

КПД ДВУХПУЛЬСНОГО МОСТОВОГО НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ЕМКОСТНЫМ ФИЛЬТРОМ

У статті отримана залежність коефіцієнта корисної дії однофазного мостового некерваного випрямляча з ємнісним фільтром від відношення еквівалентного опору та опору навантаження.

В статтє получена зависимость коэффициента полезного действия однофазного мостового неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром от отношения эквивалентного сопротивления и сопротивления нагрузки.

ВВЕДЕНИЕ

Двухпульсные мостовые неуправляемые выпрямители (НВ) малой мощности с емкостным фильтром в виде конденсатора, включенного параллельно нагрузке, продолжают широко применяться в устройствах питания бытовой и промышленной электроники, несмотря на их существенный недостаток – большой уровень кратных трех гармоник в сетевом токе.

Электромагнитные процессы в таких выпрямителях и методика расчета их параметров при допущении бесконечно большой емкости конденсатора достаточно подробно рассмотрены в [1]. Однако вне области внимания авторов [1] остался расчет КПД выпрямителя и его зависимость от таких параметров преобразователя как индуктивность цепи заряда конденсатора, параметры диодов и параллельного конденсатора, искажение питающего напряжения.

Цель статьи – получение аналитического соотношения для КПД выпрямителя, а также исследование влияния на величину КПД параметров выпрямителя и питающей сети, проверка полученных соотношений на MATLAB-модели.

СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ПРИ $L_S=0, C \rightarrow \infty$

Рассмотрим режим работы двухпульсного мостового неуправляемого выпрямителя при допущении, что величина индуктивности в цепи заряда конденсатора выходного фильтра L_S равна нулю и емкость конденсатора C стремится к бесконечности. В этом случае эквивалентная схема замещения может быть представлена как показано на рис. 1.

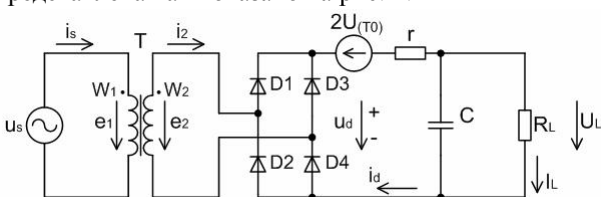


Рис. 1. Эквивалентная схема НВ

Эквивалентное сопротивление r учитывает сопротивления обмоток трансформатора, проводников и диодов. Источник $2U_{(T0)}$ учитывает пороговое напряжение диодов. Цифра 2 характеризует, что в любой момент времени ток замыкается через два диода.

Режим работы схемы и величина напряжения на нагрузке U_L зависят от отношения сопротивлений r/R_L . Если $r/R_L \rightarrow 0$, то напряжение на нагрузке стремится к амплитуде напряжения вентильной обмотки, $U_L \rightarrow E_{2max}$; если $r/R_L \rightarrow \infty$, то $U_L \rightarrow 0$; если $0 < r/R_L < \infty$, то $E_{2max} > U_L > 0$.

В интервалах времени, когда напряжение вентильной обмотки трансформатора больше напряжения на нагрузке, ток потребляется из сети. Для этих интервалов величина тока может быть определена, как:

$$i_2 = i_d = \frac{(E_{2max} - 2 \cdot U_{(T0)}) \cdot \cos \vartheta - U_L}{r}, \quad (1)$$

где $\vartheta = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t$; f_s – частота напряжения сети.

Обозначим половину интервала протекания проводимости диодов через угол θ . Величина напряжения на нагрузке может быть определена, как:

$$U_L = (E_{2max} - 2 \cdot U_{(T0)}) \cdot \cos \theta. \quad (2)$$

Тогда из (1), перенеся начало координат на угол $\pi/2$ в сторону отставания, с учетом (2) получим:

$$i_2 = i_d = \frac{(E_{2max} - 2 \cdot U_{(T0)}) \cdot \cos \vartheta - (E_{2max} - 2 \cdot U_{(T0)}) \cdot \cos \theta}{r}. \quad (3)$$

Среднее в интервале повторяемости значение тока на выходе диодного моста:

$$\begin{aligned} I_{dAV} &= \frac{1}{\pi} \int_{-\theta}^{+\theta} \frac{(E_{2max} - 2U_{(T0)})}{r} \cdot (\cos \vartheta - \cos \theta) d\vartheta = \\ &= \frac{2 \cdot (E_{2max} - 2U_{(T0)})}{\pi \cdot r} \cdot (\sin \theta - \theta \cdot \cos \theta) = \\ &= \frac{2 \cdot (E_{2max} - 2U_{(T0)}) \cdot \cos \theta}{\pi \cdot r} \cdot (tg \theta - \theta) = \frac{2 \cdot U_L}{\pi \cdot r} \cdot A(\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

