

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАШИННО-ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ И АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАШИН В СИСТЕМЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведені особливості розробки електромашино-вентильних перетворювачів безконтактних синхронних і асинхронізованих машин, загальний аналіз результатів досліджень моделей перетворювачів в системі схемотехнічного моделювання Micro Cap, рекомендації по застосуванню системи моделювання при проведенні наукових досліджень і в учбовому процесі.

Приведены особенности разработки электромашино-вентильных преобразователей бесконтактных синхронных и асинхронизированных машин, общий анализ результатов исследований моделей преобразователей в системе схемотехнического моделирования Micro Cap, рекомендации по применению системы моделирования при проведении научных исследований и в учебном процессе.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений в решении проблемы энергосбережения является широкое внедрение асинхронизированных машин (АСМ), которые применяются как генераторы мощных и автономных электроэнергетических систем, регулируемый электропривод, генераторы-двигатели гидроаккумулирующих станций, устройства связи энергосистем.

В связи с требованиями повышению надежности электрических машин актуально внедрение бесконтактных АСМ (БАСМ). БАСМ разрабатываются на базе бесконтактных синхронных машин (БСМ).

В системах возбуждения БСМ и БАСМ применяются электромашино-вентильные преобразователи (ЭМВП), состоящие из электромашиных возбуждителей и вращающихся вентильных преобразователей.

При исследованиях ЭМВП применяются разные физические и математические модели. Применение разных моделей при решении одной и той же задачи существенно повышает вероятность получения корректных результатов, подтверждает правомерность принятых допущений, обосновывает выбор новых, простых и достаточно точных моделей и методов, адаптированных к решению сложных задач.

Одна из математических моделей, которые применяются на кафедре электромеханики НТУУ "Киевский политехнический институт" при исследованиях ЭМВП, разработана в системе схемотехнического моделирования Micro Cap (система МС) [4-12, 14, 15].

Цель работы: общий анализ результатов исследований моделей ЭМВП бесконтактных синхронных и асинхронизированных машин в системе схемотехнического моделирования Micro Cap, разработка рекомендаций по ее применению в научных исследованиях и учебном процессе.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА БЕСКОНТАКТНЫХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На рис. 1 показана структурная схема БСМ и БАСМ: 1 – основная электрическая машина (АМ); 2 – возбуждатель; 3 – управляющая машина (УМ); 4 – вращающийся вентильный преобразователь (ВП); 5 – блок сигналов управления (БСУ); 6 – датчик тока обмотки ротора АМ; 7 – автоматический регулятор возбуждения (АРВ); 8 – вращающаяся часть.

Качество формы напряжения и тока возбуждения АМ во многом зависит от типа возбуждателя, числа фаз и способа соединения роторных обмоток возбуждателя

(источника) и АМ, типа преобразователя и способа управления им, параметров защитных цепей вентилей, диапазона изменения скольжения АМ и других факторов. Рассмотрим некоторые результаты исследований ЭМВП в системы МС.

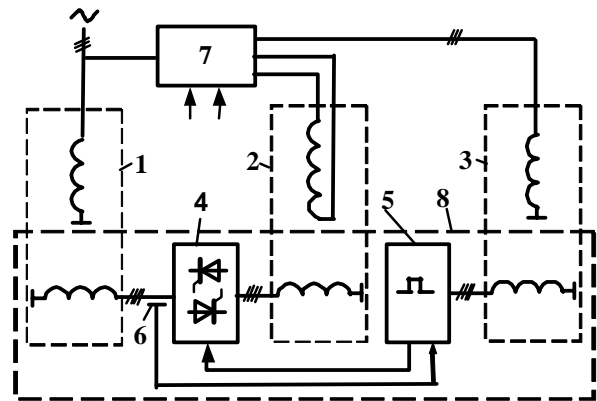


Рис. 1. Структурная схема БСМ и БАСМ

МНОГОФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

В БСМ наиболее применяются синхронные возбуждители (СВ). При сопоставительном анализе многофазных выпрямителей [9] приняты неизменными геометрия СВ, число полюсов, число зубцов ротора, шаг обмотки ротора, коэффициент заполнения паза медью, величина индукции воздушного зазора при синусоидальном законе ее распределения, число последовательно соединенных витков обмотки. ЭДС m -фазной обмотки $E_{im} = E_{i3} \cdot k_{pm} / k_{p3}$, где E_{i3} – ЭДС трехфазной обмотки, k_{pm} , k_{p3} – коэффициенты распределения обмоток. Величины активных и индуктивных сопротивлений обмоток прямо пропорциональны числу фаз источника.

На рис. 2, а показана электрическая схема модели m -фазного мостового выпрямителя. На схеме: $V_1 - V_m$ – источник ЭДС; $r_{i1} = r_{i2} = \dots = r_{im} = r_i$, $x_{i1} = x_{i2} = \dots = x_{im} = x_i$ – активные и индуктивные сопротивления источника; R_d , L_d – активное сопротивление и индуктивность нагрузки. Диоды $D_1 \div D_m$ и $D_{m+1} \div D_{m+m}$ шунтируются защитными RC-цепями.

ЭДС источника $e_{ij} = A_j \sin(\omega_j t + \lambda \cdot (m_j - 1))$, где A_j , $\omega_j = 2\pi f_j$ – амплитуда и частота ЭДС, $j = (1 \div m)$ – номер фазы источника, $\lambda = 2\pi/m$ – угол сдвига фазных ЭДС.

