

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СХЕМАХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ПИТАНИЕМ ОТ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Преобразовательная техника представляет собой большой класс науки об электричестве, который называется *электротехникой*. Развитие электротехники всегда концентрировалось и продолжает концентрироваться вокруг вопроса преобразования электрической энергии, которое идет по известным четырем направлениям: энергии переменного тока в энергию постоянного тока и обратно, а также энергии переменного тока в энергию переменного тока, либо энергии постоянного тока в энергию постоянного тока, но с другими выходными параметрами. Наиболее широкомасштабной является задача электромеханического преобразования электроэнергии, которая успешно решается благодаря применению преобразователей в составе электропривода (ЭП) постоянного или переменного тока.

Широко известно также, что все первичные источники электрической энергии подразделяются на два типа: 1) с малым внутренним сопротивлением и достаточно жесткими нагрузочными характеристиками – источники напряжения (ИН); 2) с высоким внутренним сопротивлением и сравнительно мягкими характеристиками – источники тока (ИТ). Исходя из традиционного принципа построения систем электроснабжения, при котором с целью увеличения количества потребителей последние подключают по параллельной схеме по отношению к первичному источнику (генератору) электрической энергии, был принят путь развития всех электротехнических направлений, базирующийся на постулате, что генератор электрической энергии работает в режиме ИН. В настоящее время громадное количество технических разработок в области электромеханических, а также химических генераторов и источников электрической энергии, работающих в режиме ИН, основательно закрепили за собой указанное направление, особенно, для преобразователей питающих ЭП.

Статья преследует цель информирования читателя о принципиально новых возможностях, которыми может обладать ЭП и преобразователь с питанием от ИТ. Авторы не исключают, что некоторые положения статьи могут быть известны научным работникам, в основном, старшего поколения, так как начиная, примерно, с середины прошлого века, ученые уже предпринимали, к сожалению, не очень настойчивые попытки частично переориентировать развитие преобразовательной техники и ЭП в сторону «токовых» систем питания [1 ÷ 5].

Для четкого понимания главных особенностей принципа действия преобразователя при питании от ИТ по сравнению с традиционным его питанием от ИН, рассмотрим работу однофазной мостовой схемы выпрямления на якорь электрической машины при наличии на входе схемы стабилизированных по действующему значению синусоидальных напряжения (рис. 1) и тока (рис. 2). На указанных рисунках приведены также временные диаграммы, полученные в результате компьютерного моделирования работы схем выпрямления на заторможенный якорь машины постоянного тока типа Д-32, 12 кВт, 770 об/мин, 220 В, 51 А. Для ограничения тока якоря на уровне двукратной перегрузочной способности в схеме с ИН (рис. 1), на вход подается пониженное значение переменного напряжения.

Обе схемы работают на одинаковую активно-индуктивную нагрузку и, как свидетельствуют временные диаграммы, работа схемы от ИТ принципиально отличается от работы её, если на входе будет присутствовать ИН. В схеме с ИТ из-за наличия индуктивности нагрузки, вследствие наводимой в ней ЭДС самоиндукции, выпрямленный ток  $i_d$  при установившемся режиме никогда не падает до нуля. Ток же на входе схемы выпрямления изменяется синусоидально и в отдельные моменты времени становится весьма малым (когда он меняет своё направление). По этой причине на некоторых интервалах периода соблюдается следующее неравенство

$$i_d > i_L \quad (1)$$

При наличии условия (1), вентили схемы рис. 2 не могут нормально коммутироваться, как это происходит в схеме рис. 1, когда два вентили, например,  $VD1$  и  $VD2$  проводят прямой ток, а к двум другим  $VD3$  и  $VD4$  приложено обратное напряжение. В случае с ИТ возникает режим отсутствия, так называемой, коммутирующей ЭДС, под действием которой в полупроводниковой структуре диода создается общеизвестный  $n-p$  переход, обладающий вентильными свойствами. Отсутствие коммутирующей ЭДС указывает на то, что все вентили схемы могут проводить ток, что и наблюдается на интервалах периода: от 0,205 до 0,213 с и от 0,215 до 0,223 с. Следовательно, угол проводимости тока каждым вентилям в схеме выпрямления с синусоидальным входным током приближается к классическому его значению равному  $2\pi$ , свойственному только для ИТ, согласно известной аксиоме о непрерывности тока, потребляемого от ИТ.

