

*А.М. Галиновский, канд. техн. наук  
(Украина, Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»)*

## ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ВЕНТИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

### **Введение.**

Вентильный генератор (ВГ) – это электромашинно-вентильный преобразователь (ЭМВП), состоящий из синхронного генератора (СГ) и полупроводникового выпрямителя. ВГ применяются в бесконтактных синхронных машинах (БСМ), ветроэнергетических установках (ВЭУ), сварочных агрегатах [2, 3, 5, 7 - 10]. В БСМ в основном применяются трехфазные мостовые выпрямители [2, 3]. В ВЭУ при большом диапазоне изменения скорости вращения вала для поддержания постоянства выходного напряжения ВГ целесообразно применять каскадную мостовую схему преобразования [9]. Для улучшения качества формы выходного напряжения вентильные генераторы выполняются многофазными [2, 5, 8 - 10].

При исследованиях выпрямителей применяют разные физические и математические модели. Аналитические методы расчета достаточно сложные, применяется идеализация схем с последующим учетом основных влияющих факторов [1]. Такие методы практически неприемлемы для исследования многофазных выпрямителей. Применение численных методов расчета позволяет получить достоверную информацию. Однако важным также является создание простых и достаточно точных эквивалентных схем выпрямителей, которые легко адаптируются в математические модели электромеханических систем в целом. Применение разных моделей при решении одной и той же задачи повышает вероятность получения корректных результатов, подтверждает правомерность принятых допущений, позволяет более полно пояснить физические процессы в ЭМВП при установившихся и переходных режимах.

В работах [5 - 10] модели трехфазных и многофазных выпрямителей рассчитывают в системе схемотехнического моделирования Micro Cap (система МС) [4]. Параметры выпрямителей определяют по результатам расчетов в установившихся или переходных режимах работы. В первом случае выпрямитель рассчитывают до установившегося режима, записывают значения величин по последней точке счета, определяют искомые величины при интегрировании переменных по времени от начала счета [5]. Время счёта содержит целое число периодов частоты источника. Максимальный шаг интегрирования должен быть меньше (примерно на порядок) времени восстановления запирающих свойств вентилей. Поэтому определение параметров выпрямителей на всем диапазоне внешней характеристики занимает сравнительно много расчетного времени. Во втором случае записывают результаты расчетов величин в переходном режиме работы выпрямителя от холостого хода до короткого замыкания (к.з.), затем определяют средние значения величин на периоде частоты пульсации напряжения нагрузки [5]. При применении этого метода расчета требуется сравнительно большая оперативная память компьютера.

Параметры и характеристики выпрямителей, рассчитанные в системе МС, позволяют построить эквивалентные схемы замещения по цепи нагрузки выпрямителей и по цепи его источника питания. Расчет моделей ЭМВП с эквивалентными схемами замещения выпрямителей в переходных режимах существенно упрощаются. В десятки раз сокращается время компьютерного счета моделей ВГ. Временные диаграммы токов, построенные по результатам расчетов моделей БСМ с электрическими и эквивалентными схемами трехфазных и многофазных ЭМВП, практически совпадают [6, 8, 10].

В работах [5 - 10] параметры выпрямителей определяют в физических величинах или в системах относительных единиц (о.е.) в зависимости от тока нагрузки выпрямителя. Вместе с тем анализ работы выпрямителей ВГ проводится также в зависимости от коэффициента связи сопротивлений источника и нагрузки [2], от величины сопротивления источника в о.е. СГ [3]. Актуальным является определение зависимости параметров выпрямителей от указанных величин, уменьшение времени расчета выпрямителей в системе МС и др.

**Цель работы:** совершенствование методик расчета параметров и характеристик выпрямителей ВГ.

### **Основные соотношения трехфазных мостовых выпрямителей**

На рис. 1 показана электрическая схема трехфазного мостового выпрямителя в системе МС. Диоды защищены RC-фильтрами. На схеме:  $r_i = R_a = R_b = R_c$  и  $L_i = L_a = L_b = L_c$  – активные сопротивления и индуктивности источника питания;  $V_a, V_b, V_c$  – источники синусоидальной ЭДС;  $R_n, L_n$  – активное сопротивление и индуктивность нагрузки выпрямителя. В дополнительном источнике питания ( $V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$ ) фазные ЭДС смещены на угол  $90^\circ$  по отношению к фазным ЭДС основного источника питания (источника).