где $A(\theta) = tg \theta - \theta. \quad (5)$

Так как среднее значение напряжения на нагрузке остается неизменным, средний ток I_{dAV} должен быть равен среднему току нагрузки:

$$I_{LAV} = \frac{U_L}{R_L} = \frac{(E_{2max} - 2 \cdot U_{(T0)}) \cdot \cos \theta}{R_L}. \quad (6)$$

Из (4) и (6):

$$A(\theta) = \frac{\pi \cdot r}{2 \cdot R_L}. \quad (7)$$

Таким образом, величины всех токов и напряжений в схеме НВ с C-фильтром однозначно зависят от отношения r/R_L и, следовательно, от угла θ .

Кoeffициент полезного действия НВ с C фильтром определяется по соотношению:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{U_L^2 / R_L}{U_L^2 / R_L + r \cdot I_{dRMS}^2 + 2 \cdot U_{(T0)} \cdot I_{dAV}} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{R_L \cdot r \cdot I_{dRMS}^2}{U_L^2} + \frac{2 \cdot U_{(T0)} \cdot I_{dAV} \cdot R_L}{U_L^2}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где I_{dRMS}^2 – квадрат действующего значения тока в звене постоянного тока.

С учетом (3) из (8) получаем:

$$I_{dRMS}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\theta}^{+\theta} \left(\frac{(E_{2max} - 2 \cdot U_{(T0)}) \cdot \cos \vartheta - (E_{2max} - 2 \cdot U_{(T0)}) \cdot \cos \theta}{r} \right)^2 d\vartheta, \quad (9)$$

В результате интегрирования (9) получим:

$$I_{dRMS}^2 = \frac{(E_{2max} - 2 \cdot U_{(T0)})^2}{\pi \cdot r^2} \cdot \left(\theta - \frac{3}{2} \cdot \sin 2\theta + 2\theta \cdot \cos^2 \theta \right). \quad (10)$$

Из соотношения (8) с учетом (10), (7), (5), (2) определяем КПД двухпульсного мостового неуправляемого выпрямителя:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{2 \cdot (\operatorname{tg} \theta - \theta) \cdot \cos^2 \theta} \cdot \left(\theta - \frac{3}{2} \cdot \sin 2\theta + 2\theta \cdot \cos^2 \theta \right) + \frac{1}{2 \cdot U(r_0)}} + \frac{1}{(E_{2\max} - 2 \cdot U(r_0)) \cdot \cos \theta} \quad (11)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по (11) и (7) значения угла θ и КПД в функции отношения r/R_L (значение порогового напряжения диодов $U(r_0)$ принято равным 1 В).

Из табл. 1 видно, что при уменьшении отношения r/R_L коэффициент полезного действия стремится к единице. Однако при этом сетевой ток превращается в узкий импульс длительностью 10...20 эл.град., в котором содержатся нечетные гармоники, значительно превосходящие по величине основную гармонику сетевого тока.

Таблица 1

Результаты расчета КПД НВ в функции отношения r/R_L и значения угла θ

r/R_L	θ , эл. град.	θ , рад.	$A(\theta)$	η
0.0001	5	0.0873	0.0020	0.9837
0.0011	10	0.1745	0.0018	0.9746
0.0039	15	0.2618	0.0061	0.9595
0.0095	20	0.3491	0.0149	0.9384
0.0191	25	0.4363	0.0300	0.9112
0.0342	30	0.5236	0.0538	0.8779
0.0569	35	0.6109	0.0894	0.8385
0.0897	40	0.6981	0.1409	0.7930
0.1366	45	0.7854	0.2146	0.7413
0.2032	50	0.8727	0.3191	0.6835
0.2980	55	0.9599	0.4682	0.6184
0.4360	60	1.0472	0.6849	0.5493

ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КПД

Проверим полученное выражение (11) для расчета КПД однофазного двухпульсного мостового НВ на MATLAB-модели, представленной на рис. 2.

При моделировании задавались следующими параметрами: $R_L=100 \Omega$, $U_{S1m}=150 \text{ V}$, $C_d=0.1 \text{ F}$.

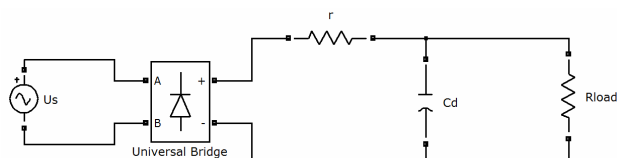


Рис. 2. MATLAB-модель НВ

Результаты проведенного эксперимента занесены в табл. 2.