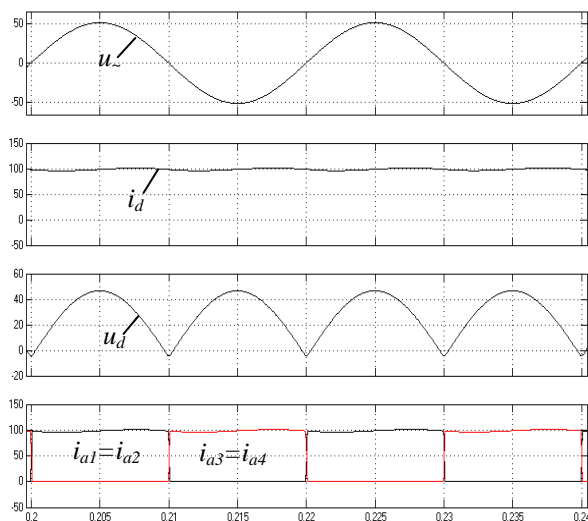
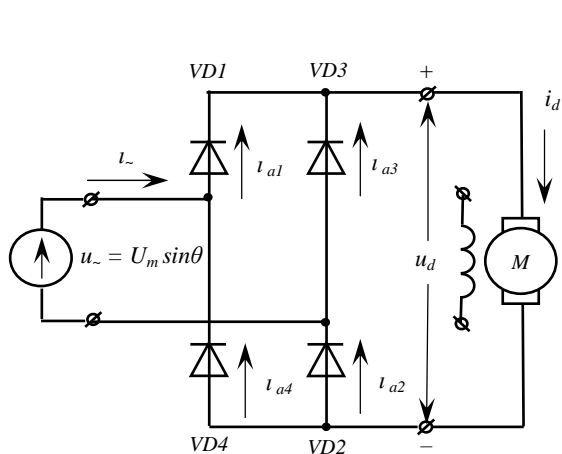


Рис. 1 Схема ЭП и временные диаграммы синусоидального входного напряжения  $u_{\sim}$ , выпрямленных тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$ , а также токов вентилях при работе на заторможенный якорь

На интервалах, указанных выше, выход источника энергии и вход нагрузки оказываются замкнутыми коротко вентильной схемой, а поэтому отсутствует возможность циркуляции реактивной энергии между нагрузкой и источником, которая наблюдается на каждом полупериоде в схеме с ИН (рис. 1). Это исключает режим разрывного тока якоря машины и уменьшает его пульсации, в результате чего улучшается коммутация тока коллекторно-щеточным узлом машины, а также стабилизируется режим работы питающей сети, особенно, при мощности машины соизмеримой с мощностью сети. Из сказанного выше можно сделать следующие выводы:

- при питании ЭП от источника энергии, работающего в режиме ИТ, не требуется сглаживающий реактор в якорной цепи машины;
- основной энергетический показатель ЭП (коэффициент сдвига –  $\cos \varphi$ ), практически, равен единице и при активно-индуктивной нагрузке не зависит от её индуктивной реакции, которую ИТ всегда стремится «подавить» за счет форсированного повышения напряжения на входе схемы (см. интервалы на рис. 2: от 0,203 до 0,205 с и от 0,213 до 0,215 с).

