя за счет уменьшения величины динамических потерь при преобразовании в граничном режиме. Выявлены особенности влияния соотношения напряжения на входе и выходе преобразователя на величину оптимального значения коэффициента трансформации дросселя.

Ключевые слова: импульсный преобразователь напряжения, граничный режим функционирования, инвертирующий тип, коэффициент трансформации дросселя, параметры электрических процессов.

Анотація. Отримано розрахункові співвідношення для визначення впливу коефіцієнта трансформації дроселя на максимальні напруги на силових комутувальних елементах імпульсних перетворювачів постійної напруги інвертувального типу із граничним режимом функціонування. Проведено дослідження впливу автотрансформаторного включення дроселя на величину максимальних значень напруг на ключах накопичення та повернення у силовій частині імпульсних інвертувальних перетворювачів. Показано, що шляхом вибору коефіцієнта трансформації дроселя можна перерозподілити величину максимальних значень напруги на силових комутувальних елементах і тим самим збільшити коефіцієнт корисної дії перетворювача за рахунок зменшення величини динамічних втрат при перетворенні в граничному режимі. Виявлено особливості впливу співвідношення напруги на вході і виході перетворювача на величину оптимального значення коефіцієнта трансформації дроселя.

Ключові слова: імпульсний перетворювач напруги, граничний режим функціонування, інвертувальний тип, коефіцієнт трансформації дроселя, параметри електричних процесів.

Abstract. In the article the formulas for calculation maximum voltage of the power switches of the inverting back-boost DC-DC converters with boundary mode operation were obtained. Based on these formulas, the researches maximum voltage of the power switches from turns ratio of the power inductor were made. It is shown that by choosing the turn ratio of the power inductor it is possible to redistribute the maximum voltage values on the power switching elements and thereby increase the efficiency of the converter due to the decrease in the value of dynamic losses during conversion in the boundary mode. The features of the influence of the ratio of the converter input and output voltages on the value of the optimum power inductor turn ratio are revealed.

Key words: Switching DC-DC converter, the boundary mode operation, inverting back-boost converter, inductor turns ratio, parameters of electrical processes.

Стабільність і якість телекомунікаційних послуг неразривно пов'язані з характеристиками імпульсних преобразователів постійного напруги (ППН), являються основою більшості вузлів, пристроїв і систем електроживлення сучасного обладнання. Сучасні операційні усилителі, аналогово-цифрові і цифро-аналогові преобразователі, активно використовуються в телекомунікаційному обладнанні, часто вимагають для своєї роботи двохполярного напруги, в той час як основним джерелом живлення для даних пристроїв є однополярний джерело напруги 24 В, 48 В або 60 В. Тому для формування живлячого напруги недостатньої полярності в даних пристроях широко використовуються ППН інвертуючого типу.

Оскільки маса і габарити ППН в багатьох випадках визначають відповідні параметри кінцевого пристрою, то підвищення питомої потужності ППН до сих пор є одним з основних напрямків мініатюризації радіотехнічного і телекомунікаційного обладнання. Аналіз сучасних робіт в цій області показує, що необхідний об'єм магнітопровода дроселя, на який припадає значительна частка маси і об'єму ППН, мінімальний при роботі в граничному режимі. Крім цього, використання автотрансформаторного включення дроселя дозволяє підвищити КПД ППН за рахунок оптимізації електричних процесів в його силовій частині, в тому числі і за рахунок перерозподілу максимальних значень напруги силових комутуючих елементів, які мають суттєвий вплив на величини динамічних втрат при перетворенні і установочної потужності ППН.

На сьогоднішній день швидкий пошук оптимального варіанта побудови силових частин неможливо без використання сучасних засобів автоматизованого проектування (САПР), які зменшують витрати часу і коштів, необхідних для фізичного моделювання. Однак відомі математичні моделі [2 – 5], які складають основу САПР, мають ряд обмежень, які не дозволяють проводити повний комплекс досліджень, необхідних для якісного проектування ППН інвертуючого типу з граничним режимом функціонування, а відомі дослідження впливу коефіцієнта трансформації дроселя [5 – 6] на величини максимальних значень напруги в силовій частині вказаних ППН відсутні.