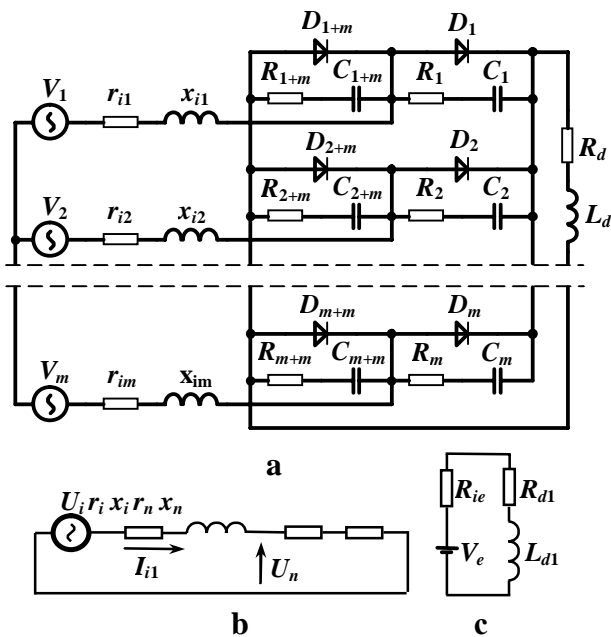


Рис. 2. Схема многофазного мостового выпрямителя

Расчет параметров защитных цепей вентилей выпрямителей БСМ проводится из условия ограничения перенапряжений во всех возможных режимах работы от холостого хода до короткого замыкания (КЗ) при форсировке тока возбуждения возбудителей.

В работе [2] отмечено, что проведение экспериментальных исследований с целью поиска максимальных перенапряжений вращающегося выпрямителя является нежелательным из-за возможности повреждения оборудования, большой трудоемкости и высокой стоимости. Вместе с тем эти величины могут быть определяющими как при выборе параметров защитных цепей вентилей, так и при выборе схемы преобразования.

В работе [5] исследуются коммутационные перенапряжения трехфазного мостового выпрямителя в системе МС. Параметры защитных цепей вентилей определяются по точке внешней характеристики на границе второго и третьего режимов работы. Именно в этой точке наибольшая величина амплитуды обратного тока вентиля, наибольшие коммутационные перенапряжения на вентилях при отсутствии защиты. Минимальная емкость

$$C_{f \min} = 4 \cdot \tau^2 / (9 \cdot L_i),$$

где τ – время восстановления запирающих свойств вентиля. Активное сопротивление, определяемое на границе аperiodического режима переходного процесса

$$R_f = \sqrt{3} \cdot \tau / C_{f \min}.$$

При этих параметрах защиты наибольшая величина напряжения нагрузки превышает амплитуду линейного напряжения источника примерно на 30%. При $C_f \approx 2C_{f \min}$ наибольшее напряжение на вентилях и нагрузке во всех режимах работы не превышает величины двойной амплитуды фазного напряжения источника.

В работе [11] показано: при одинаковом времени восстановления запирающих свойств вентилей в m -фазном мостовом выпрямителе $C_{fm} \approx 3C_{f3} / m$, где C_{f3} – емкость защитной цепи 3-фазного выпрямителя; в выпрямителе со средней точкой C_f в два раза больше, чем в мостовом выпрямителе.

В [14] приведены методы определения параметров многофазного выпрямителя на всем диапазоне внешней характеристики. Параметры выпрямителей определяют по результатам счета в установившихся или переходных режимах работы при интегрировании величин по времени. Для разгрузки оперативной памяти вычислительной машины ограничивается число величин, рассчитываемых в системе МС. В табл. 1 приведен алгоритм расчета выпрямителя по точкам установившегося режима: I_d , U_d – ток и напряжение нагрузки; P_{i1} , Q_{i1} – активная и реактивная мощности по первой гармонике источника; I_i – действующее значение полного тока источника; p_{ri} , p_D , p_{rf} – потери в источнике, на диодах и фильтрах; k_{us} – коэффициент искажения напряжения нагрузки.

Таблица 1

Алгоритм расчета многофазного выпрямителя

№	Обозн.	Един.	Формула
1	I_d	А	$\frac{1}{T} \int_0^T i_d dt$
2	U_d	В	$\frac{1}{T} \int_0^T u_d dt$
3	P_{i1}	Вт	$\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_n e_{ij} \cdot i_{ij} \right) dt$
4	Q_{i1}	ВА	$\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_n e_{irj} \cdot i_{ij} \right) dt$
5	I_i	А	$\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\frac{1}{m} \sum_m i_{ij}^2} dt$
6	p_{ri}	Вт	$\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_n i_{ij}^2 \right) \cdot r_i dt$
7	p_D	Вт	$\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_n u_{Dj} \cdot i_{Dj} \right) dt$
8	p_{rf}	Вт	$\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_n i_{fj}^2 \right) \cdot r_f dt$
9	k_{us}	-	$\sqrt{U_d^2 + \frac{1}{T} \int_0^T u_n^2 - U_d^2 \cdot dt} / U_d$

Обозначения в расчетных формулах: e_{ij} и i_{ij} – ЭДС и ток j -той фазы источника; $e_{irj} = A \cdot \sin(\omega t + \lambda \cdot (m-1) \cdot \pi/2) -$ ЭДС дополнительного источника питания, фазы которых смещены на угол 90° по отношению к ЭДС основного источника; u_{dj} – напряжения на диодах; i_{dj} , i_{fj} – токи через диоды и фильтры. По известным арифметическим выражениям рассчитываются полная мощность источника S_i , действующее значение первой гармоники фазного тока источника I_{i1} , коэффициент искажения тока источника λ , коэффициент связи между токами нагрузки и источника k_{i1} , коэффициент мощности по первой гармонике на входе выпрямителя $\cos \phi_B$ и другие величины.

Параметры и характеристики выпрямителей, рассчитанные в системе МС, позволяют построить его эквивалентные схемы замещения по цепям нагрузки и источника [8]. На рис. 2,б показана эквивалентная схема со стороны нагрузки выпрямителя, где V_e, R_{ie} – источник ЭДС и активное сопротивление эквивалентного источника, $R_{d1}=R_d, L_{d1}=L_d$ – параметры нагрузки. На рис. 2,с – эквивалентная схема со стороны источника, где U_n, I_{i1}, r_n, x_n – напряжение, ток и сопротивление эквивалентной нагрузки источника.

Расчет моделей ЭМВП с эквивалентными схемами замещения выпрямителей в переходных режимах существенно упрощаются. В десятки раз сокращается время компьютерного счета. Временные диаграммы токов, построенные по результатам расчетов моделей ЭМВП с электрическими и эквивалентными схемами, практически совпадают [8].