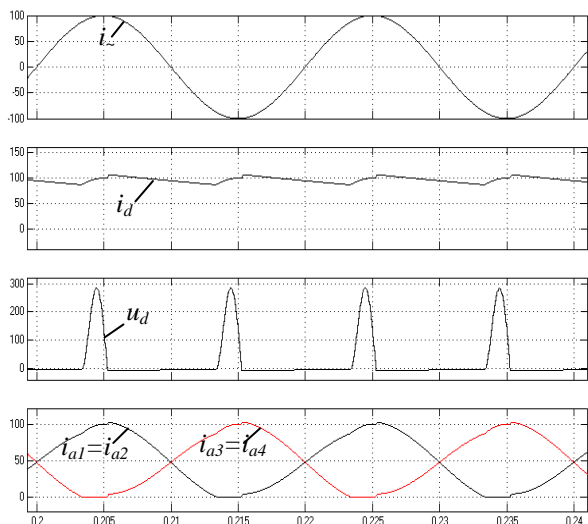
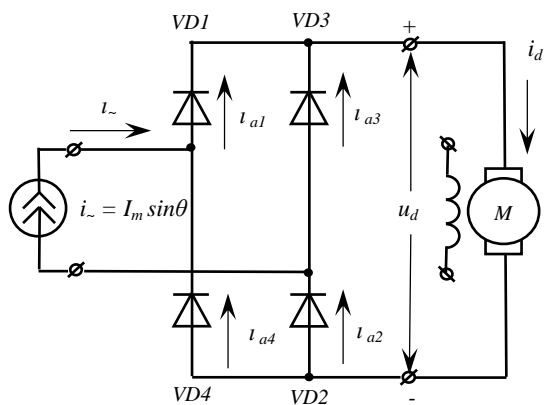


Рис. 2 Схема ЭП и временные диаграммы синусоидального входного тока  $i_{\sim}$ , выпрямленного тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$ , а также токов вентилях при работе на заторможенный якорь

Далее рассмотрим работу схемы с питанием от ИН (рис. 3) и от ИТ (рис. 4) на вращающийся якорь. На рис. 3 реверсирование ЭП производится за счет переключения запираемых тиристоров  $VS1 \div VS4$  реверсора, хотя могут применяться также и однооперационные тиристоры с цепями принудительной коммутации. На рис. 5, а приведены электромеханические диаграммы в ЭП.

Для реверсирования, как известно, подают запирающие импульсы управления на ранее проводившие ток тиристоры, например,  $VS1$  и  $VS2$  (на рис. 3 при  $t = 0,97$  с), контролируют спадание тока  $i_d$  до нуля, выдерживают паузу для восстановления запирающих свойств указанных тиристоров и только после этого подают отпирающие импульсы управления на тиристоры  $VS3$  и  $VS4$ . Для уменьшения обратных перенапряжений на тиристорах в момент их выключения, желательно иметь конденсатор  $C_k$ , включаемый параллельно якорю машины (при моделировании  $C_k$  отсутствовал). На интервале от 0,97 до 0,99 с к машине энергия не подводится, имеем

торможение ЭП на выбеге. Большое увеличение тока якоря  $i_a = i_d$  в момент времени  $t = 0.99$  с, когда включаются тиристоры  $VS3$  и  $VS4$ , связано с отсутствием ограничивающего сопротивления в якорной цепи при торможении ЭП в режиме *противовключения*.

На рис. 4 представлена схема и временные диаграммы того же реверсивного ЭП с питанием от ИТ, а на рис. 5,б приведены электромеханические диаграммы. Для торможения машины в режиме *противовключения* и последующего реверсирования в схеме может быть использован чрезвычайно простой алгоритм: снимают импульсы управления с тиристоров  $VS1$ ,  $VS2$  и сразу же подают импульсы на другую пару тиристоров  $VS3$ ,  $VS4$ . На интервалах, где отсутствует коммутирующая ЭДС, как указывалось выше, ранее проводившие ток тиристоры естественным образом выключаются, а другие диагональные тиристоры включаются и обеспечивают непрерывное протекание тока якоря.

