

УДК 621.313.333

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СООТНОШЕНИЙ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ВЕНТИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТОВ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

А. М. Галиновский, О. Ю. Бабенко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: ntuukafem@ua.fm

Е. А. Ленская

Государственное агентство по энергоэффективности и энергосбережению Украины
ул. Краковская, 17, г. Киев, 02094, Украина. E-mail: A_Lenskay@ukr.net

Приведены методики определения основных соотношений трехфазных и многофазных выпрямителей вентильных генераторов по результатам расчетов переходных режимов моделей выпрямителей в системе схемотехнического моделирования Micro Cap, а также нелинейных параметров эквивалентных схем замещения выпрямителей по цепям нагрузки и источника питания при изменении режима работы от холостого хода до короткого замыкания. Анализ результатов расчетов моделей 48-фазного мостового выпрямителя с точной электрической и эквивалентной схем замещения в системе Micro Cap, проведенных в динамических и установившихся режимах работы, показал практическую идентичность токов нагрузки двух моделей выпрямителя.

Ключевые слова: характеристики, вентильный генератор, выпрямитель, диод, переходный режим.

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ ВИПРЯМЛЯЧІВ ВЕНТИЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РОЗРАХУНКІВ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ

О. М. Галіновський, О. Ю. Бабенко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: ntuukafem@ua.fm

О. О. Ленська

Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України
вул. Краківська, 17, м. Київ, 02094, Україна. E-mail: A_Lenskay@ukr.net

Приведено методики визначення основних співвідношень трифазних та багатофазних випрямлячів вентильних генераторів за результатами розрахунків перехідних режимів моделей випрямлячів у системі схемотехнічного моделювання Micro Cap, а також нелінійних параметрів еквівалентних схем заміщення випрямлячів за ланками навантаження та джерела живлення при зміні режиму роботи від неробочого ходу до короткого замикання. Аналіз результатів розрахунків моделей 48-фазного мостового випрямляча з точною електричною та еквівалентною схемами заміщення в системі Micro Cap, проведених у динамічних та ustalених режимах роботи, показав практичну ідентичність струмів навантаження двох моделей випрямляча.

Ключові слова: характеристики, вентильний генератор, випрямляч, діод, перехідний режим.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Вентильные генераторы (ВГ) широко применяются как электромашино-вентильные возбудители бесконтактных синхронных машин (БСМ). ВГ состоит из электромашиного возбудителя и выпрямителя. В основном применяются синхронные возбудители (СВ) и трехфазные диодные мостовые выпрямители. Для улучшения качества формы выходного напряжения ВГ выполняется многофазным [1, 2, 3–7].

При оптимальном проектировании БСМ используют полные сведения о параметрах СВ и вентилей, об основных соотношениях полупроводникового выпрямителя на всем диапазоне его внешней характеристики [1, 3, 6–8]. Важным является правильный выбор параметров защитных цепей вентилей, которые в основном зависят от индуктивности коммутации и времени восстановления запирающих свойств вентилей τ [5, 8–10].

При числе фаз ВГ $m \leq 6$ выпрямители могут исследоваться аналитическим методом [8]. Однако этот метод практически неприемлем для исследования многофазных выпрямителей, поэтому большое внимание уделяется численным методам расчета.

В работах [3–7, 10, 11] выпрямители исследуют в системе схемотехнического моделирования Micro Cap [12]. Параметры выпрямителей определяют по

результатам счета в установившихся или переходных режимах работы при максимальном шаге интегрирования по времени, меньшем (примерно на порядок) величины τ . В первом случае определение основных соотношений выпрямителя на всем диапазоне внешней характеристики при изменении параметров источника питания занимает сравнительно много расчетного времени. Во втором случае записывают результаты расчета переходных режимов работы выпрямителя от холостого хода до короткого замыкания, затем определяют средние значения величин на периоде частоты пульсации напряжения нагрузки [11]. При применении этой методики исследований требуется сравнительно большая оперативная память компьютера. Актуальным является совершенствование методики исследований.