Це і визначило **цель данної статті**, яка полягає в систематизації розрахункових співвідношень для визначення максимальних значень силових комутуючих елементів ППН інвертуючого типу з граничним режимом функціонування і дослідження впливу коефіцієнта трансформації дроселя на їх величину.

Розглядаються схеми інвертуючих імпульсних преобразователів, показані на рис. 1. Найпростішим варіантом цієї схеми є схема з однообмоточним дроселем (рис. 1,а), яка зазвичай використовується в пристроях, які не потребують гальванічної розв'язки, при відносній напрузі живлення $\bar{U}_n = U_n / U_n$ (де U_n , U_n – напруги

питания и нагрузки соответственно), находящемся в диапазоне $0,1 < \bar{U}_n < 10$ [1]. В ППН с иным значением \bar{U}_n могут использоваться схемы с автотрансформаторным (рис. 1,а,з), а в приложениях, требующих гальванической развязки – с трансформаторным (рис. 1,б) включением дросселя.

При работе в граничном режиме, который на практике обычно реализуется с помощью схем управления (СУ), использующих метод управления по току (Current Mode), каждый цикл преобразования состоит из двух интервалов. На первом интервале, называемом интервалом накопления, ключ $S1$ находится в проводящем, а ключ $S2$ – в непроводящем состоянии. На втором интервале, называемом интервалом возврата, состояния ключей $S1$ и $S2$ меняются на противоположные: $S1$ устанавливается в непроводящее, а ключ $S2$ – в проводящее состояние. Временные диаграммы токов и напряжений в элементах силовой части, являющиеся основой для определения максимальных значений напряжений в элементах силовой части приведены в табл. 1. При получении данных соотношений был использован известный метод анализа, заключающийся в использовании в качестве базовых параметров – параметров тока дросселя [7].

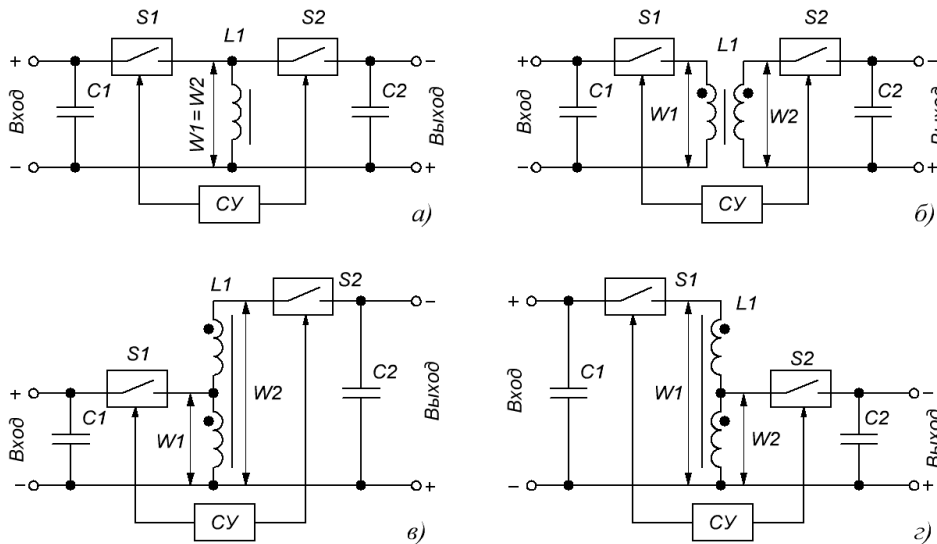


Рисунок 1 – Импульсные преобразователи инвертирующего типа

Таблица 1 – Уравнения токов в элементах силовой части инвертирующего ППН

Обозначение	Интервал	
	Накопления, $0 < t \leq t_H$	Возврата, $t_H < t \leq T$
Ток обмотки накопления $W1, i_{W1}(t)$	$I_{m1} \frac{t}{t_H}$	0
Ток ключа $S1, i_{S1}(t)$		
Ток, потребляемый от источника питания, $i_n(t)$		
Ток обмотки возврата $W2, i_{W2}(t)$	0	$I_{m2} \frac{1+(t_H-t)}{t_B}$
Ток ключа $S2, i_{S2}(t)$		
Ток, отдаваемый в нагрузку, $i_H(t)$		
Напряжение на обмотке накопления $W1, u_{W1}(t)$	U_n	$-U_H/n_{21}$
Напряжение на обмотке возврата $W2, u_{W2}(t)$	$U_n n_{21}$	$-U_H$