На диаграммах в момент реверса ( $t = 0.97$  с) также наблюдается увеличение тока якоря, т.к. торможение ЭП происходит без введения энергопоглощающего сопротивления. Несмотря на то, что на тиристоры  $VS3$  и  $VS4$  поданы импульсы управления, изменение полярности напряжения на якоре  $u_a$  не произошло. Кроме того, указанное напряжение с момента начала реверса и до  $t = 1.13$  с оказалось равным нулю. Это указывает на то, что к якору машины энергия со стороны источника питания не подводится, но так как интенсивное торможение ЭП происходит (см. рис. 5,б), следовательно, энергия для торможения может генерироваться лишь самой машиной.

Отмеченное явление, как известно, может быть возможным только в том случае, если ЭП работает в режиме *динамического торможения*.

В момент времени  $t = 1,5$  с осуществляется торможение ЭП на выбеге за счет включения тиристора  $VS1$ , который обеспечивает, работая совместно с тиристором  $VS4$ , короткое замыкание по выходу диодной схемы выпрямления. При  $t = 1,51$  с (см. нижнюю временную диаграмму на рис. 4) происходит полный перевод выпрямленного тока  $i_d$  в цепь короткозамыкающих тиристоров  $VS1$  и  $VS4$ , поэтому тиристор  $VS3$  реверсора выключается, отсекая якорь машины от ИТ, и только теперь появляется ЭДС якоря  $e_a$ , которая во всех других режимах работы ЭП никак и нигде не наблюдалась.

Выводы по работе реверсивного ЭП с питанием от преобразователя (выпрямителя) с ИТ на входе можно сделать следующие:

- значительно упрощается алгоритм управления ключами реверсора, последний может быть построен на базе обычных однооперационных тиристоров и, принципиально, не требует наличия цепей принудительной коммутации;
- при переключении диагональных ключей реверсора ЭП входит, как при питании от ИН, так и при питании от ИТ, в тормозной режим *противовключения*, однако во втором случае величина тормозного тока якоря оказывается, примерно, в два раза ниже (см. рис. 5), поэтому и величина ограничительного сопротивления *противовключения* будет меньше;
- меньшая величина тормозного сопротивления указывает на то, что режим *противовключения* ЭП с питанием от ИТ является более экономичным по расходу электроэнергии;
- снижение расхода энергии при торможении ЭП с питанием от ИТ обусловлено обязательным автоматическим входением машины в режим *динамического торможения*, при котором энергия от источника питания не забирается;
- можно считать, что тормозной режим *динамического торможения* ЭП с питанием от ИТ является частным