При сопоставительном анализе многофазных выпрямителей применяется система относительных единиц нагрузки трехфазного мостового выпрямителя (о.е.), в которой базовыми величинами приняты напряжение холостого хода U_{d0} и ток КЗ I_{dk} выпрямителя:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} A_i; I_{dk} = \frac{A_i}{z_i}; U_{d*} = \frac{U_d}{U_{d0}}; I_{d*} = \frac{I_d}{I_{dk}},$$

где A_i и z_i – амплитуда фазной ЭДС и полное сопротивление трехфазного источника.

В работе [14] показано: при заданных величинах I_{d*} и m относительная величина активного сопротивления источника $k_r=r_i/x_i$ практически не влияет на коэффициент связи между токами нагрузки и источника $k_{i1}=I_d/I_{i1}$; при заданной величине I_{d*} с изменением числа фаз ($m=12\div 48$) практически неизменный коэффициент искажения тока источника $\lambda=I_{i1}/I_i$. Полученные закономерности изменений величин λ, k_{i1} и $\cos\phi_B$ позволяют совершенствовать методику проектирования многофазных СВ, методику расчета многофазных вентиляльных генераторов в динамических режимах работы по эквивалентным схемам. В качестве примера приведен сопоставительный анализ многофазных выпрямителей при базовых параметрах источника трехфазного выпрямителя: $A_i = 416$ В; частота $f_i = 50$ Гц; $z_i=15$ Ом; $k_r = 0.25$. В выпрямителях применены диоды типа MR2510 D.

На рис. 3 показана распечатка результатов расчета 12-фазного выпрямителя с монитора компьютера.

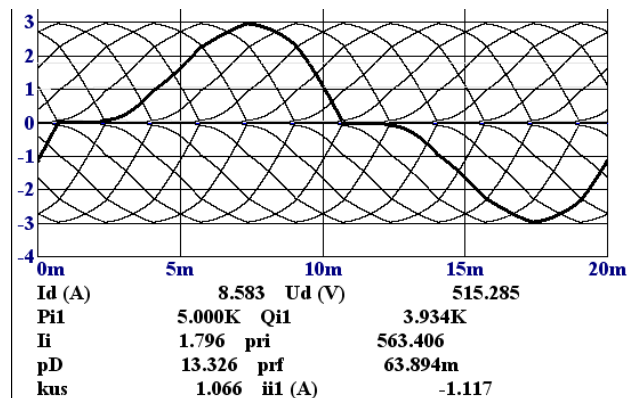


Рис. 3. Расчетные параметры 12-фазного мостового выпрямителя

Параметры выпрямителя: $A_i = 430,7$ В; $x_i = 58,2$ Ом; $r_i = 14,5$ Ом; $C_f = 0.25$ мкФ; $R_f = 62$ кОм; $R_d = 60,5$ Ом.

На рис. 4 показаны коэффициенты увеличения расчетных мощностей ЭМВП с неявнополусными СВ и мостовыми выпрямителями $k_s = S_{pm}/S_{p3}$ в зависимости от тока нагрузки в номинальном режиме I_{dN*} при $k_r=0.5$. Число фаз СВ: 1 – $m=48$; 2 – $m=12$; 3 – $m=4$.

Учитывая уравнение взаимосвязи между параметрами выпрямителя в номинальном режиме [14]

$$M_z = \frac{z_{iN}}{R_{dN}} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{I_{dN*}}{U_{dN*}}$$

и зависимости на рис. 4, можно сделать выводы: расчетная мощность ЭМВП практически не изменяется при числе фаз $m=12\div 48$; при малой величине относительного сопротивления источника (z_{iN}/R_{dN}) расчетная мощность четырехфазного ЭМВП увеличивается на 5÷10 % по сравнению с трехфазным ЭМВП.

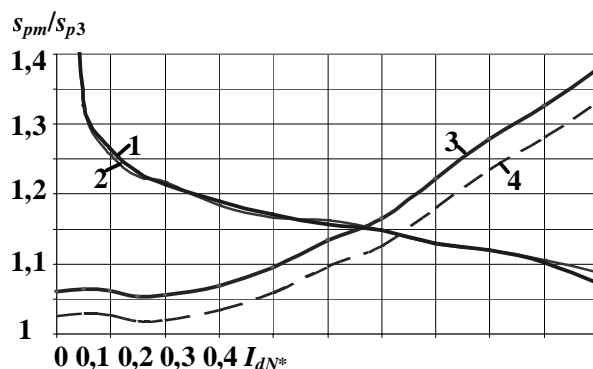


Рис. 4. Коэффициенты увеличения расчетных мощностей многофазных ЭМВП $k_s = S_{pm}/S_{p3}$ в зависимости от тока нагрузки I_{dN*} при $k_r=0.5$

Эквивалентные схемы замещения применяются при анализе режимов работы трехфазно-однофазных непосредственных преобразователей частоты с естественной коммутацией и модулированным входным напряжением при разных способах управления [8].

Сопоставим работу диодного и реверсивного тиристорного выпрямителей (ТВ) БСМ в асинхронном режиме работы [7].

Параметры модели. Число пар полюсов синхронной машины $p=2$, скольжение $s=0,08$. В СВ $p_B=12$. Применены диоды MR2510 D, тиристоры B25RIA120. В ТВ применен комбинированный способ управления. Совместное управление встречно включенными тиристорами применяется при токах нагрузки меньших тока уставки, $i_u=0.1$ А. Угол управления тиристорами упреждающий, $\alpha_u=-10^\circ$. В обеих моделях $A_i=200$ В, $f_i=276$ Гц, $z_i=16$ Ом, $k_r=0.25$, $R_d=40$ Ом, $L_d=2$ Гн, амплитуда ЭДС нагрузки $A_n=780$ В. Защита вентилей: $C_{FD}=6.7 \cdot 10^{-9}$ Ф, $R_{FD}=4.7$ кОм; $C_{FT}=1.2 \cdot 10^{-9}$ Ф, $R_{FT}=14$ кОм.