Расчетные соотношения выпрямителей влияют на величины нелинейных параметров их эквивалентных схем, которые применяются при расчете электромеханических систем в статических и динамических режимах работы [3, 6]. Поэтому точности определения основных расчетных соотношений выпрямителей следует уделять особое внимание.

Целью работы является совершенствование методики определения основных соотношений многофазных выпрямителей ВГ по результатам расчетов

переходних режимов моделей выпрямителей в системе схмотехнического моделирования.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Сопоставительный анализ ВГ с разным числом фаз проводится при неизменной геометрии синхронного возбудителя, одинаковом числе зубцов якоря, числе полюсов, шаге обмотки, коэффициенте заполнения паза медью, величине индукции в воздушном зазоре при синусоидальном законе ее распределения. При этом одинаковыми будут величины ЭДС на один виток якорных обмоток возбудителей. Принимается неизменным число витков w , последовательно соединенных в одной фазе обмотки якоря возбудителя. При этом действующее значение ЭДС m -фазной якорной обмотки $E_{im} = E_{i3} \cdot k_{pm} / k_{p3}$, где: E_{i3} – ЭДС трехфазной обмотки; k_{pm} , k_{p3} – коэффициенты распределения обмоток. Величины активного и индуктивного сопротивления фазных обмоток прямо пропорциональны числу фаз источника [2].

На рис. 1,а показана электрическая схема модели многофазного мостового выпрямителя в системе схмотехнического моделирования Micro Cap (системе MC). ЭДС источника питания переменного тока (источника) $e_{ij} = A_i \sin(\omega_i t + \lambda \cdot (m_j - 1))$, где A_i , $\omega_i = 2\pi f_i$ – амплитуда и частота ЭДС. Нижним индексом $j=(1 - m)$ обозначены номера фаз m -фазного источника, $\lambda = 2\pi/m$ – угол сдвига ЭДС смежных фаз. На схеме: $r_{i1} = r_{i2} = \dots = r_{im} = r_i$, $x_{i1} = x_{i2} = \dots = x_{im} = x_i$ – активные и индуктивные сопротивления источника; R_d , L_d – активное сопротивление и индуктивность нагрузки выпрямителя. Диоды $D_1 - D_m$ и $D_{m+1} - D_{m+m}$ шунтируются защитными RC-цепями. Для расчета реактивной мощности в схему введен дополнительный источник питания со сдвигом фазных ЭДС на 90° по отношению к ЭДС основного источника: $e_{ij} = A_i \sin(\omega_i t + \lambda \cdot (m_j - 1) - \pi/2)$.

На рис. 1,б показана эквивалентная схема выпрямителя со стороны источника, где: r_n , x_n – эквивалентные сопротивления нагрузки источника; I_{i1} – фазный ток первой гармоники; U_n – фазное напряжение эквивалентной нагрузки источника.

На рис. 1,с показана эквивалентная схема со стороны нагрузки выпрямителя: V_e , r_{ie} – источник ЭДС

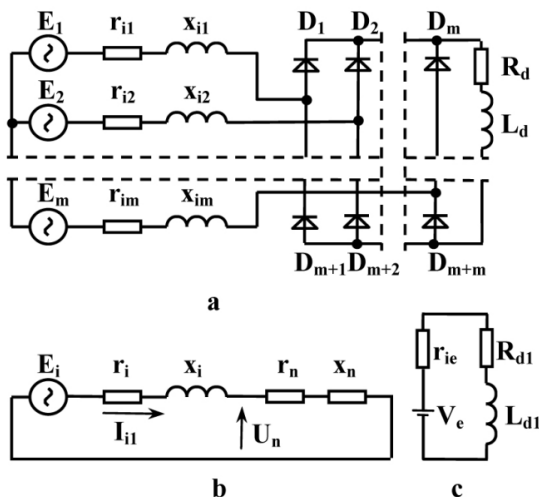


Рисунок 1 – Электрическая (а) и эквивалентные (б, с) схемы выпрямителей

и активное сопротивление эквивалентного источника; $R_{d1} = R_d$, $L_{d1} = L_d$ – параметры нагрузки.