В табл. 1 приняты следующие обозначения: t – текущее значение времени; t_H, t_B, T – длительность интервала накопления, возврата и периода преобразования соответственно; I_{m1}, I_{m2} – размах пульсации тока в обмотках накопления и возврата соответственно; $n_{21} = W_2/W_1$ –

коэффициент трансформации дросселя (где W_1, W_2 – количество витков обмоток $W1$ и $W2$ соответственно).

Особенностью граничного режима функционирования силовой части ППН, который был учтен при получении соотношений (табл. 1) из обобщенных уравнений, токов в силовой части ППН [7] является равенство нулю токов обмоток $W1$ и $W2$ в начале интервала накопления и в конце интервала возврата (рис. 2) соответственно, которое поддерживается схемой управления.

Анализируя соотношения (табл. 1) и временные диаграммы (рис. 2), можно определить, что максимальные значения напряжений на силовых коммутирующих элементах $S1$ ($U_{S1 \max}$) и $S2$ ($U_{S2 \max}$) определяются текущими значениями напряжений на входе U_{Π} и выходе U_H преобразователя, а также коэффициентом трансформации дросселя n_{21} .

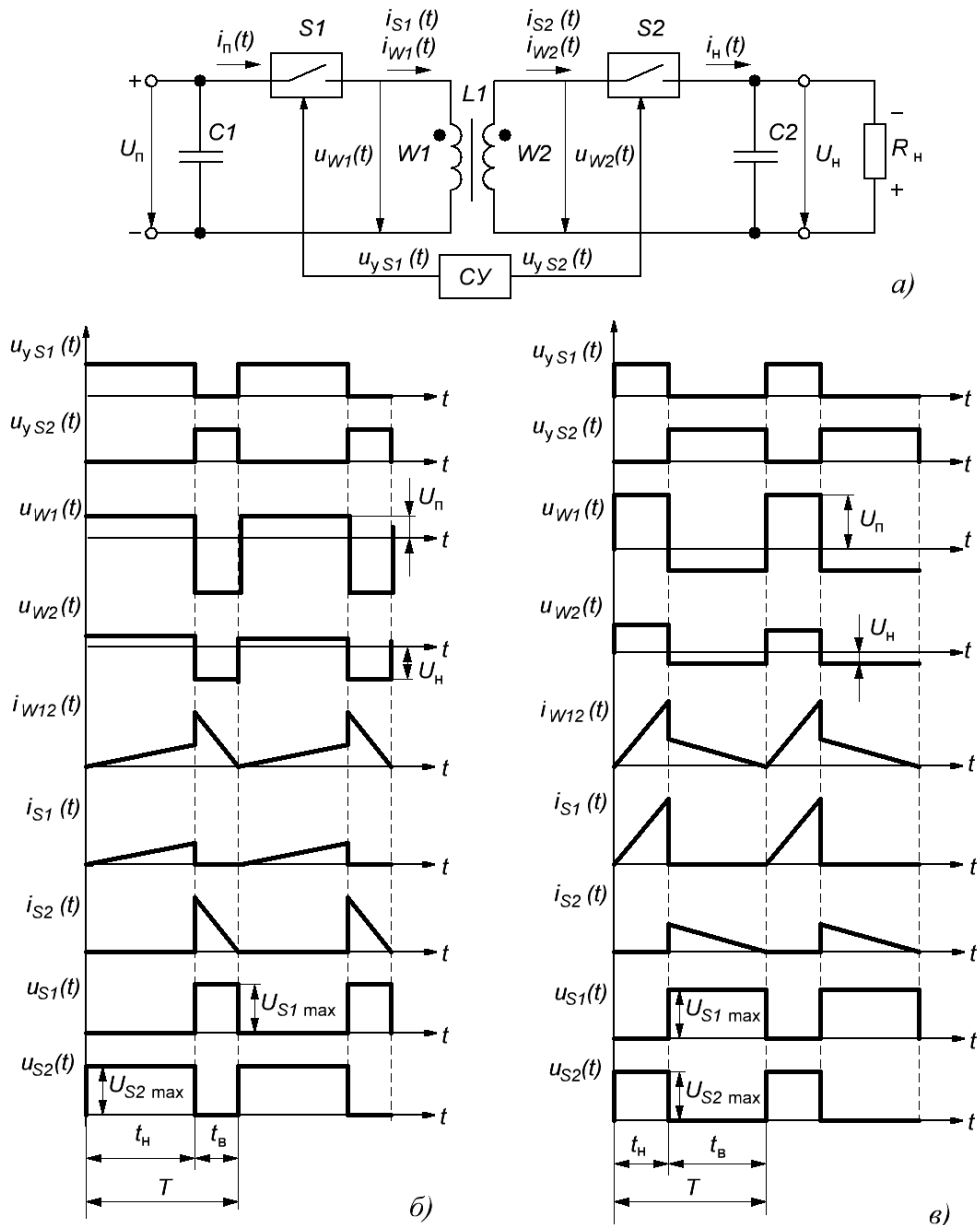


Рисунок 2 – Электрические процессы в силовой части ППН (а) при коэффициенте трансформации дросселя $n_{21} < 1$ (б) и $n_{21} > 1$ (в)

Поскольку сопротивление ключа в проводящем состоянии стремится к нулю, то максимальное значение напряжения на силовых коммутирующих элементах присутствует только на интервалах их непроводящего состояния: для ключа $S1$ на интервале возврата t_b , а для ключа $S2$ – на интервале накопления t_n (рис. 2):

$$U_{S1max} = U_n + \frac{U_H}{n_{21}} = U_H \frac{\bar{U}_n n_{21} + 1}{n_{21}}; \quad (1)$$