На рис. 5 показаны напряжения и токи диодного (а) и реверсивного тиристорного (б) выпрямителей. Принятые обозначения: u_n, i_n – напряжение и ток нагрузки; s_{up}, s_{uo} – сигналы управления тиристорами прямого и обратного блоков тиристоров. Напряжение и ток нагрузки приведены в системе о.е. выпрямителя. Наибольшее напряжение на обмотке возбуждения синхронной машины достигает суммы амплитуд ЭДС A_n и A_i . В реверсивном тиристорном преобразователе внешние перенапряжения отсутствуют [7].

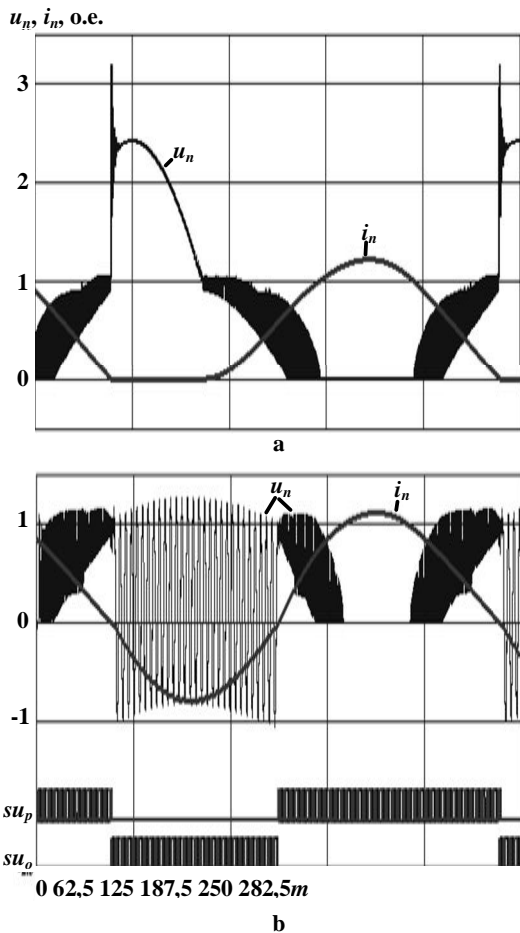


Рис. 5. Напряжения и токи диодного (а) и тиристорного (б) выпрямителей при асинхронном режиме БСМ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ БЕСКОНТАКТНЫХ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАШИН

Одно из важных требований, которые предъявляются к системам возбуждения БАСМ, – простота системы управления вращающимся преобразователем. Простотой системы управления отличаются трехфазно-трехфазные диодно-транзисторные НПЧИ – НПЧИ с ограниченным числом полностью управляемых ключей [3]. Однако, несмотря на большое внимание, уделяемое в литературе к таким НПЧИ, они не нашли практического применения. Это связано, прежде всего, с особенностями работы диодов, для восстановления запирающих свойств которых требуется определенное время. Исследования, проведенные в системе МС [6], показали: при выключении диодных мостов (с обычными защитными RC-цепями) управляемыми ключами наблюдается многократное увеличение коммутационных перенапряжений. Коммутационные перенапряжения можно снизить усилением фильтров. Однако потери в фильтрах могут достигнуть величины 20 % и выше от передаваемой через преобразователь мощности.

Системы возбуждения БАСМ с низкими частотами скольжения разрабатываются на базе каскадных возбуждателей и непосредственных преобразователей частоты с естественной коммутацией и модулированным напряжением (НПЧЕМ) [10, 12].

Разработка систем возбуждения БАСМ на базе НПЧЕМ во многом определяется возможностью построения простых и надежных систем управления

вращающимися тиристорами, степенью адаптивности систем управления к конструкции основной машины.

На рис. 6 показана принципиальная электрическая схема трехфазно-трехфазного ЭМВП БАСМ на базе каскадного возбуждателя и НПЧЕМ с нулевыми схемами преобразования: 1, 2 – возбуждители; 3 – ТП; 4 – АМ; 5 – вращающаяся часть.

Два возбуждателя имеют одинаковое число пар полюсов рв. На статорные обмотки возбуждателей подается напряжение частоты скольжения. Направление вращения полей взаимопротивоположные. На роторе каждого возбуждателя расположены три трехфазные группы обмоток. Обмотки двух возбуждателей соединены последовательно. На вход трех фазных ТП подаются биения напряжений. Частота биений равна частоте скольжения, частота заполнения пропорциональна скорости вращения вала. Применено комбинированное потенциальное соединение роторных обмоток возбуждателя. В одну звезду соединяются обмотки с одинаковой фазой частоты заполнения.

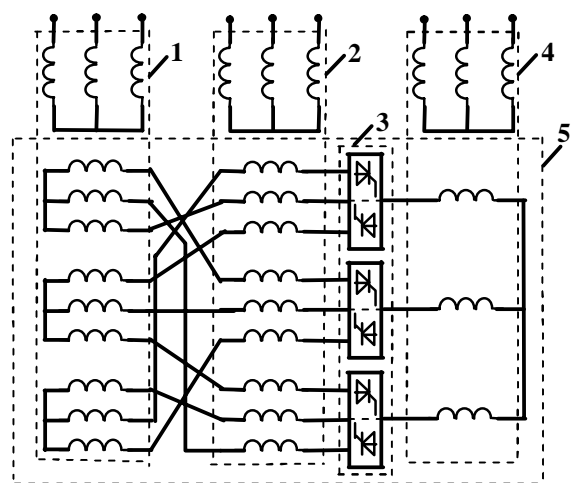


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема трехфазно-трехфазного ЭМВП БАСМ

Трехфазно-трехфазные ЭМВП на базе каскадных возбуждателей и НПЧЕМ с нулевыми схемами преобразования работают устойчиво в системах возбуждения БАСМ при комбинированном способе управления встречно включенными тиристорами.