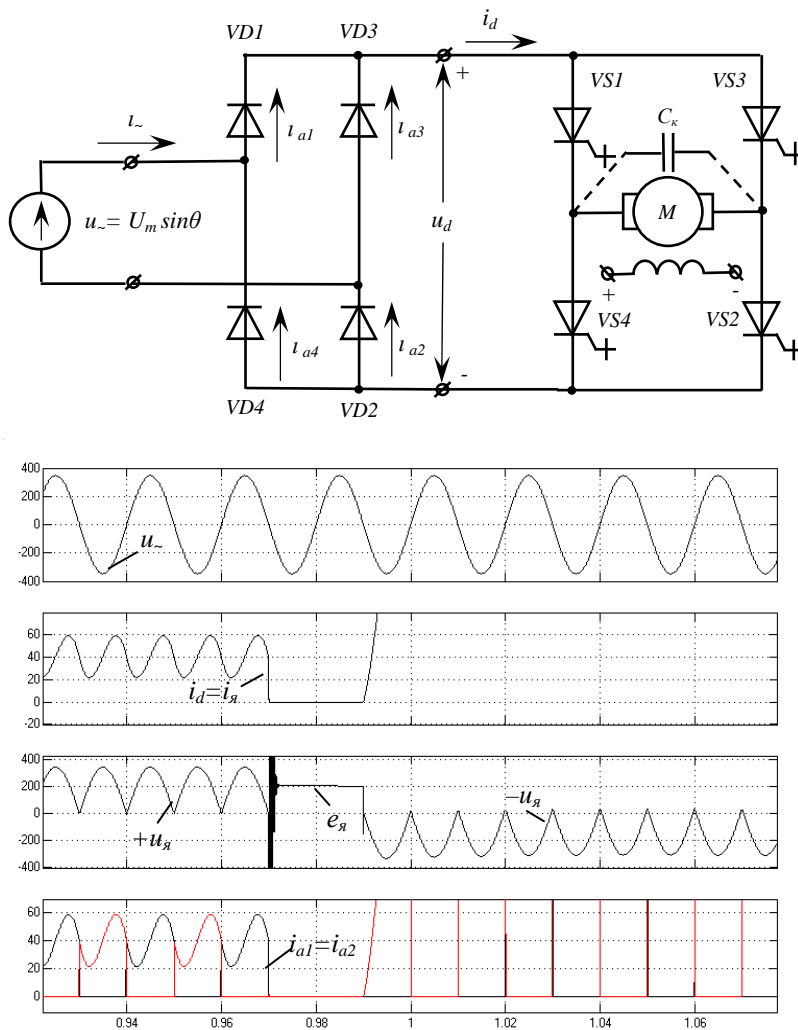


Рис. 3 Схема реверсивного ЭП и временные диаграммы синусоидального входного напряжения  $u_{\sim}$ , выпрямленного тока  $i_d$ , напряжения на вращающемся якоре  $u_a$ , токов диодов  $i_a$