$$U_{S2max} = U_H + U_n n_{21} = U_H (1 + \bar{U}_n n_{21}).$$

При этом в общем случае максимальное напряжение ключей $S1$ и $S2$ отличается на величину коэффициента трансформации:

$$U_{S2max} = n_{21} U_{S1max}. \quad (2)$$

Поскольку на практике удобно использовать относительные значения (приведенные к какому-либо параметру), то выражения (1) представим в относительном виде. При использовании в качестве нормирующего параметра напряжения нагрузки U_H :

$$\bar{U}_{S1max/U_H} = \frac{U_{S1max}}{U_H} = \bar{U}_n + \frac{1}{n_{21}}; \quad (3)$$

$$\bar{U}_{S2max/U_H} = \frac{U_{S2max}}{U_H} = 1 + \frac{\bar{U}_n}{n_{21}}.$$

При использовании в качестве нормирующего параметра напряжения питания U_n :

$$\bar{U}_{S1max/U_n} = \frac{U_{S1max}}{U_n} = 1 + \frac{1}{n_{21} \bar{U}_n}; \quad (4)$$

$$\bar{U}_{S2max/U_n} = \frac{U_{S2max}}{U_n} = \frac{1}{\bar{U}_n} + n_{21}.$$

Анализируя выражения (3) и (4) видим, что при $n_{21} = 1$ максимальные напряжения на ключах $S1$ и $S2$ равны:

$$U_{S1max}(n_{21}=1) = U_{S2max}(n_{21}=1) = U_n + U_H;$$

$$\bar{U}_{S1max/U_H}(n_{21}=1) = \bar{U}_{S2max/U_H}(n_{21}=1) = \bar{U}_n + 1; \quad (5)$$

$$\bar{U}_{S1max/U_n}(n_{21}=1) = \bar{U}_{S2max/U_n}(n_{21}=1) = \frac{1}{\bar{U}_n} + 1.$$

Следовательно, для исследования влияния коэффициента трансформации дросселя на максимальные значения напряжений ключей $S1$ и $S2$ удобно использовать в качестве опорной точки (нормирующего значения) преобразователь, работающий при том же соотношении \bar{U}_n с дросселем, имеющим коэффициент трансформации $n_{21} = 1$.