При исследованиях применяются система относительных единиц (о.е.) выпрямителя и система о.е. источника питания (источника).

В системе о.е. выпрямителя базовыми величинами принимаются напряжение холостого хода и ток КЗ выпрямителя. В трехфазном выпрямителе:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{i3}; I_{dk} = \frac{\sqrt{2} E_{i3}}{z_{i3}},$$

где z_{i3} – полное сопротивление источника.

Базовое сопротивление нагрузки

$$z_b = \frac{U_{d0}}{I_{dk}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} z_{i3}.$$

В m -фазном мостовом выпрямителе [2]:

$$U_{d0m} = \frac{m2\sqrt{2}}{\pi} E_{im} \sin \frac{\pi}{m}; I_{dkm} = I_{dkm}.$$

В системе о.е. источника базовыми величинами принимаются ЭДС E_i и ток КЗ $I_{ik} = E_i / z_i$. Величины источника в о.е. источника:

$$U_n^* = U_n / E_i; I_{il}^* = I_{il} / I_{ie};$$

$$r_i^* = r_i / z_i = \cos \phi_e; x_i^* = x_i / z_i = \sin \phi_e.$$

На рис. 2 показаны векторные диаграммы источника в режимах КЗ (а) и нагрузки (б). Все величины приведены в о.е. источника.

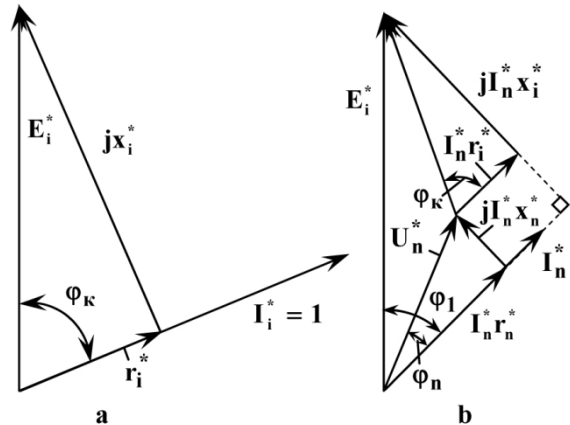


Рисунок 2 – Векторные диаграммы источника питания: а) при коротком замыкании; б) при нагрузке

При известных величинах ϕ_k и ϕ_n определяем:

$$U_n^* = \sqrt{1 - 2I_{il}^* \cos(\phi_k - \phi_l) + I_{il}^{*2}};$$

$$\cos \phi_n = (\cos \phi_l - I_{il}^* r_i^*) / U_n^*.$$

Алгоритм расчета выпрямителя приведен в табл. 1.

Определяем величины: I_d , U_d , P_n – ток, напряжение и мощность нагрузки выпрямителя; P_{i1} , Q_{i1} , S_{i1} , $\cos \phi_1$ – активная, реактивная, полная мощность, коэффициент мощности по 1-й гармонике тока источника; η – КПД выпрямителя; I_b , I_{i1} , λ – действующие значения полного тока и 1-ой гармоники тока, коэффициент искажения тока источника; k_s – коэффициент увеличения расчетной мощности источника;

Таблиця 1 – Алгоритм расчета выпрямителя

№ п.п.	Обозн.	Формула
1	I_d	$\frac{1}{T} \int_0^T i_d dt$
2	U_d	$\frac{1}{T} \int_0^T u_d dt$
3	P_{il}	$\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_n e_{ij} \cdot i_{ij} \right) dt$
4	Q_{il}	$\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_n e_{ij} \cdot i_{ij} \right) dt$
5	I_i	$\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\frac{1}{m} \sum_m i_{ii}^2} dt$
6	S_{il}	$\sqrt{P_{il}^2 + Q_{il}^2}$
7	I_{il}	$S_{il} / (mE_i)$
8	$\cos\varphi_1$	P_{il} / S_{il}
9	λ	I_{il} / I_i
10	P_n	$U_d \cdot I_d$
11	η	P_n / P_{il}
12	k_s	$1 / (\cos\varphi_1 \cdot \lambda \cdot \eta)$
13	k_{il}	I_d / I_{il}
14	I_{d*}	I_d / I_{dk}
15	U_{d*}	U_d / U_{d0}
16	I_{il}^*	$\sqrt{2} I_{d*} / k_{il}$
17	U_n^*	$\sqrt{I - 2I_{il}^* \cos(\phi_k - \phi_l) + I_{il}^{*2}}$
18	$\cos\varphi_n$	$(\cos\varphi_1 - I_{il}^* \cdot r_{il}^*) / U_n^*$