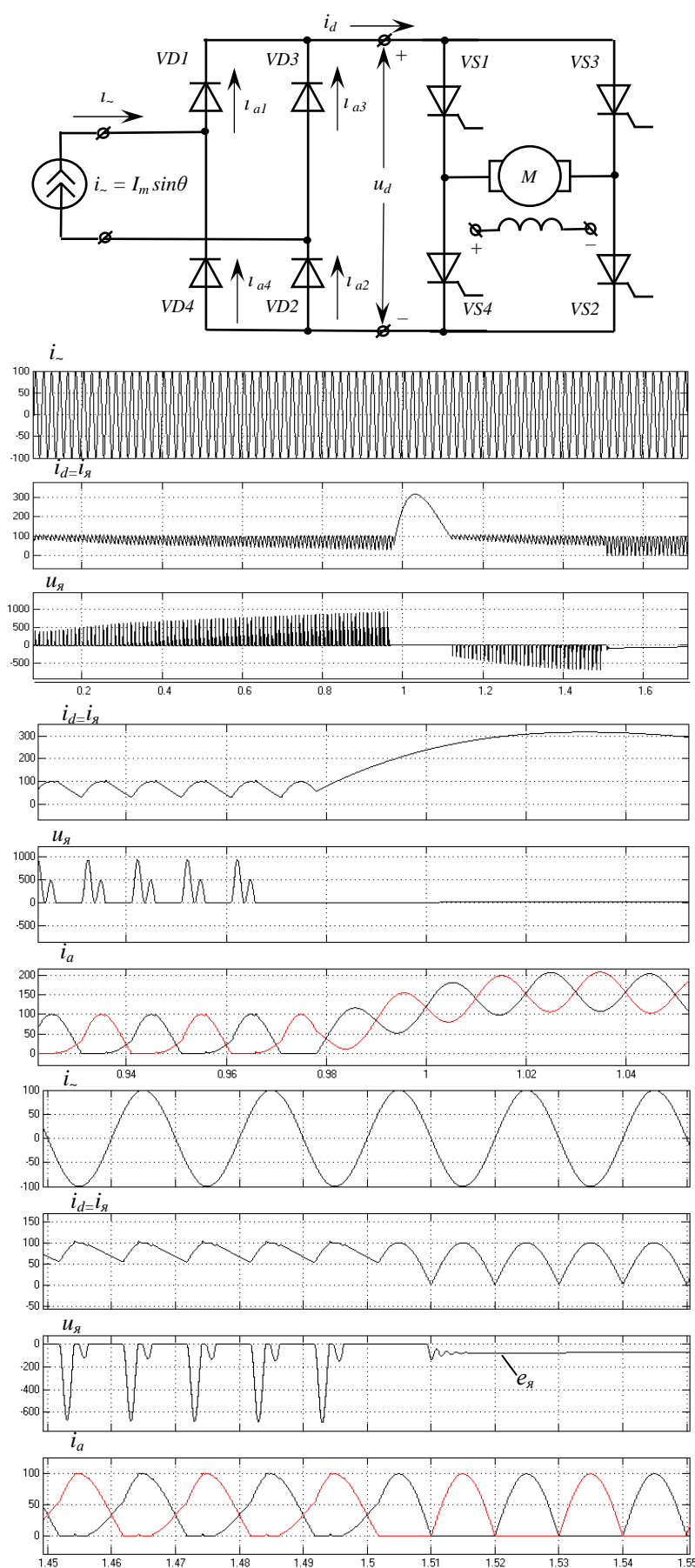


Рис. 4 Схема реверсивного ЭП и временные диаграммы синусоидального входного тока  $i_{\sim}$ , выпрямленного тока  $i_d$ , напряжения на вращающемся якоре  $u_{я}$ , токов диодов  $i_n$

случае тормозного режима противовключения, причем для перевода ЭП в режим динамического торможения якорную цепь машины абсолютно не требуется отключать от выпрямителя и подключать на отдельное тормозное сопротивление (это делать нельзя категорически, по причине возможных перенапряжений в схеме);

– временные диаграммы скорости ЭП в динамике при питании от ИТ являются строго линейными, что обуславливает плавность воздействия на механическое оборудование электромагнитного момента, развиваемого двигателем (рывки и удары в трансмиссии существенно снижаются);

– ЭДС якоря машины практически не влияет на угол проводимости тока вентилями преобразователя, а также на непрерывность выпрямленного тока, это позволяет считать, что ИТ полностью её «нейтрализует» (на временных диаграммах работы преобразователя ЭДС якоря не наблюдается, в отличие от диаграмм, когда питание происходит от ИН);

– при выборе ИТ по значению перегрузочного тока якоря машины, автоматически формируется «упорная» механическая характеристика в ЭП, а также упрощается защита преобразователя и двигателя (не требуются защиты по максимальному току якоря и от обрыва поля возбуждения);

– ЭП с питанием от ИТ имеет недостаток – в первый момент включения наблюдается кратковременная перегрузка якорной цепи машины по напряжению и току, которая при замене идеального ИТ на реальную схему с конкретным внутренним сопротивлением и наличием индуктивности сети, не представляет опасности.