Таблица 2

Значения КПД НВ в функции отношения r/R_L и значения угла θ , полученные на MATLAB-модели

r/R_L	θ , эл. град.	η
0.0001	5	0.9825
0.0011	10	0.9732
0.0039	15	0.9581
0.0095	20	0.9385
0.0191	25	0.9094
0.0342	30	0.8759
0.0569	35	0.8365
0.0897	40	0.7903
0.1366	45	0.7376
0.2032	50	0.6797
0.2980	55	0.6143
0.4360	60	0.5428

Сравнив данные табл. 1 и 2, можно сделать вывод, что результаты вычислений по выражению (11) достаточно точно совпадают со значениями, полученными в результате моделирования. Это дает возможность утверждать, что значение КПД НВ с описанными выше допущениями можно рассчитать, зная только значения порогового напряжения диодов, амплитуды питающего напряжения, сопротивления нагрузки и эквивалентного сопротивления, учитывающего сопротивление обмоток трансформатора, проводников и динамическое сопротивление диодов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА MATLAB-МОДЕЛИ

Наиболее часто встречающееся искажение напряжения сети – наличие в нем третьей гармоники. Вполне очевидно, что наличие третьей гармоники в питающем напряжении также негативно влияет и на форму потребляемого из сети тока. При увеличении содержания третьей гармоники в сетевом напряжении КПД выпрямителя уменьшается до определенного граничного значения, после которого КПД начинает увеличиваться. Это граничное значение содержания третьей гармоники в сетевом напряжении зависит от отношения r/R_L . Например, для $r/R_L=0.0342$ это граничное значение примерно равно 0.24.

Таким образом, при питании от одной сети большого количества НВ возможно увеличение КПД каждого из этих устройств за счет внесения искажений от каждого из НВ в сеть.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАЛЬНОЙ ВАХ ДИОДОВ

Характеристики реальных диодов также оказывают влияние на параметры НВ. В ходе моделирования было исследовано влияние порогового напряжения диодов на КПД преобразователя. Результаты моделирования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения КПД НВ при различных значениях порогового напряжения диодов, полученные в результате моделирования

r/R_L	η ($U_{VD(r_0)}=0 \text{ V}$)	η ($U_{VD(r_0)}=0.8 \text{ V}$)	η ($U_{VD(r_0)}=1 \text{ V}$)
0.0001	0.9962	0.9854	0.9825
0.0011	0.9865	0.9751	0.9732
0.0039	0.9710	0.9604	0.9581
0.0095	0.9496	0.9392	0.9385
0.0191	0.9226	0.9118	0.9094
0.0342	0.8885	0.8784	0.8759
0.0569	0.8486	0.8387	0.8365
0.0897	0.7985	0.7928	0.7903
0.1366	0.7476	0.7402	0.7376
0.2032	0.6924	0.6829	0.6797
0.2980	0.6279	0.6189	0.6143
0.4360	0.5564	0.5484	0.5428

Пороговое напряжение диодов приводит к уменьшению коэффициента полезного действия, что объясняется уменьшением напряжения на нагрузке. График зависимости КПД НВ от действующего значения напряжения источника питания при нескольких значениях отношения r/R_L приведен на рис. 3. Как видно, уменьшение КПД из-за порогового напряжения диодов тем меньше, чем больше напряжение источника питания.

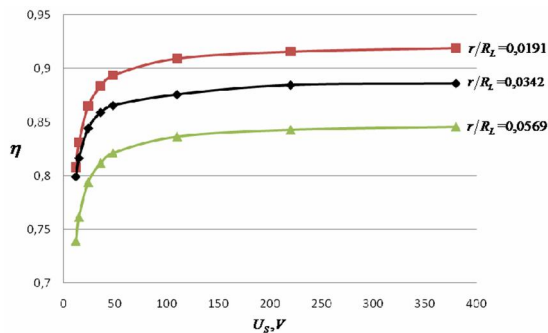


Рис. 3. График зависимости КПД НВ от действующего значения напряжения источника питания при $U_{VD(T0)}=1 V$

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ СЕТИ

На режим работы НВ оказывают влияние индуктивности питающей сети, диодов, кабелей. Поэтому при проектировании важно знать, как будет изменяться КПД устройства в зависимости от значения индуктивностей – эквивалентной индуктивности цепи заряда конденсатора.