где I_{d*} , U_{d*} – ток и напряжение нагрузки выпрямителя в о.е. выпрямителя; I_{il}^* , U_n^* – ток и напряжение нагрузки источника в о.е. источника; $\cos\varphi_n$ – коэффициент мощности нагрузки источника.

При исследовании моделей выпрямителя в системе МС по результатам расчета переходного процесса с режима холостого хода до КЗ ограничиваем число величин, текущие числовые значения которых записываются в оперативную память. Это подинтегральные значения величин 1–5 (табл. 1).

Пример расчета выпрямителей при: $m = 3$, $m = 12$, $m = 48$; $A_{i3} = 416 / \sqrt{2}$ В; $z_{i3} = 15$ Ом; $k_r = r_i / x_i = 0,25$; $f_i = 100$ Гц. Применены диоды MR2510 D.

На рис. 3 показаны зависимости коэффициентов связи основных расчетных величин выпрямителей от тока нагрузки I_{d*} .

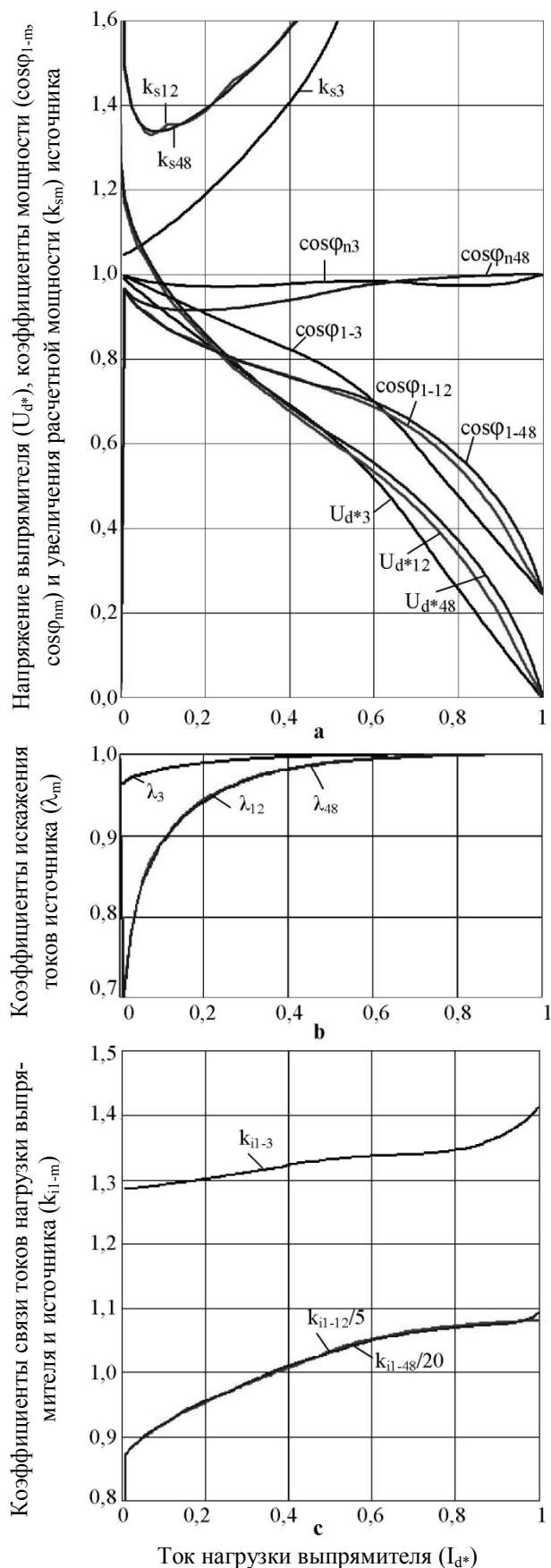


Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов связи основных расчетных величин мостовых выпрямителей от тока нагрузки I_{d*}