Базовые величины в системе о.е. нагрузки выпрямителя – напряжение холостого хода и ток к.з.:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{p} E_i; I_{dk} = \frac{\sqrt{2}E_i}{z_i}, \quad (1)$$

где  $E_i$  и  $z_i$  – действующее значение фазной ЭДС и полное сопротивление источника. Напряжение и ток выпрямителя в о.е. нагрузки выпрямителя:

$$U_{d^*} = U_d / U_{d0}; I_{d^*} = I_d / I_{dk}. \quad (2)$$

На рис. 2, а показана схема замещения выпрямителя по цепи источника, где:  $r_i, x_i$  – сопротивления источника;  $r_n, x_n$  – эквивалентные сопротивления нагрузки источника;  $I_n=I_{i1}$  – ток нагрузки (действующее значение первой гармоники тока) источника;  $U_n$  – напряжение нагрузки.

На рис. 2, а и рис. 2, б показаны векторные диаграммы источника в режиме к.з. и нагрузки.

В системе о.е. источника базовыми величинами приняты ЭДС  $E_i$  и ток к.з.  $I_{ik}=E_i/z_i$  источника.

Напряжение и ток источника в о.е. источника:

$$U_n^* = U_n / E_i; I_n^* = I_{i1}^* = I_n / I_{ik} = I_{i1} / I_{ik}. \quad (3)$$

Сопротивления источника в о.е. источника

$$r_i^* = r_i / z_i = \cos \varphi_k; x_i^* = x_i / z_i = \sin \varphi_k. \quad (4)$$

В работах [7 - 9] установлены общие закономерности изменения основных соотношений трехфазного и многофазных выпрямителей. Показано, что для любой заданной величины тока  $I_{d^*}$  на всем диапазоне внешней характеристики выпрямителя ( $U_{d^*} = f(I_{d^*})$ ) при изменении относительной величины активного сопротивления источника  $k_r = r_i/x_i$  в пределах от 0 до 1 практически неизменны:

– коэффициенты связи между токами нагрузки и источника

$$k_{i1} = I_d / I_{i1}, \quad (5)$$

$$\lambda = I_{i1} / I_i, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент искажения,  $I_i$  – действующее значение полного тока источника;

– коэффициент связи между напряжениями нагрузки выпрямителя и источника  $k_u = U_d / U_n$ ;

Зависимости  $\cos \varphi_n = f(I_{d^*})$  при  $k_r = 0 \div 1$  близки между собой и могут быть представлены усредненной зависимостью.

На рис. 3 показаны величины  $\lambda, \cos \varphi_n, k_u, k_{i1}$  и  $I_{i1}^*$  трехфазного мостового выпрямителя в зависимости от тока  $I_{d^*}$  при: 1)  $k_r = 0$ ; 2)  $k_r = 0,5$ ; 3)  $k_r = 1$ . MR2510 D [7].

Параметры источника: амплитуда ЭДС  $A_i = 416$  В;  $z_i = 15$  Ом;  $f_i = 50$  Гц. Применены диоды типа MR2510 D [7].

Основными (определяющими) являются зависимости величин  $k_{i1}, \cos \varphi_n$  и  $\lambda$  от тока  $I_{d^*}$ . При заданном токе  $I_{d^*}$  по рис.3 находим  $k_{i1}$  и  $\cos \varphi_n$ . Затем в соответствии с (1), (2) и (3) определяем

$$I_{i1}^* = \sqrt{2} \cdot I_{d^*} / k_{i1}. \quad (7)$$

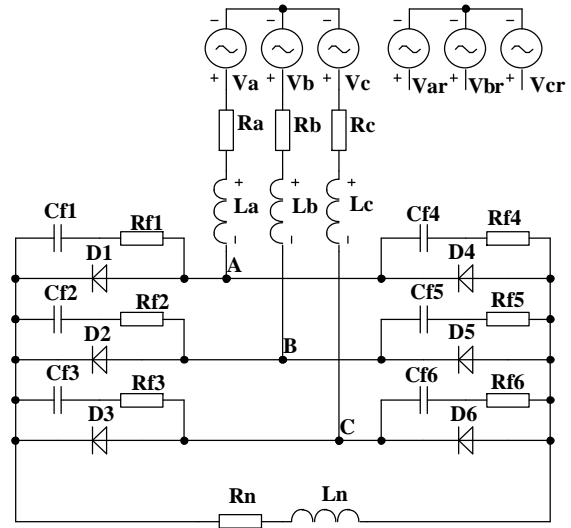


Рис. 1 – Электрическая схема модели выпрямителя в системе схемотехнического моделирования