Мостовые схемы преобразования могут быть применены в НПЧЕМ при комбинированном потенциальном разделении обмоток источника и разделении нагрузки на две трехфазные группы. Однако мостовые схемы преобразования неприемлемы в трехфазно-трехфазных НПЧЕМ БАСМ в связи с существенным искажением токов в двух трехфазных группах обмоток возбуждения АМ, приводящим к нарушению работоспособности системы возбуждения в целом [12]. В БАСМ могут быть применены НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования только при выполнении условия: роторные обмотки возбуждателя должны иметь четное число фаз на одну (трехфазную) фазу обмотки возбуждения АМ [12].

В работе [15] показано, что при соединении якорных обмоток возбуждателя в одну точку: существенно ухудшается качество формы напряжения и тока нагрузки преобразователя; в зоне совместного управления тиристорами НПЧЕМ возможны КЗ якорных обмоток возбуждателя, которые могут повредить преобразователь.

Ошибочными являются выводы работы [13] о работоспособность БАСГ при соединении якорных обмоток каскадного возбудителя в одну точку. Применение небоснованных упрощений при исследованиях математических моделей БАСМ, односторонний подход к исследованию одного (из многих) режимов работы системы, некорректность в выборе ее параметров приводит к ошибочным выводам, а, следовательно, – выбору ложного пути дальнейших исследований.

Наилучшее качество формы выходного напряжения и тока НПЧЕМ обеспечивается при применении многофазных возбудителей.

Если на статорные обмотки возбудителей подается напряжение частоты скольжения, в роторных обмотках наводятся ЭДС с частотами:

$$f_{21} = p_B \cdot f \cdot (1-s) / p - f_s;$$

$$f_{22} = p_B \cdot f \cdot (1-s) / p + f_s,$$

Фазные ЭДС двух источников питания:

$$e_{1m_j} = A_{i1} \cdot \sin(\omega_1 t + (m_j - 1) \cdot \lambda_B);$$

$$e_{2m_j} = A_{i2} \cdot \sin(\omega_2 t + (m_j - 1) \cdot \lambda_B),$$

где $A_{i1} = A_{i2} = A_i / 2$ – амплитуды ЭДС, $\omega_1 = 2\pi f_{21}$, $\omega_2 = 2\pi f_{22}$, $\lambda_B = 2\pi / m_B$ – угол сдвига между ЭДС смежных фаз, m_B – число фаз источника питания. Вторым нижним индексом $m_j = (1 \div m_B)$ обозначены номера фаз.

На вход тиристорного преобразователя фазы A (ТП_A) подаются m_i биений напряжений, полученные при последовательном соединении одноименных m_i фаз двух источников. При этом в каждом источнике образуется m_i -фазная система ЭДС со сдвигом фаз на угол $\lambda_i = 2\pi / m_i$.

$$e_{1A} = e_{1.1} + e_{2.1} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t) \cdot \cos(\omega_\delta t);$$

$$e_{2A} = e_{1.(1+3)} + e_{2.(1+3)} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t + \lambda_i) \cdot \cos(\omega_\delta t);$$

.....

$$e_{m_i A} = e_{1.(1+3(m_i-1))} + e_{2.(1+3(m_i-1))} =$$

$$= A_i \cdot \sin(\omega_3 t + (m_i - 1) \cdot \lambda_i) \cdot \cos(\omega_\delta t),$$

где частота заполнения $\omega_3 = 2\pi f_3$, $f_3 = |f_{21} + f_{22}| / 2$, частота бие-

ний напряжений $\omega_\delta = 2\pi f_\delta$, $f_\delta = |f_{21} - f_{22}| / 2 = f_s$. При составлении схем соединений роторных обмоток возбудителей, подключенных к ТП_B (ТП_C) номера фаз первого источника увеличены (уменьшены) на величину m_i , а номера фаз второго источника уменьшены (увеличены) на величину m_i по сравнению с номерами фаз источников ТП_A.

На входы ТП трех фаз подаются три m_i -фазные системы напряжений частоты заполнения с одинаковыми сдвигами фаз, промодулированные частотой биений. Частота нагрузки НПЧЕМ равна частоте биений напряжений.

В БАСМ с малым диапазоном изменения скольжения при $\varphi_n < 30^\circ$ возможно применение диодно-тиристорного НПЧЕМ. В таких БАСМ отсутствуют устройства бесконтактной передачи сигналов управления на вращающуюся часть, формирование амплитуды и фазы тока возбуждения АМ проводится по цепи возбуждения возбудителя.

На рис. 7 показана электрическая схема двенадцатиоднофазно-трехфазного диодно-тиристорного НПЧЕМ БАСМ с мостовыми схемами преобразования. На схеме указаны номера роторных обмоток двух возбудителей (1-1÷1-12 и 2-1÷2-12). На входы ТП подаются биения напряжений:

$$e_{1A} = e_{1.1} + e_{2.1} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t) \cdot \cos(\omega_\delta t);$$

$$e_{2A} = e_{1.4} + e_{2.4} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t + 90) \cdot \cos(\omega_\delta t);$$

$$e_{3A} = e_{1.7} + e_{2.7} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t + 180) \cdot \cos(\omega_\delta t);$$

$$e_{4A} = e_{1.10} + e_{2.10} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t + 270) \cdot \cos(\omega_\delta t);$$

$$e_{1B} = e_{1.5} + e_{2.9} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t) \cdot \cos(\omega_\delta t - 120);$$

$$e_{2B} = e_{1.8} + e_{2.12} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t + 90) \cdot \cos(\omega_\delta t - 120);$$

$$e_{3B} = e_{1.11} + e_{2.3} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t + 180) \cdot \cos(\omega_\delta t - 120);$$

$$e_{4B} = e_{1.2} + e_{2.6} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t + 270) \cdot \cos(\omega_\delta t - 120);$$

$$e_{1C} = e_{1.9} + e_{2.5} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t) \cdot \cos(\omega_\delta t + 120);$$

$$e_{2C} = e_{1.12} + e_{2.8} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t + 90) \cdot \cos(\omega_\delta t + 120);$$

$$e_{3C} = e_{1.3} + e_{2.11} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t + 180) \cdot \cos(\omega_\delta t + 120);$$

$$e_{4C} = e_{1.6} + e_{2.2} = A_i \cdot \sin(\omega_3 t + 270) \cdot \cos(\omega_\delta t + 120).$$