Число фаз выпрямителя обозначено нижним индексом величины λ и вторым нижним индексом величин $U_{d*}, k_{i1}, k_s, \cos\varphi_1, \cos\varphi_n$.

Напряжения и токи m -фазных выпрямителей приведены к системе относительных единиц трехфазного выпрямителя.

Напряжение холостого хода m -фазного мостового выпрямителя

$$U_{d0m*} = \frac{U_{d0m}}{U_{d0}}$$

Ток КЗ m -фазных мостовых выпрямителей равен току 3-фазного мостового выпрямителя [2].

Сопоставим диаграммы напряжений и токов моделей выпрямителей по электрической (рис. 1,а) и эквивалентной (рис. 1,с) схемам.

ЭДС эквивалентного источника питания V_e (рис. 1,а)

$$A_e = U_{dom} - \Delta u_D,$$

где Δu_D – падение напряжения на вентилях.

Нелинейное активное сопротивление эквивалентного источника питания [11]

$$r_{ie} = z_{bm} \operatorname{tg}\beta,$$

где

$$z_{bm} = U_{dom} / I_{dk},$$

$\operatorname{tg}\beta$ определяется по углу наклона внешней характеристики выпрямителя.

В соответствии с рис. 4,

$$\operatorname{tg}\beta = (U_{d*A} - U_{d*B}) / I_{d*B},$$

где U_{d*A}, U_{d*B} напряжения выпрямителя при токах $I_{d*} = 0$ и $I_{d*} = I_{d*B}$.

На рис. 5 показана зависимость $\operatorname{tg}\beta$ от тока I_{d*} для 48-фазного мостового выпрямителя.

На рис. 6 приведены временные диаграммы напряжений и токов моделей 48-фазного мостового выпрямителя, рассчитанных в системе МС при ди-