В этом случае расчетные соотношения для проведения исследований примут вид:

$$\bar{U}_{S1max/(n_{21}=1)} = \frac{U_{S1max}}{U_{S1max}(n_{21}=1)} = \frac{\bar{U}_n n_{21} + 1}{n_{21}(\bar{U}_n + 1)}; \quad (6)$$

$$\bar{U}_{S2max/(n_{21}=1)} = \frac{U_{S2max}}{U_{S2max}(n_{21}=1)} = \frac{\bar{U}_n n_{21} + 1}{\bar{U}_n + 1}.$$

Из анализа (3) следует, что при фиксированном коэффициенте трансформации дросселя нормированное напряжение на ключе $S1$ линейно зависит от \bar{U}_n . При этом, при

уменьшении коэффициента трансформации, зависимости \bar{U}_{S1max/U_n} смещаются вверх на величину $1/n_{21}$ (рис. 3,а).

При постоянном соотношении \bar{U}_n зависимости \bar{U}_{S1max/U_n} имеют большую скорость изменения в диапазоне $0 < n_{21} \leq 1$ (рис. 3,б) по сравнению с диапазоном, начинающимся $n_{21} = 1$ ($n_{21} = 1, 2, 3, \dots$) из-за наличия слагаемого в соотношении (3), равного $1/n_{21}$.

Анализ (6) показывает, что при $n_{21} < 1$ $\bar{U}_{S1max/(n_{21}=1)}$ становится больше, а при $n_{21} > 1$ меньше единицы (рис. 3,в,г). Из этого следует, что при выборе коэффициента трансформации дросселя $n_{21} > 1$ можно уменьшить напряжение на ключе $S1$ по сравнению с преобразователем, использующим бестрансформаторное включение дросселя.