Полученную в результате моделирования зависимость КПД от эквивалентной индуктивности свели в табл. 4 (при значении отношения $r/R_L=0.0342$). На рис. 4 приведена осциллограмма тока, потребляемого из питающей сети, при относительном значении эквивалентной индуктивности $\omega L_S/R_L=10^{-3}$.

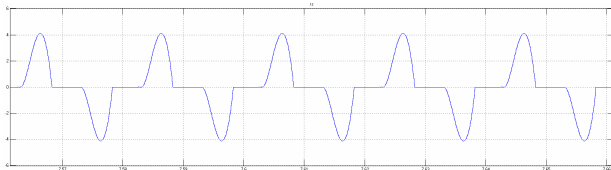


Рис. 4. Осциллограмма сетевого тока при относительном значении индуктивности $\omega L_S/R_L=10^{-3}$

Таблица 4
Зависимость КПД НВ от эквивалентной индуктивности

$\omega L_S/R_L$	η
10^{-6}	0.8824
10^{-5}	0.8819
10^{-4}	0.8828
10^{-3}	0.8832
10^{-2}	0.8940
10^{-1}	0.9253

Как видно из табл. 4 при отношении $\omega L_S/R_L \leq 10^{-3}$ КПД изменяется незначительно, и только при значениях относительной индуктивности $\omega L_S/R_L > 10^{-3}$ и выше КПД возрастает более существенно.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА КПД ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРА ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Реальные конденсаторы в отличие от идеальных обладают внутренним сопротивлением материала обкладок и выводов R_A и сопротивлением изоляции (утечки) R_B (рис. 5). Определим влияние этих параметров конденсатора на КПД НВ с С-фильтром.

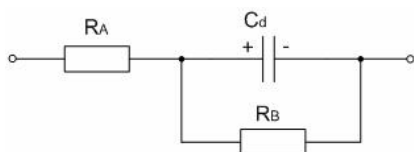


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения конденсатора

Идеальный конденсатор должен обладать бесконечным сопротивлением постоянному току, однако в реальности это сопротивление имеет конечное значение. Наличие внутреннего сопротивления конденсаторов вызывает дополнительные потери энергии в них, что приводит к уменьшению КПД на (0,5...1) %.

Влияние конечной емкости конденсатора на КПД также является незначительным. При расчете емкости конденсатора для обеспечения пульсаций выходного напряжения на уровне 10 % от номинального и менее КПД НВ увеличивается на (0,1...0,5) % при увеличении емкости от рассчитанной до бесконечности.

ВЫВОДЫ

1. Получено аналитическое соотношение для расчета КПД НВ с С-фильтром в функции отношения эквивалентного сопротивления, учитывающего сопротивление обмоток трансформатора, проводников и диодов, к сопротивлению нагрузки и отношения порогового напряжения диодов к значению амплитуды сетевого напряжения.

2. Проверена корректность полученного аналитического соотношения на MATLAB-модели. Различия значений КПД, полученных в результате вычисления по аналитическому выражению и в результате моделирования, незначительное.

3. Исследовано на MATLAB-модели влияние третьей гармоники в питающем напряжении на КПД НВ с С-фильтром. При увеличении содержания третьей гармоники в сетевом напряжении КПД уменьшается до определенного граничного значения, после которого КПД начинает увеличиваться. В ходе моделирования определены эти граничные значения для различных значений содержания третьей гармоники.

4. Получена зависимость КПД от эквивалентной индуктивности цепи заряда конденсатора С-фильтра. При малых относительных значениях индуктивного сопротивления КПД преобразователя практически не изменяется, а при значениях индуктивного сопротивления сопоставимых с сопротивлением нагрузки (единицы процентов) и более, КПД несколько увеличивается.

5. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании НВ с С-фильтром для выбора элементной базы и расчета КПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К., "Вища школа", 1978. – 424 с.

Bibliography (transliterated): 1. Rudenko V.S., Sen'ko V.I., Chizhenko I.M. Preobrazovatel'naya tehnika. - K., "Vischa shkola", 1978. - 424 s.

Поступила 17.09.2012

Жемеров Георгий Георгиевич, д.т.н., проф.

Лобач Игорь Олегович

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника" 61002, Харьков, ул.Фрунзе 21, тел./факс (057) 707-63-12 e-mail: zhemerov@gmail.com, i.o.lobach@yandex.ua

Zhemerov G.G., Lobach I.O.

Efficiency of a double-pulsed bridge noncontrolled rectifier with a capacitance filter.

In the paper, efficiency of a single-phase noncontrolled bridge rectifier with a capacitance filter versus equivalent-to-load-resistance ratio has been specified.

Key words – efficiency, double-pulsed bridge noncontrolled rectifier, threshold voltage, capacity, insulation resistance.