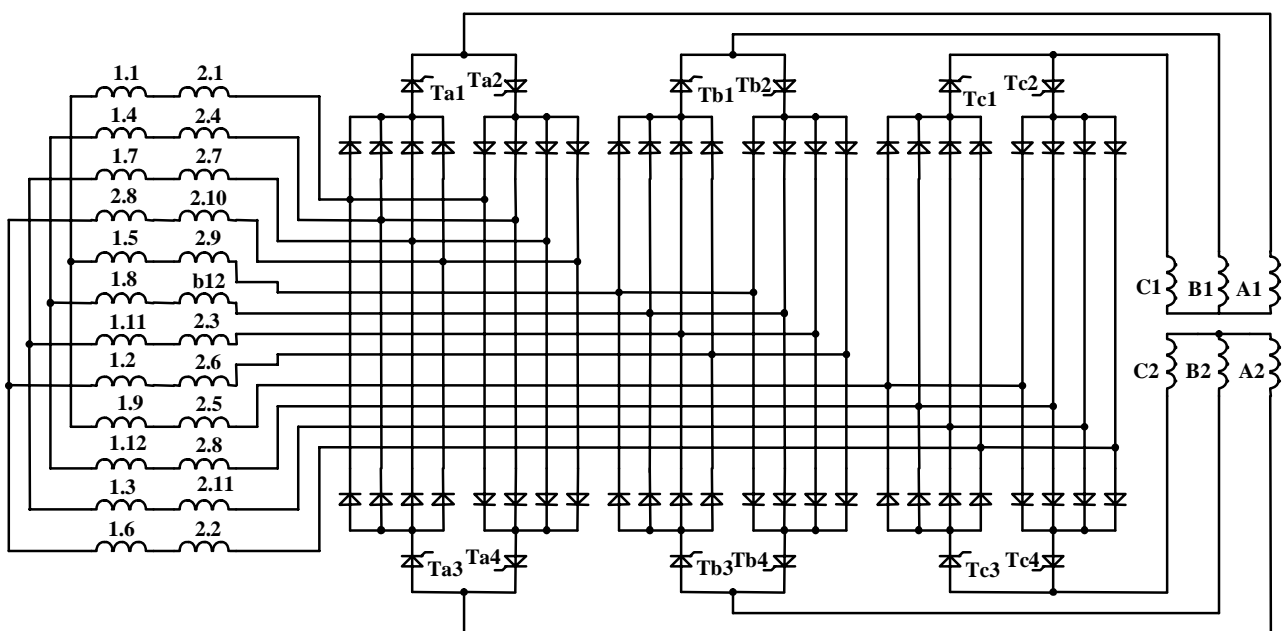


Рис. 7. Двенадцатиоднофазно-трехфазный диодно-тиристорный НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования

Схема преобразования четырехпульсная. Фазная зона обмотки $\alpha = 30^\circ$. Коэффициент расчетных мощностей ЭМВП $k = S_{pm} / S_{p3}$ в зависимости от тока нагрузки I_{d*} при $k_r=0.5$ показан кривой 4 на рис. 4.

Исследуем модель НПЧЕМ при числе фаз источника $m=48$. Параметры источника питания: амплитуда фазных ЭДС $E_{m1}=E_{m2}=60$ В; частота первого источника $f_1=102$ Гц, частота второго источника $f_2=98$ Гц; полное сопротивление $z_i=3.85$ Ом; относительная величина активного сопротивления $k_r=z_i/x_i=0.21$. Коэффициент взаимоиндуктивной связи одноименных фаз двух трехфазных групп нагрузки $C=1$. Сопротивление фазы одной трехфазной группы нагрузки $z_n=10.15$ Ом; $\cos\phi_n=0.985$. Применены диоды MR2510, тиристоры B25RIA120.

На рис. 8 показаны диаграммы напряжений и токов диодно-тиристорных преобразователей:

а) e_{iA} – биения напряжений источника питания диодно-тиристорного преобразователя фазы А;

б) u_{A1}, u_{B1}, u_{C1} – фазные напряжения первой трехфазной группы нагрузки;

в) $i_{A1}, i_{B1}, i_{C1}, i_{A2}, i_{B2}, i_{C2}, i_A, i_B, i_C$ – токи двух трехфазных групп нагрузки и результирующие токи нагрузки, где $i_A=(i_{A1}+i_{A2})/2$, $i_B=(i_{B1}+i_{B2})/2$, $i_C=(i_{C1}+i_{C2})/2$; su_p, su_o – сигналы управления тиристорами трех фазных преобразователей;

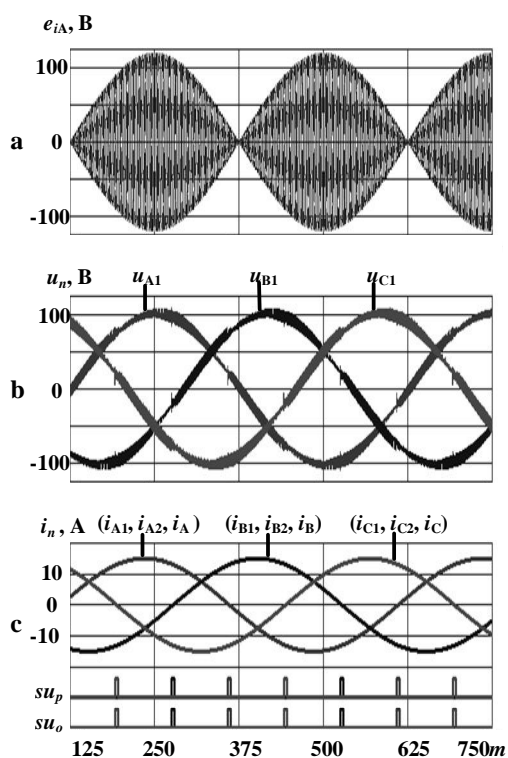


Рис. 8. Напряжения и токи модели 48-фазного диодно-тиристорного мостового НПЧЕМ БАСМ

Как видно из диаграмм, диодно-тиристорный НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования отличается высоким качеством тока нагрузки.