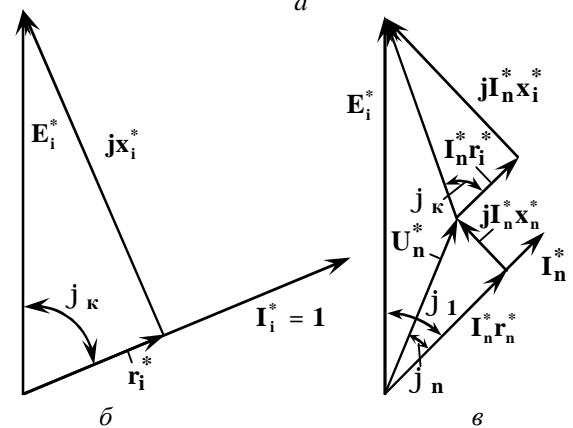
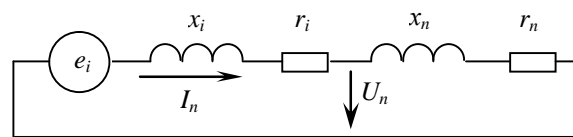
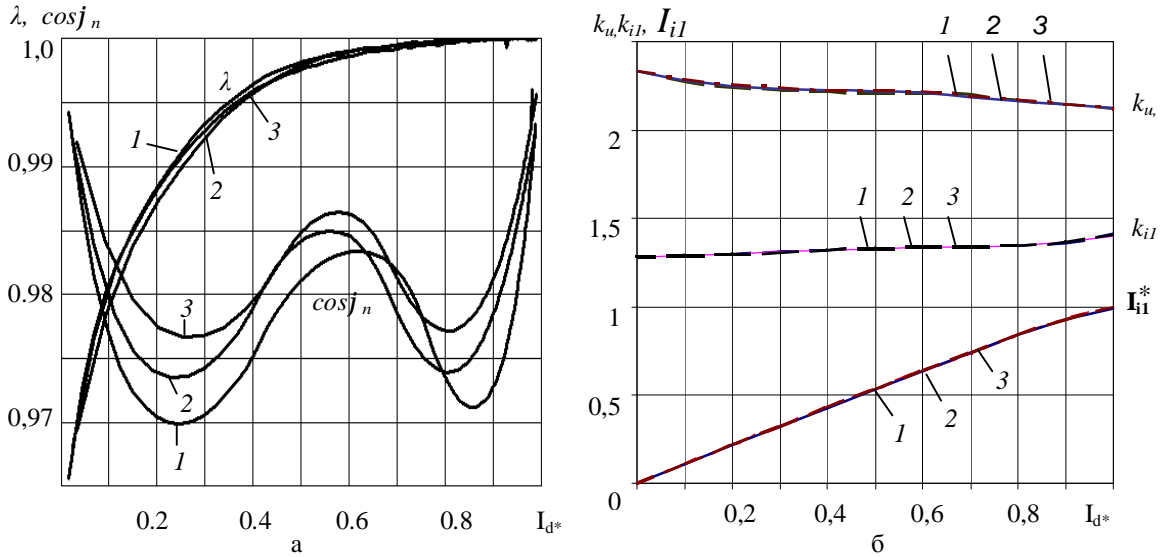


Рис. 2 – Схема замещения (а) и векторные диаграммы источника в режиме к.з. (б) и нагрузки (в)

Мощность нагрузки  $P_n = U_d \cdot I_d = I_d^2 \cdot R_n = 3 \cdot I_{i1}^2 \cdot r_n$ . Поэтому

$$k_u = 3 \cdot \cos \varphi_n / k_{i1}, \quad (8)$$

$$r_n = \frac{k_{i1}^2}{3} \cdot R_n; \quad z_n = \frac{r_n}{\cos \varphi_n} = \frac{k_{i1}^2}{3} \cdot \frac{R_n}{\cos \varphi_n}. \quad (9)$$



**Рис. 3 — Расчетные величины трехфазного мостового выпрямителя при: 1)  $k_r=0$ ; 2)  $k_r=0.05$ ; 3)  $k_r=1$**

**Алгоритм расчета выпрямителя в системе схемотехнического моделирования.**

Алгоритм расчета выпрямителя в системе МС приведен в таблице 1.