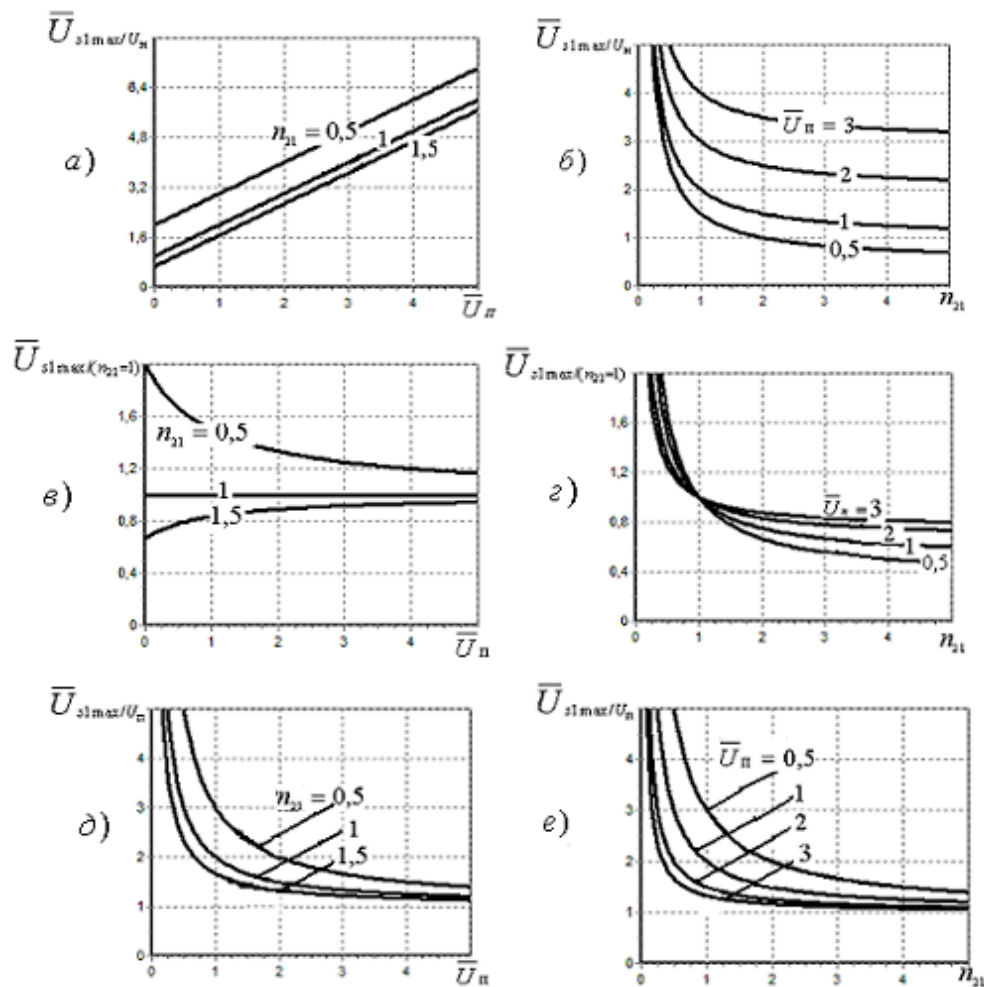


Рисунок 3 – Зависимости максимальных значений напряжений \bar{U}_{S1max/U_n} , $\bar{U}_{S1max/(n_{21}=1)}$ и \bar{U}_{S1max/U_n} от относительного напряжения \bar{U}_n (а, в, д) и коэффициента трансформации дросселя n_{21} (б, г, е)

При оценке зависимостей напряжений U_{S1max} , нормированных на напряжение питания, следует отметить, что при увеличении \bar{U}_n значения \bar{U}_{S1max/U_n} уменьшаются с переменной крутизной (рис. 3,д), зависящей от n_{21} : при $n_{21} < 1$ она больше, чем при $n_{21} > 1$. При этом абсолютные значения U_{S1max} , определяемые (1), также не постоянны и увеличиваются при увеличении \bar{U}_n (рис. 3,а). Поэтому при проведении исследований более предпочтительным является использование в качестве нормирующего параметра напряжения нагрузки ($U_n = const$).

Проведя аналогічні дослідження максимального напруги ключа $S2$ можна відзначити, що, згідно (3), при різних фіксованих значеннях n_{21} при $\bar{U}_n \rightarrow 0$ значення $\bar{U}_{S2\max/U_n}$ наближаються до значення, рівного одиниці (рис. 4,а), що відповідає прагненню абсолютного значення напруги на ключі $S2$ до величини вихідного напруги $U_{S2\max} \rightarrow U_n$.

Вплив коефіцієнта трансформації дроселя враховується другим слагаемом співвідношення (3), наявність якого призводить до того, що збільшення коефіцієнта трансформації дроселя призводить до збільшення напруги $\bar{U}_{S2\max/U_n}$ (рис. 4,а), в той час як максимальне напруги $\bar{U}_{S1\max/U_n}$ ключа $S1$ при цьому зменшується (рис. 3, а).