СИСТЕМА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Система МС применяется при изучении курсов "Машины двойного питания", "Основы электромехатроники", "Бесконтактные регулируемые электрические машины", при курсовом и дипломном проек-

тировании. На лабораторных работах (практических занятиях) закрепляются знания по следующим темам.

1. Система схемотехнического моделирования, общая характеристика.

2. Вентильные генераторы БСМ и ветроэнергетических установок.

3. Защита преобразователей БСМ от коммутационных перенапряжений.

4. Определение основных соотношения трехфазных и многофазных выпрямителей БСМ.

5. Расчет переходных процессов выпрямителей по полным электрическим и эквивалентным схемам.

6. Работа диодных и тиристорных преобразователей при асинхронном режиме БСМ.

7. Формирование кривых выходного напряжения в непосредственных преобразователях частоты (НПЧ) с искусственной (НПЧИ) и естественной (НПЧЕ) коммутацией.

8. Трехфазно-трехфазные НПЧИ с ограниченным числом полностью управляемых вентилях.

9. Трехфазно-однофазные НПЧЕ с модулированным напряжением (НПЧЕМ) при разных способах управления встречно включенными тиристорами.

10. Электромашинно-вентильные преобразователи на базе сельсинов.

11. Трехфазно-трехфазные и многофазно-трехфазные НПЧЕМ в системах возбуждения БАСМ.

12. Бесконтактные пусковые устройства БАСМ.

ВЫВОДЫ

1. Применение системы схемотехнического моделирования Micro Cap (системы МС) при исследовании моделей ЭМВП бесконтактных синхронных и асинхронизированных машин (БСМ и БАСМ) позволяет выявить неработоспособные модели из-за коммутационных перенапряжений, режимов короткого замыкания, повышенных расчетных мощностей возбуждителей, повышенных потерь на элементах схемы.

2. Результаты исследований моделей ЭМВП в системе МС используются при разработке математических моделей совместной работы БСМ и БАСМ в автономных и крупных энергетических системах.

3. Сопоставительный анализ результатов исследований разных математических и физических моделей способствует разработке БСМ и БАСМ с учетом повышенных требований по технико-экономическим показателям, надежности, простоте систем управления и других факторов.

4. В учебном процессе целесообразно проводить сопоставительный анализ результатов исследований моделей ЭМВП в системе МС и лабораторных м БСМ и БАСМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиновский А.М., Дубчак Е.М. Способ комбинированного управления тиристорным преобразователем частоты. А.с. СССР №1339821. Оpubл. в БИ, №35, 1987.
2. Глебов И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. – Ленинград: Наука, 1988. – 322 с.
3. Савельев Ю.Е., Быков С.В., Зозулин Ю.В., Козлов Ю.А. Устройство для возбуждения асинхронизированной синхронной машины. А.с. СССР № 1534744 5Н02Р 9/14. Оpubл. в БИ, №1, 1990.
4. Развиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7.– М.: – Горячая линия – Телеком, 2003. – 368 с.

5. Галиновский А.М. Методика расчета защитных цепей вентилей выпрямителя / А.М. Галиновский, Е.А. Ленская, Эрхард Айхофер // *Технічна електродинаміка*. – 2005. – № 4. – С. 43-50.
6. Галиновский А.М., Исследование моделей электромашино-вентильных преобразователей с ограниченным числом полностью управляемых вентилей / А.М. Галиновский, Е.А. Ленская, Эрхард Айхофер // *Електротехніка і електро-механіка*. – 2006. – № 5. – С. 22-29.
7. Галиновский А.М. Коммутационные перенапряжения вращающегося преобразователя бесконтактной синхронной машины в асинхронном режиме работы / А.М. Галиновский, Е.А. Ленская, Эрхард Айхофер // *Електротехніка і електро-механіка*. – 2006. – № 6. – С. 9-15.
8. Галиновский А.М. Электрические и эквивалентные схемы, исследование работы трехфазно-однофазных электромашино-вентильных преобразователей с модулированным напряжением / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак, С.В. Коваленко, Е.А. Ленская // *Вісник НТУ "ХПІ"*. – 2008. – № 45. – С. 17-35.
9. Галиновский А.М. Модели многофазных вентильных генераторов бесконтактных синхронных машин и ветроэнергетических установок / А.М. Галиновский, В.А. Бовер, Е.А. Ленская // Тематический выпуск "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика" научно-технического журнала "Электроинформ" – Львов: ЕКОинформ. – 2009. – С. 315-320.
10. Галиновский А.М. Электромашино-вентильные преобразователи машин двойного питания (ч.1) / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак, Е.А. Ленская // *Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб.* – 2010. – № 84. – С. 218-227.
11. Галиновский А.М. Коммутационные перенапряжения в многофазных преобразователях / А.М. Галиновский, Е.А. Ленская, В.И. Сенько, Н.Г. Анпилогов // *Електротехнічні та комп'ютерні системи. Одеський НПП, Київ, "Техніка"*. – 2011. – № 03 (79). – С. 319-322.
12. Сенько В.И. Многофазно-трехфазные мостовые преобразователи частоты бесконтактных асинхронизированных машин / В.И. Сенько, А.М. Галиновский, Е.А. Ленская // *Вісник Кременчугського держ. університету ім. Михайла Остроградського*. – 2010. – № 4 (63), ч.3. – С. 69-73.
13. Василів К.М. Аналіз процесів автономного генератора з безконтактним каскадним трифазним модульованим збуджувачем за схемою в одну зірку і спільним з'єднанням фаз модулятора під час роботи на активно-індуктивне навантаження // *Вісник НТУ "ХПІ"*. – 2012. – №49. – С.27-37.
14. Галиновский А.М. Параметры и характеристики полупроводниковых выпрямителей вентильных генераторов // *Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб.* – 2012. – Вип. 88. – С. 47-55.
15. Галиновский А.М. Особенности работы вращающихся преобразователей бесконтактных асинхронизированных машин с разными схемами соединения якорных обмоток возбудителей // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Вип. 2 / 2013 (22). Ч.2.* – С. 72-78.