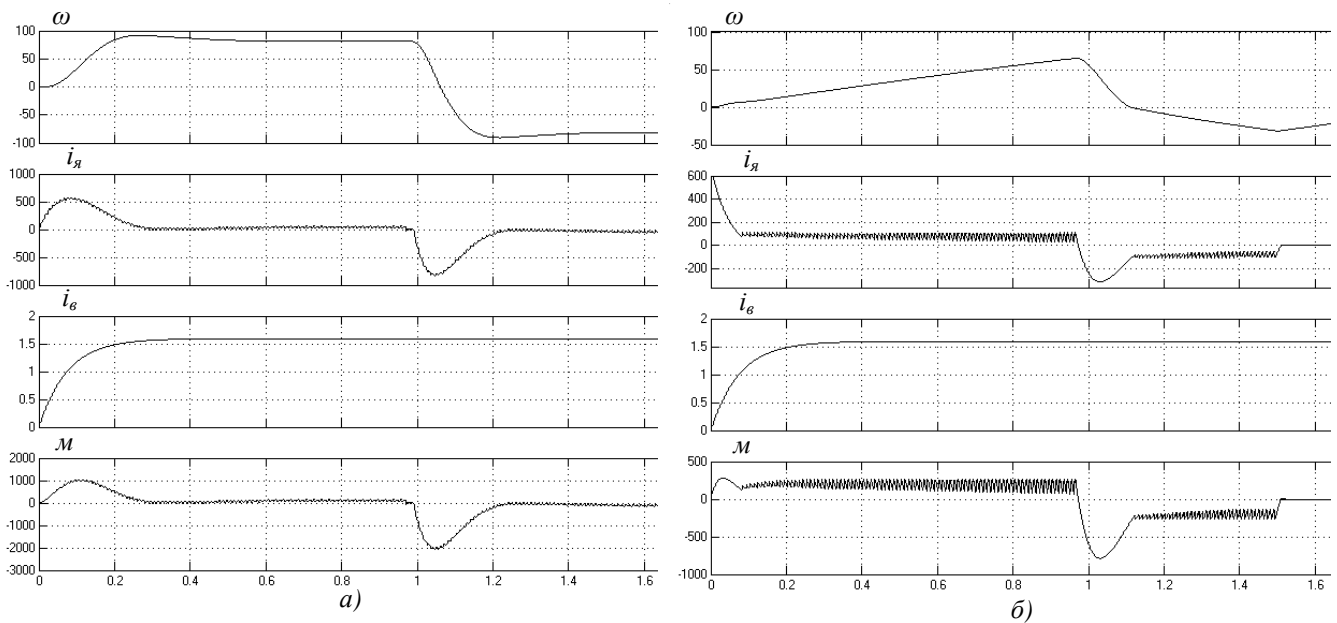


Рис. 5 – Скорость  $\omega$ , ток якоря  $i_{я}$ , ток возбуждения  $i_{в}$ , электромагнитный момент  $M$  электропривода с питанием от а) - ИН; б) - ИТ

При наличии такого перечня положительных качеств, которые имеет ЭП с питанием от ИТ, читателю настоящей статьи совершенно не понятно, почему указанный привод до настоящего времени не находит достаточно широкого применения. Причина лежит в промышленном варианте исполнения ИТ. Сегодня можно предложить, к сожалению, не очень широкий ассортимент электротехнических схем или преобразователей, которые позволяют «перестроить» работу источника электрической энергии (сети переменной ЭДС) с режима ИН на режим ИТ.

Наибольшее применение находят схемы, так называемых, индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП), работающие по принципу параметрической (резонансной) настройки LC-цепей, поэтому их еще называют параметрическими источниками тока (ПИТ). В [5] предложено называть различные виды вентильных схем с ПИТ на входе *токопараметрическими вентильными преобразователями (ТПВП)*.

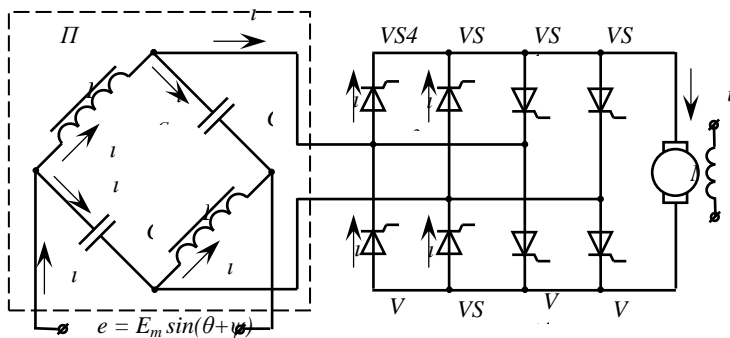


Рис. 6 Принципиальная схема реверсивного ЭП с питанием от однофазного ТПВП

На рис. 6 представлена схема силовых цепей ЭП с питанием от однофазного реверсивного ТПВП. Тиристорная группа  $VS1 \div VS4$  используется при работе в двигательном режиме «Вперед» и торможении в режиме противовключения с направления «Назад», а тиристорная группа  $VS1' \div VS4'$  используется для противоположных направлений. При одновременном открывании в точках естественной коммутации четырех нижних вентилей ( $VS1, VS3$  и  $VS2', VS4'$ ) или четырех верхних, получаем режим к.з. ПИТ и торможение ЭП на выбеге. Для удержания ЭП в остановленном состоянии может применяться режим электромагнитного тормоза – открывают все

восемь вентилей. Регулирование скорости ЭП с питанием от ТПВП может производиться за счет изменения тока возбуждения или за счет релейно-импульсной модуляции тока якоря. Осциллограммы для таких способов регулирования, снятые на действующих промышленных ЭП, показаны на рис. 7.