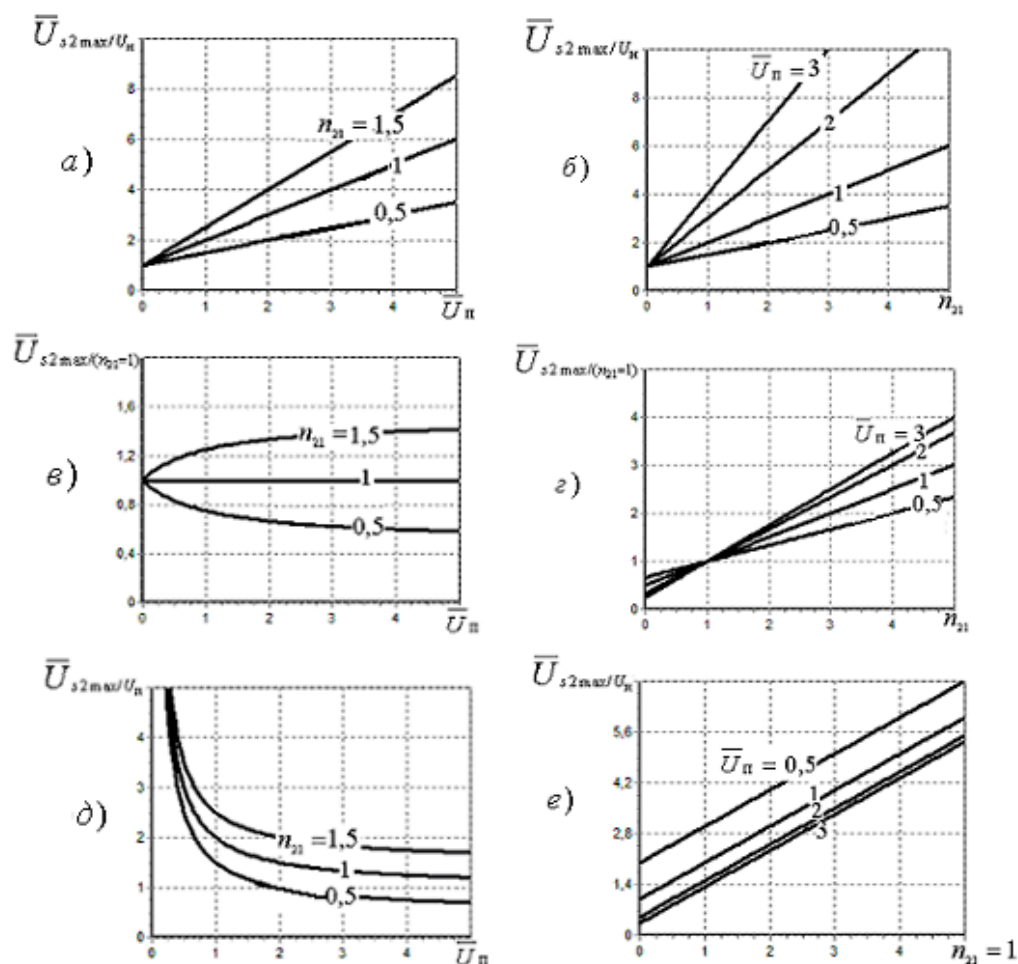


Рисунок 4 – Зависимости максимальных значений напряжений $\bar{U}_{S2\max/U_n}$, $\bar{U}_{S2\max/(n_{21}=1)}$ и $\bar{U}_{S2\max/U_n}$ от относительного напряжения \bar{U}_n (а, в, д) и коэффициента трансформации дроселя n_{21} (б, з, е)

По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Выбором коэффициента трансформации дроселя можно перераспределять максимальные напряжения на силовых коммутирующих элементах $S1$ и $S2$ на этапе проектирования импульсных преобразователей.

2. Использование автотрансформаторного включения дроселя ($n_{21} \neq 1$) позволяет при увеличении (уменьшении) n_{21} увеличить (уменьшить) $U_{S2\max}$ (рис. 4,в,з) и уменьшить (увеличить) $U_{S1\max}$ (рис. 3,в,з) по сравнению с бестрансформаторным вариантом

преобразователя, а соотношения (6) позволяют выполнить количественную оценку влияния коэффициента трансформации дросселя на величину максимальных значений напряжений ключей $S1$ и $S2$.

3. Анализ максимальных значений, приведенных к напряжению U_n , напряжений $\bar{U}_{S1\max/U_n}$, $\bar{U}_{S2\max/U_n}$ (соотношения (5) и рис. 3,д,е и рис. 4,д,е) показывает:

– максимальное напряжение $\bar{U}_{S2\max/U_n}$ ключа $S2$ линейно зависит от коэффициента трансформации дросселя при фиксированных значениях \bar{U}_n , (рис. 4,е), влияние которого учтено в виде слагаемого $1/\bar{U}_n$, смещающего линейную зависимость $\bar{U}_{S2\max/U_n}$ по оси ординат на соответствующую величину;

– характер влияния относительного напряжения питания \bar{U}_n и коэффициента трансформации дросселя n_{21} на зависимости $\bar{U}_{S1\max/U_n}$, (рис. 3,д,е) аналогичен и определяется вторым слагаемым соотношения (5), равным $1/(n_{21}\bar{U}_n)$;

– характер зависимостей $\bar{U}_{S2\max/U_n}$ (рис. 4,д) от \bar{U}_n при $\bar{U}_n > 1$ мало зависит от \bar{U}_n , а при $\bar{U}_n \rightarrow 0$ максимальные напряжения $\bar{U}_{S2\max/U_n} \rightarrow \infty$ из-за наличия первого слагаемого соотношения (5), равного $1/\bar{U}_n$.