Напряжение нагрузки источника и  $\cos \varphi_n$  определяется в соответствии с рис. 2, в с учетом (4):

$$U_n^* = \sqrt{(\sin \varphi_1 - I_{i1}^* \cdot \cos \varphi_k)^2 + (\cos \varphi_1 - I_{i1}^* \cdot \sin \varphi_k)^2} = \sqrt{1 - 2 \cdot I_{i1}^* \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_1) + I_{i1}^{*2}}. \quad (10)$$

$$\cos \varphi_n = (\cos \varphi_1 - I_{i1}^* \cdot r_i^*) / U_n^*$$

Коэффициент связи сопротивления источника и нагрузки выпрямителя находим с учетом (1), (2) и (3):

$$M_z = \frac{z_i}{R_n} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{I_{d^*}}{U_{d^*}}.$$

При номинальной нагрузке ВГ  $M_{zN} = z_i / R_{nN}$ . Сопротивление источника в о.е. СГ с учетом (8) и (9):

$$z_i' = \frac{3 \cdot M_{zN} \cdot \cos \varphi_{nN}}{k_{i1N}^2}$$

В таблице 1 приведены результаты расчета выпрямителя при исходных данных:  $A_i = 416$  В;  $z_i = 15$  Ом;  $k_r = 0.221$ ;  $f_i = 50$  Гц;  $R_n = 300$  Ом.

На рис. 4 показана внешняя характеристика и зависимости величин  $k_{i1}$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $\cos \varphi_n$ ,  $\eta$ ,  $k_s$ ,  $k_{su}$ ,  $M_z$ ,  $z_i'$  от тока  $I_{d^*}$ . По зависимости  $M_z = F(I_{d^*})$  определяют параметры выпрямителя при изменении сопротивления нагрузки выпрямителя. При  $M_{zN}$  и  $z_i'$  определяют параметры выпрямителя в номинальном режиме работы ВГ.

При определении параметров выпрямителя в установившихся режимах работы ускорение счета достигается за счет увеличения частоты источника и уменьшения постоянной времени нагрузки при выходе на установившийся режим.

В качестве примера на рис. 5 показаны внешние характеристики выпрямителя (а) и зависимости величин  $\lambda$  от тока  $I_{d^*}$  при частотах источника: 1)  $f_1 = 50$  Гц; 2)  $f_2 = 250$  Гц.

Анализ результатов исследований моделей выпрямителей показывает: при неизменном значении относительной величины активного сопротивления источника  $k_r$  изменения амплитуды ЭДС и частоты источника практически не влияют на внешние характеристики и зависимости основных расчетных величин ( $k_{i1}$ ;  $\cos\varphi_n$ ;  $\lambda$  и другие) от тока нагрузки выпрямителя  $I_{d*}$ .

При расчете моделей выпрямителей в переходных режимах работы в оперативную память следует записывать только величины  $P_{i1}$ ,  $Q_{i1}$ ,  $I_i$ ,  $I_d$ ,  $U_d$  и  $k_{us}$  (п.п. № 1 – 6 таблицы 1). После обработки массива чисел, определения указанных величин на периоде пульсации напряжения нагрузки выпрямителя рассчитывают остальные величины. При этом существенно разгружается оперативная память машины.

Таблица 1

**Алгоритм расчета и параметры выпрямителя при  $z_i = 15 \text{ Ом}$ ,  $k_r = 0.221$ ,  $A_i = 416 \text{ В}$ ,  $f_i = 50 \text{ Гц}$ ,  $R_n = 300 \text{ Ом}$ .**