Bibliography (transliterated): 1. Galinovskij A.M., Dubchak E.M. Sposob kombinirovannogo upravleniya tiristornym preobrazovatelem chastoty. A.s. SSSR №1339821. Opubl. v BI, №35, 1987. 2. Glebov I.A. Nauchnye osnovy proektirovaniya sistem vzbuzhdeniya moschnyh sinhronnyh mashin. - Leningrad: Nauka, 1988. - 322 s. 3. Savel'ev Yu.E., Bykov S.V., Zozulin Yu.V., Kozlov Yu.A. Ustrojstvo dlya vzbuzhdeniya asinhronizirovannoj sinhronnoj mashiny. A.s. SSSR № 1534744 5H02P 9/14. Opubl. v BI, №1, 1990. 4. Razevig V.D. Shemotekhnicheskoe mod

elirovanie s pomosh'yu Micro-Cap 7.- M.: - Goryachaya liniya - Telekom, 2003. - 368 s. 5. Galinovskij A.M. Metodika rascheta zashchitnyh cepej ventil'ej vypryamatelya / A.M. Galinovskij, E.A. Lenskaya, 'Erhard Ajhofer // *Tekhnichna elektrodinamika*. - 2005. - № 4. - S. 43-50. 6. Galinovskij A.M., Issledovanie modelej `elektromashinno-ventil'nyh preobrazovatelej s ograni-chennym chislom polnost'yu upravlyaemyh ventil'ej / A.M. Galinovskij, E.A. Lenskaya, 'Erhard Ajhofer // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2006. - № 5. - S. 22-29. 7. Galinovskij A.M. Kommutacionnye perenapryazheniya vraschayuschegosya preobrazovatelya beskontaktnoj sinhronnoj mashiny v asinhronnom rezhime raboty / A.M. Galinovskij, E.A. Lenskaya, 'Erhard Ajhofer // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2006. - № 6. - S. 9-15. 8. Galinovskij A.M. `Elektricheskie i `ekvivalentnye shemy, issledovanie raboty trehfazno-odnofaznyh `elektromashinno-ventil'nyh preobrazovatelej s modulirovannym napryazheniem / A.M. Galinovskij, E.M. Dubchak, S.V. Kovalenko, E.A. Lenskaya // *Visnik NTU "HPI"*. - 2008. - № 45. - S. 17-35. 9. Galinovskij A.M. Modeli mnogofaznyh ventil'nyh generatorov beskontaktnykh sinhronnykh mashin i vetro`energeticheskikh ustanovok / A.M. Galinovskij, V.A. Bober, E.A. Lenskaya // *Tematicheskij vypusk "Problemy avtomatizirovannogo `elektroprivoda. Teoriya i praktika" nauchno-tekhnicheskogo zhurnala "Elektroinform"* - L'vov: EKOinform. - 2009. - S. 315-320. 10. Galinovskij A.M. `Elektromashinno-ventil'nye preobrazovately mashin dvojnogo pitaniya (ch.1) / A.M. Galinovskij, E.M. Dubchak, E.A. Lenskaya // *Girnichna elektromehanika ta avtomatika: nauk.-tehn. zb.* - 2010. - № 84. - S. 218-227. 11. Galinovskij A.M. Kommutacionnye perenapryazheniya v mnogofaznykh preobrazovatelyah / A.M. Galinovskij, E.A. Lenskaya, V.I. Sen'ko, N.G. Anpilogov // *Elektrotehnichni ta komp'yuterni sistemi. Odes'kij NPI, Kiiv, "Tekhnika"*. - 2011. - № 03 (79). - S.319-322. 12. Sen'ko V.I. Mnogofazno-trehfaznye mostovye preobrazovately chastoty beskontaktnykh asinhronizirovannykh mashin / V.I. Sen'ko, A.M. Galinovskij, E.A. Lenskaya // *Visnik Kremenchuc'kogo derzh. universitetu im. Mihajla Ostrogradsk'ogo*. - 2010. - № 4 (63), ch.3. - S.69-73. 13. Vasiliv K.M. Analiz procesiv avtonomnogo generatora z bezkontaktnim kaskadnim trifaznim modul'ovanim zbudzhuвачem za shemoyu v odnu zirku i spil'nim z'ednanniam faz modulyatora pid час roboti na aktivno-induktivne navantazheniya // *Visnik NTU "HPI"*. - 2012. - № 49. - S. 27-37. 14. Galinovskij A.M. Parametry i karakteristiki poluprovodnikovoy vypryamately ventil'nykh generatorov // *Girnichna elektromehanika ta avtomatika: nauk.-tehn. zb.* - 2012. - Vip. 88. - S. 47-55. 15. Galinovskij A.M. Osobennosti raboty vraschayuschisya preobrazovatelej beskontaktnykh asinhronizirovannykh mashin s raznymi shemami soedineniya yakornykh obmotok vzbuditelej // *Elektromehanicni i energozberigayuchi sistemi. Vip. 2 / 2013 (22). Ch.2.* - S. 72-78.

Поступила 16.06.2013

Галиновский Александр Михайлович, к.т.н, доц.,
 Национальный технический университет Украины
 "Киевский политехнический институт"
 кафедра электромеханики
 03056, Киев, просп. Победы, 37
 тел. (044) 258 01 54, e-mail: alga 40@mail.ru

Galynovskiy O.M.

Research into valve-engine transducers of brushless synchronous and asynchronous machines in a circuit simulation system.

Designing features for valve-engine transducers of brushless synchronous and asynchronous machines are described. Global analysis of research results on the transducer models in a MicroCap circuit simulation system is made, recommendations on the simulation system application in both scientific research and educational process given.

Key words – asynchronous machines, transducer, exciter, armature winding, Micro Cap circuit simulation system.