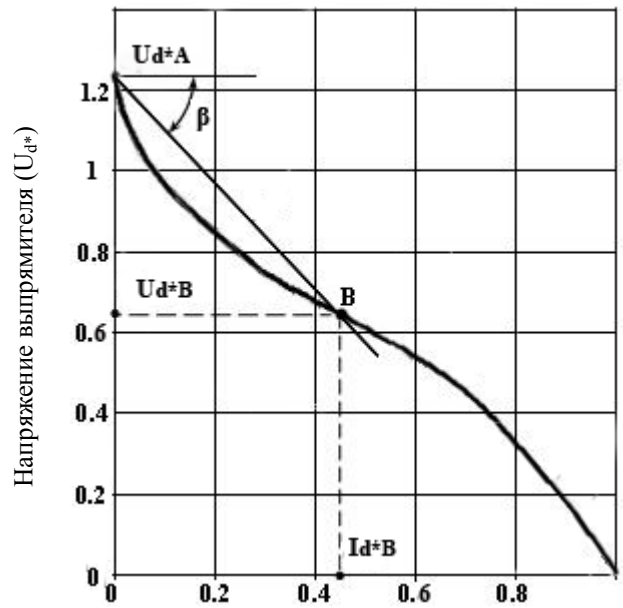


Рисунок 4 – Определение угла наклона внешней характеристики выпрямителя

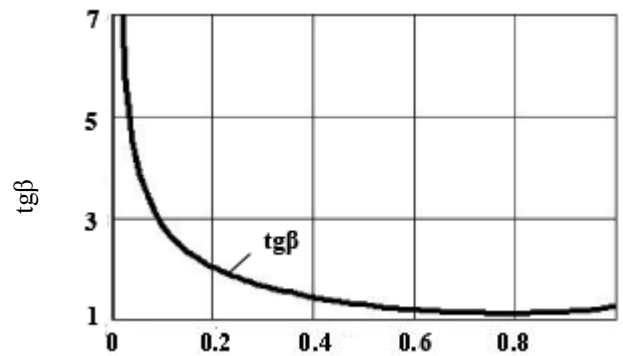


Рисунок 5 – Зависимость $\operatorname{tg}\beta$ от тока I_{d*}

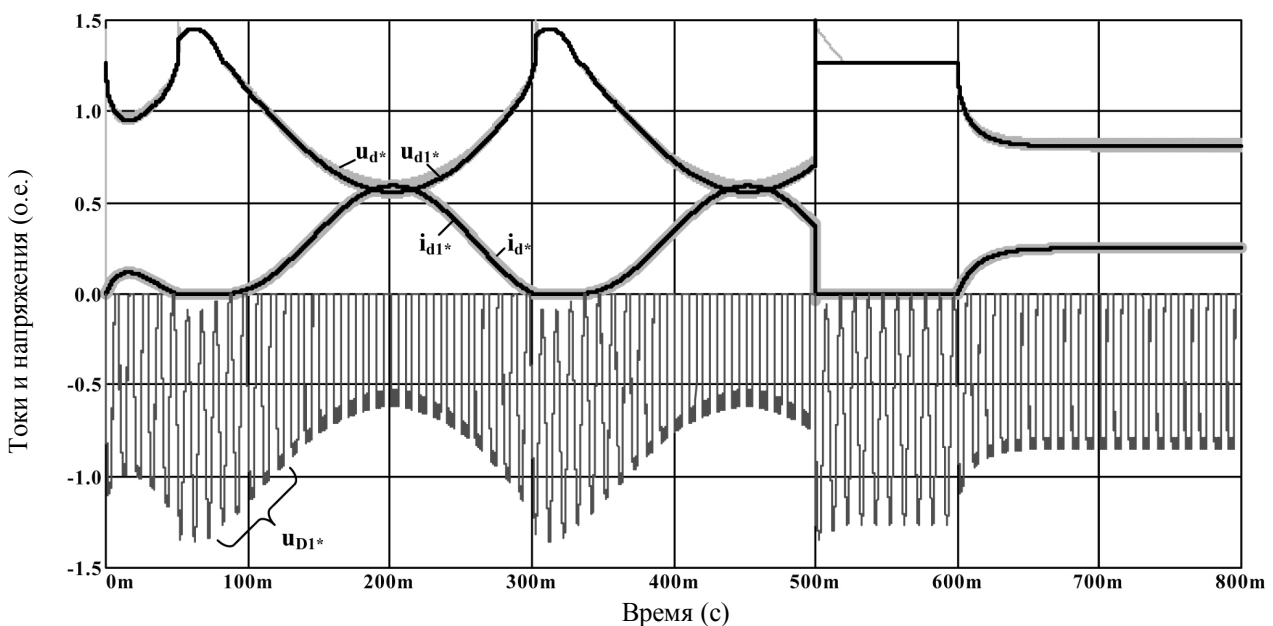


Рисунок 6 – Диаграммы напряжений и токов моделей 48-фазного мостового выпрямителя с точной электрической и эквивалентной схемой замещения в динамических и квазиустановившихся режимах работы

намических и квазиустановившихся режимах работы. Применены модели выпрямителей с точной электрической (рис. 1,а) и эквивалентной (рис. 1,с) схемами замещения.

Дополнительные исходные данные по параметрам цепей нагрузки: $R_{d1}=R_d=80$ Ом; $L_{d1}=L_d=1.5$ Гн; на интервале времени 0–0,5 с в цепи нагрузки наводится ЭДС; $e_n = A_n \sin(\omega_n \cdot t - \pi)$, где $A_n = 1000$ В; $\omega_n = 2\pi f_n$, $f_n = 4$ Гц; на интервале времени 0,5–0,6 с – разрыв цепи нагрузки.