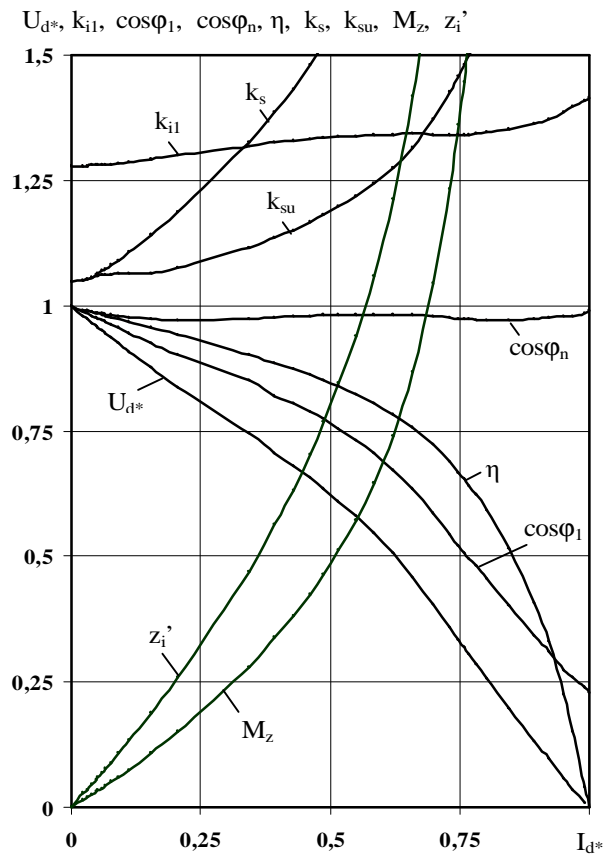


Рис. 4 – Внешняя характеристика и расчетные величины выпрямителя при  $k_r=0.221$

№ п.п.	Величина	Обозн.	Формула	Единицы измерений	Результат расчета
1	Активная мощность источника	$P_{i1}$	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_n e_{ij} \cdot i_{ij} \right) dt$	Вт	1416
2	Реактивная мощность источника	$Q_{i1}$	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_n e'_{ij} \cdot i_{ij} \right) dt$	ВАР	397.9
3	Действующее значение полного тока источника	$I_i$	$\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\frac{1}{m} \sum_m i_{ii}^2} dt$	А	1.703
4	Ток нагрузки	$I_d$	$\frac{1}{T} \int_0^T i_d dt$	А	2.148
5	Напряжение нагрузки	$U_d$	$\frac{1}{T} \int_0^T u_d dt$	В	644.34
6	Коэффициент искажения напряжения нагрузки	$k_{us}$	$\sqrt{U_d^2 + \frac{1}{T} \int_0^T  u_n^2 - U_d^2  \cdot dt} / U_d$		1.065
7	Полная мощность источника (1-я гармоника)	$S_{i1}$	$\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}$	ВА	1470
8	Действующее значение 1-й гармоники тока источника	$I_{i1}$	$S_{i1} / (mE_i)$	А	1.668

Продовження таблиці 1

## Електропостачання та електроаткування

9	Мощность нагрузки	$P_n$	$U_d \cdot I_d$	Вт	1384
10	Ток нагрузки в о.е. нагрузки выпрямителя	$I_{d*}$	$I_d/I_{dk}$	о.е.	0.0774
11	Напряжение нагрузки в о.е. нагрузки. выпрямителя	$U_{d*}$	$U_d/U_{d0}$	о.е.	0.9365
12	Коэффициент связи токов нагрузки и источника	$k_{il}$	$I_d/I_{i1}$		1.287
13	Коэффициент мощности источника (1-я гарм.)	$\cos j_1$	$P_{i1}/S_{i1}$		0.9627
14	Коэффициент искажения тока источника	$\lambda$	$I_{i1}/I_i$		0.9795
15	КПД	$\eta$	$P_n/P_{i1}$		0.9777
16	Коэффициент увеличения мощности источника	$k_s$	$1/(\cos \varphi_1 \cdot \lambda \cdot \eta)$		1.085
17	Ток источника (1-я гармоника) в о.е. источника	$I_{i1}^*$	$\sqrt{2} \cdot I_{d*} / k_{i1}$		0.08508
18	Напряжение нагрузки источника в о.е. источника	$U_n^*$	$\sqrt{1 - 2 \cdot I_{i1}^* \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_1) + I_{i1}^{*2}}$		962.774
19	Коэффициент мощности эквивалентной нагрузки источника	$\cos j_n$	$(\cos \varphi_1 - I_{i1}^* \cdot r_i^*) / U_n^*$		0.9808
20	Отношение сопротивлений источника и нагрузки	$M_z$	$\pi \cdot I_{d*} / (3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{d*})$		0.05
21	Сопротивление источника в о.е. синхронного генератора	$z_i'$	$3 \cdot M_z \cdot \cos \varphi_n / k_{i1}^2$		0.08877