Таким образом, с помощью полученной математической модели стало возможно оценить влияние коэффициента трансформации на величины максимальных значений напряжений силовых коммутирующих элементов ППН инвертирующего типа, работающих в граничном режиме, что является еще одним шагом на пути к совершенствованию ППН, а, следовательно, и существующей телекоммуникационной аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кадацкий А.Ф. Анализ электрических и магнитных процессов в дросселях импульсных преобразователей электрической энергии / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). – 2016. – № 6. – С.17 – 29.
2. Seddik Bacha Power electronic converters modeling and control / Seddik Bacha, Iulian Munteanu, Antoneta Iuliana Bratcu. London: Springer-Verlag. – 2014. – 454 p. ISSN 1439-2232, ISBN 978-1-4471-5477-8, ISBN 978-1-4471-5478-5 (eBook), DOI 10.1007/978-1-4471-5478-5.
3. Angel V. Peterchev. Digital Pulse-Width Modulation Control in Power Electronic Circuits: Theory and Applications / Angel V. Peterchev // A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Graduate division of the university of California, Berkeley. – 2005. – 159 с.
4. Switch-mode power supply reference manual – SMPSRM // On Semiconductor. – 2014. – 71 p.
5. Кадацкий А.Ф. Математические модели параметров электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения инвертирующего типа с граничным режимом функционирования / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу, Т.Н. Ерыкалина, А.С. Криль // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2016. – № 1. – С. 55 – 72.
6. Кадацкий А.Ф. Параметры токов в стабилизированных импульсных преобразователях постоянного напряжения инвертирующего типа с граничным режимом функционирования / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу, О.В., Т.Н. Ерыкалина, А.С. Криль // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2017. – № 1.
7. Кадацкий А.Ф. Анализ электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения с широтно-импульсным методом регулирования / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу // Электричество. – 2005. – № 3. – С. 43–54.

REFERENCES:

1. Kadatskyy A. F., Rusu A. P. (2016). Analiz ehlektricheskikh i magnitnyh processov v drosselyah impul'snyh preobrazovatelej ehlektricheskoy ehnergii. Tekhnologiya i konstruirovaniye v ehlektronnoy apparature (TKEA) (6), 17 – 29.

2. Seddik Bacha Power electronic converters modeling and control / Seddik Bacha, Iulian Munteanu, Antoneta Iuliana Bratcu. – London: Springer-Verlag. – 2014. – 454 p. ISSN 1439-2232, ISBN 978-1-4471-5477-8, ISBN 978-1-4471-5478-5 (eBook), DOI 10.1007/978-1-4471-5478-5.
3. Angel V. Peterchev. Digital Pulse-Width Modulation Control in Power Electronic Circuits: Theory and Applications / Angel V. Peterchev // A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Graduate division of the university of California, Berkeley, 2005. – 159 p.
4. Switch-mode power supply reference manual – SMPSRM // On Semiconductor. – 2014. – 71 p.
5. Kadatskyy A.F., Rusu A.P., Erykalina T.N., Kril A.S. (2016). Matematicheskie modeli parametrov elektricheskikh processov v impul'snykh preobrazovatel'nykh postojnogo napryazhenij invertiruyushchego tipa s granichnym rezhimom funkcionirovaniya. Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova, (1), 55 – 72.
6. Kadatskyy A. F., Rusu A. P., Erykalina T. N., Kril' A.S. (2017) Parametry tokov v stabilizirovannykh impul'snykh preobrazovatel'nykh postojnogo napryazheniya invertiruyushchego tipa s granichnym rezhimom funkcionirovaniya. Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova, (1).
7. Kadatskyy A. F. and Rusu A. P. (2005). Analiz elektricheskikh processov v impul'snykh preobrazovatel'nykh postojnogo napryazheniya s shirotno-impul'snym metodom regulirovaniya [Analysis of the Electrical Processes in the Pulsed DC Converter with PWM Control Method]. Elektrichestvo, (3). 43-54.