На диаграмме напряжения (u_{d*} , u_{d*1} , u_{D1*}) и токи (i_{d*} , i_{d*1}) в относительных единицах выпрямителя. Ток i_{d*} выделен светлой широкой линией (для удобства сопоставления токов).

Как видно из диаграмм, ток нагрузки эквивалентной схемы выпрямителя практически совпадает с током нагрузки модели 48-фазного выпрямителя, выполненной в системе МС по полной электрической схеме.

Отметим высокое качество формы выходного напряжения многофазного выпрямителя при разных режимах работы.

На рис. 5 приведена диаграмма напряжений на диоде u_{D1*} , позволяющая оценить качество защиты вентилей.

Методика исследования выпрямителей позволяет определить потери на элементах схемы (вентили, защитные цепи, источник), коэффициент искажения напряжения нагрузки, погрешности расчета на всем диапазоне внешней характеристики.

ВЫВОДЫ. 1. Совершенствование методики исследования моделей выпрямителей в системе схемотехнического моделирования во многом достигается за счет:

– установления взаимосвязей между расчетными величинами выпрямителя в системах о.е. по цепям нагрузки выпрямителя и нагрузки источника питания, общих для динамических и квазиустановившихся режимов работы;

– применения алгоритма расчета выпрямителя при ограниченном числе величин, текущие числовые значения которых записываются в оперативную память при переходном процессе с режима холостого хода до короткого замыкания.

2. Определение основных соотношений многофазных выпрямителей проводится с заданной точностью на всем диапазоне внешней характеристики. С высокой точностью определяются нелинейные параметры эквивалентных схем замещения выпрямителей по цепи нагрузки и источника питания.

3. Анализ результатов расчетов моделей многофазных выпрямителей с точной электрической и эквивалентными схемами замещения в системе Micro Cap, проведенных в динамических и установившихся режимах работы, показал практическую идентичность токов нагрузки двух моделей выпрямителя.

4. Целесообразно совершенствование методик расчета основных соотношений многофазных управляемых нереверсивных и реверсивных выпрямителей с мостовыми и каскадными схемами преобразования, методик проектирования вентильных ге-

нераторов бесконтактных синхронных машин и ветроэнергетических установок с указанными преобразователями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глебов И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. – Л.: Наука, 1988. – 322 с.
2. Галиновский А.М., Ленская Е.А. Многофазные синхронные возбудители в бесконтактных системах возбуждения синхронных машин // 36. наук. пр. «Праці Інституту електродинаміки НАН України». – 2003. – № 1. – С. 98–105.
3. Галиновский А.М., Бобер В.А., Ленская Е.А. Модели многофазных вентильных генераторов бесконтактных синхронных машин и ветроэнергетических установок // Темат. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» науч.-техн. журнала «Электроинформ». – 2009. – Львов: ЕКОинформ. – С. 315–320.
4. Ленская Е.А., Галиновский А.М. Сопоставительный анализ характеристик многофазных преобразователей бесконтактных машин двойного питания и вентильных генераторов ветроэнергетических установок // Відновлювана енергетика. – 2011. – № 4. – С. 35–41.
5. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Сенько В.И., Анпилогов Н.Г. Коммутационные перенапряжения в многофазных преобразователях // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Одеський НПП. – К.: Техніка, 2011. – № 3. – С. 319–322.
6. Галиновский А.М., Ленская Е.А. Многофазно-однофазные реверсивные электромашинно-вентильные преобразователи бесконтактных машин двойного питания // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 87. – С. 113–120.
7. Галиновский А.М. Параметры и характеристики полупроводниковых выпрямителей вентильных генераторов // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 88. – С. 47–55.
8. Беркович Е.И., Ковалев В.Н., Ковалев Ф.И. и др. Полупроводниковые выпрямители. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.
9. Глух Е.М., Зеленов В.Е. Защита полупроводниковых преобразователей. – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
10. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Методика расчета защитных цепей вентилей выпрямителя // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 4. – С. 43–50.
11. Галиновский А.М., Ленская Е.А. Метод расчета электромашинно-вентильных преобразователей с естественной коммутацией в переходных режимах // Технічна електродинаміка. – 2003. – № 5. – С. 29–33.
12. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap 6. – М.: Горячая линия–Телеком, 2001. – 344 с.