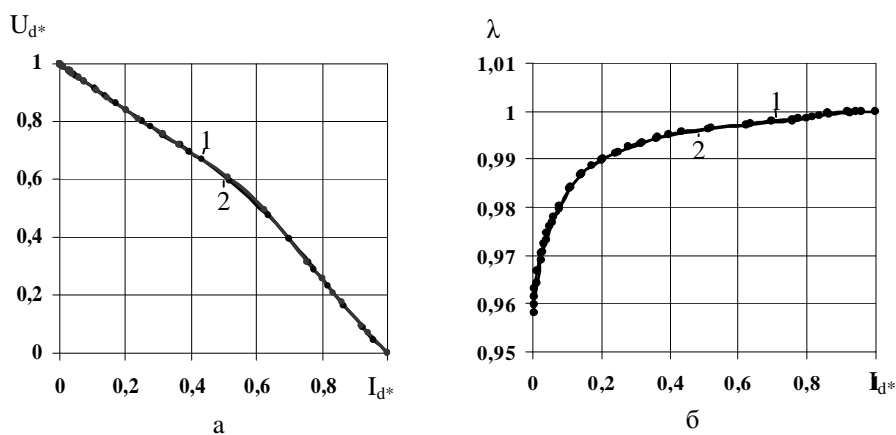


Рис. 5. Внешние характеристики выпрямителя и зависимости  $\lambda$  от тока  $I_{d*}$  при: 1)  $f_i=50$  Гц; 2)  $f_i=250$  Гц

### Упрощенные методики расчета параметров и характеристик выпрямителя вентильного генератора.

Проектирование ВГ проводят по параметрам номинальной нагрузки:  $U_{dN}$ ,  $I_{dN}$ ,  $R_{нН}$ .

При проектировании СГ токи и сопротивления нагрузки определяют в соответствии с (5), (6) и (9).

Учитывая, что трехфазный мостовой выпрямитель работает в первом режиме при  $I_{d*} \leq \sqrt{3}/4$  [2, 7], в соответствии с рис. 3 предварительно задаются расчетными величинами выпрямителя:  $k_{i1N}=1.29$ ;  $\cos \varphi_{nN} = 0.975$ ;  $\lambda_N = 0.98$ . После определения параметров источника питания выпрямителя ( $r_i$ ,  $x_i$  – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря СГ) проводится корректировка расчетных параметров выпрямителя. Как правило, это не приводит к необходимости изменения геометрии СГ, параметров его обмоток.

Покажем упрощенный метод построения внешних характеристик выпрямителя при разных значениях  $k_r$ . Известны зависимости  $k_{i1}$  и  $\cos\varphi_n$  от тока  $I_{d*}$  (рис. 3, б и рис. 3, а).

При заданной величине  $k_r$  определяем  $\varphi_k = \text{arctg}(1/k_r)$ .

Для заданного значения  $I_{d*}$  по (7) определяем  $I_{i1}^*$ .

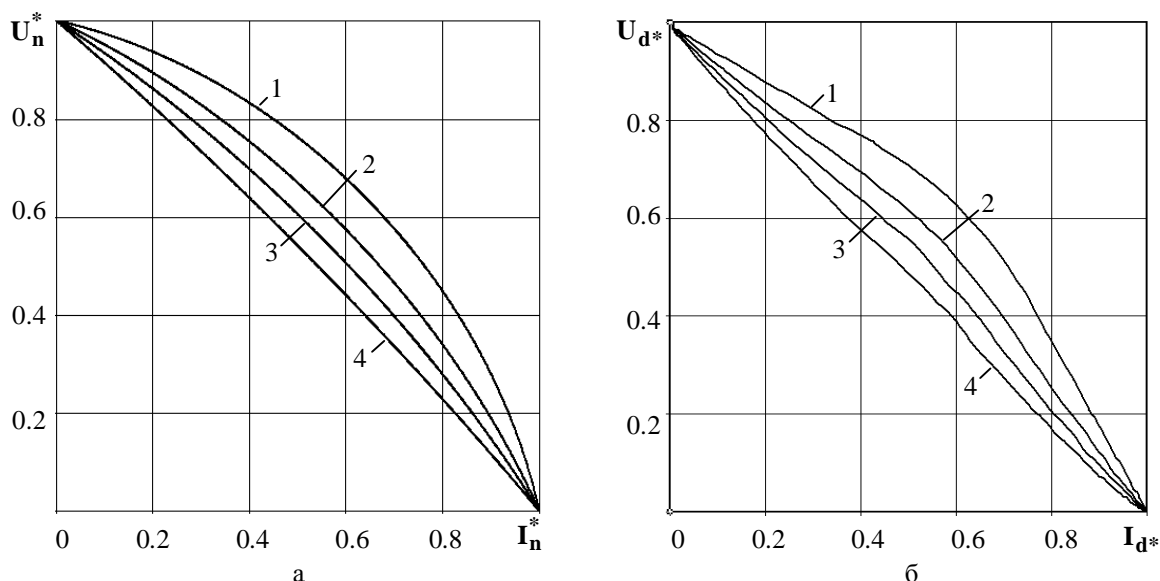
Согласно [7] и рис. 2, в напряжение нагрузки источника

$$U_n^* = \sqrt{1 - (I_{i1}^* \cdot \sin(\varphi_k - \varphi_n))^2} - I_{i1}^* \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_n).$$

В соответствии с (1), (2), (3) и (8) находим

$$U_{d*} = \frac{\pi \cdot \cos\varphi_n}{\sqrt{6} \cdot k_{i1}} \cdot U_n^*.$$

На рис. 6 показаны внешние характеристики источника питания (а) и выпрямителя (б) при: 1)  $k_r = 0$ ; 2)  $k_r = 0.25$ ; 3)  $k_r = 0.5$ ; 4)  $k_r = 1$ . Изменение внешней характеристики выпрямителя при изменении  $k_r$  практически обусловлено изменением внешней характеристики источника питания.



**Рис. 6. Внешние характеристики источника питания (а) и выпрямителя (б) при: 1)  $k_r = 0$ ; 2)  $k_r = 0.25$ ; 3)  $k_r = 0.5$ ; 4)  $k_r = 1$ .**

### Заклучение

1. Проведено совершенствование методики расчета параметров и характеристик трехфазных мостовых неуправляемых выпрямителей в системе схемотехнического моделирования Micro Cap.
2. Разработана упрощенная методика расчета выпрямителя, которая может быть использована при проектировании вентильных генераторов и при построении внешних характеристик выпрямителя.
3. Основные положения разработанных методик могут быть применены при расчете многофазных неуправляемых выпрямителей.
3. Целесообразна разработка методик расчета трехфазных и многофазных управляемых выпрямителей с мостовыми и каскадными схемами преобразования в установившихся и переходных режимах.

### Список литературы

1. Полупроводниковые выпрямители / [Ковалев Ф.И., Мосткова Г.П. (гл. ред.), Беркович Е.И. и др.]. — Москва: Энергия, 1978. — 448 с.
2. Абрамович Борис Николаевич. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей / Б.Н. Абрамович, А.А. Круглый. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. — 128 с.
3. Глебов Игорь Алексеевич. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин / И.А. Глебов. — Л.: Наука, 1988. — 322 с.
4. Разевиг Всеволод Данилович. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap 6 / В.Д. Разевиг. — М.: Горячая линия-Телеком, 2001. — 344 с.

5. Многофазные синхронные возбудители в бесконтактных системах возбуждения синхронных машин / Галиновский А.М., Ленская Е.А. // Праці Інституту електродинаміки НАН України: зб. наук. праць. 2003. № 1. – с. 98 – 105.
6. Галиновский Александр Михайлович. Метод расчета электромашинно-вентильных преобразователей с естественной коммутацией в переходных режимах / А.М. Галиновский, Е.А. Ленская. – Технічна електродинаміка. 2003. № 5. – с. 29 – 33.
7. Галиновский Александр Михайлович. Основные соотношения и внешние характеристики выпрямителя, источника питания и вентильного генератора / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак. – Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. Науковий журнал. 2009. № 2 (19), ч. 1. – с. 35 – 42.
8. Галиновский Александр Михайлович. Модели многофазных вентильных генераторов бесконтактных синхронных машин и ветроэнергетических установок / А.М. Галиновский, В.А. Бобер, Е.А. Ленская. – Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-технічного журналу «Електроінформ». – Львів: Екоінформ, 2009. – с. 315 – 320.
9. Ленская Елена Александровна. Сопоставительный анализ характеристик многофазных преобразователей бесконтактных машин двойного питания и вентильных генераторов ветроэнергетических установок. / Е.А. Ленская, А.М. Галиновский. – Відновлювана енергетика. 2011. №4. – с. 35 – 41.
10. Многофазно-однофазные реверсивные электромашинно-вентильные преобразователи бесконтактных машин двойного питания / Галиновский А.М., Ленская Е.А. // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2011. – Вип 87. – с. 113–120.

*Рекомендовано до друку: проф. Шкрабцем Ф.П.*