**DETERMINATION OF THE MAIN RECTIFIERS RATIOS OF GATED GENERATORS
USING THE CALCULATION RESULTS OF TRANSIENT MODES**

A. Galinovsky, O. Babenko

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»
prosp. Pobedy, 37, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: ntuukafem@ua.fm

O. Lenskaya

State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine
ul. Krakovskaya, 17, Kiev, 02094, Ukraine. E-mail: A_Lenskay@ukr.net

Determination techniques of the main ratios of three phase and multiphase rectifiers of gated generators are given. These techniques are using the calculation results of transient modes of rectifier models in circuitry simulation Micr Cap system and non-linear parameters of the equivalent substitution circuits of rectifiers in loading circuits and power supply during an operation mode change from idling to short circuit. The analysis of the models calculations results of the 48-phase bridge rectifier with exact equivalent and electrical equivalent circuits in the Micro Cap system, that was executing in dynamic and set operation modes, shows practical identity of load currents of two rectifier models.

Key words: characteristics, gated generator, rectifier, diode, transient regime.

REFERENCES

1. Glebov I. A. *Scientific bases of systems designing of excitation of powerful synchronous machines*. – L.: Nauka, 1988. – 322 p. [in Russian]
2. Galinovsky A.M., Lenskaya E.A. Multiphase synchronous drivers in noncontact systems of excitation of the synchronous machines // *Collection of scientific works “Works of Kiev Institute of Electrotechnology”*. – 2003. – № 1. – PP. 98–105. [in Russian]
3. Galinovsky A.M., Bober V.A., Lenskaya E.A. Models of multiphase gated generators of noncontact synchronous machines and wind-energetic installations // *Thematic release “Problems of the automated electric drive. Theory and practice” of the scientific and technical journal «Elektroinform»*. – Lviv, 2009. – PP. 315–320. [in Russian]
4. Lenskaya E.A., Galinovsky A.M. Comparative analysis of characteristics of multiphase transformers of noncontact machines of a double supply and gated generators of wind-energetic installations // *Regenerative power engineering*. – 2011. – № 4. – PP. 35–41. [in Russian]
5. Galinovsky A.M., Lenskaya E.A., Senko V.I., Anpilogov N.G. Switching overvoltage in multiphase transformers // *Electrotechnical and computer systems*. – K.: Tecknika, – 2011. – № 3. – PP. 319–322. [in Russian]
6. Galinovsky A.M., Lenskaya E.A. Multiphase and single-phase reverse dynamoelectric and gated transformers of noncontact machines of a double supply // *Mountain electromechanics and automatics: scientific and technical collection*. – 2011. – Iss. 87. – PP. 113–120. [in Russian]
7. Galinovsky A.M. Parameters and characteristics of semi-conductor rectifiers of gated generators // *Mountain electromechanics and automatics: scientific and technical collection*. – 2012. – Iss. 88. – PP. 47–55. [in Russian]
8. Berkovich E.I., Kovalev V.N., Kovalev F.I. and oth. *Semiconductor rectifiers*. – M.: Energiya, 1978 – 448 p. [in Russian]
9. Gluh E.M., Zelenov V.E. *Protection of semiconductor converters*. – M.: Energiya, 1970. – 152 p. [in Russian]
10. Galinovsky A.M., Lenskaya E.A., Erhard Aykhofer. Design procedure of protective circuits of valves of the rectifier // *Technical electrodynamic*. – 2005. – № 4. – PP. 43–50. [in Russian]
11. Galinovsky A.M., Lenskaya E.A. Method of calculation of dynamoelectric and gated transformers with natural switching in transient modes // *Technical electrodynamic*. – 2003. – № 5. – PP. 29–33. [in Russian]
12. Razevig V.D. *The system of circuit simulation. Micro-CAP 6*. – M.: SOLON, 2001. – 344 p. [in Russian]

Стаття надійшла 23.07.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Каліновим А.П.