Реверсивный ЭП по системе ТПВП-Д имеет все, перечисленные выше, положительные качества, обладает предельной простотой силовой схемы и, следовательно, повышенной надежностью. Он может успешно применяться для широкого класса механизмов с невысокой прецизионностью, которые работают в повторно-кратковременном режиме преимущественно по треугольной тахограмме.

Источники электрической энергии, функционирующие в режиме ИТ (как например, ПИТ с диодным выпрямителем на выходе), могут использоваться также для создания силовых схем ЭП переменного тока на базе асинхронных двигателей с фазным ротором [6]. Такие схемы получили название *токопараметрический асинхронно-вентильный каскад (ТПАВК)*, а электроприводы их применяющие имеют «моментные» механические характеристики и обладают простотой и надежностью, как и система ТПВП-Д.

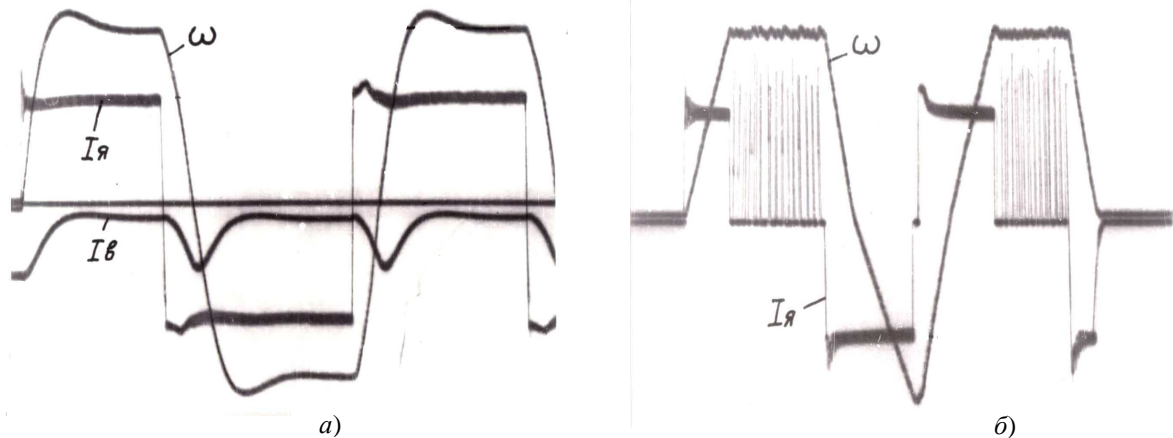


Рис. 7 Осциллограммы электромеханических процессов в регулируемом ЭП по системе ТПВП-Д  
 а) - при неизменном токе якоря и регулировании по каналу возбуждения;  
 б) - при неизменном токе возбуждения и релейно-импульсном регулировании тока якоря

В настоящее время четко просматриваются две области применения ЭП переменного тока с использованием преобразователя по схеме ТПАВК :

– для реконструкции электроприводов мощностью несколько тысяч кВт (без замены двигателей с фазным ротором) стационарных установок шахт, заводов, предприятий городского водо-теплового коммунального хозяйства: насосы, вентиляторы, компрессоры, подъемные машины, магистральные конвейеры и др., с целью экономии электроэнергии, обеспечения равноускоренного пуска и автоматизации управления [7, 8, 9].

– для согласования скоростей вращения взаимосвязанных электроприводов, которые имеют два и более двигателей средней мощности (механизмы перемещения мостовых и козловых кранов, конвейеры с несколькими приводными станциями, канатные дороги и прочее многодвигательное оборудование) [10].

*Вывод по статье.*

Считаем, что в последние несколько десятилетий, применение источников тока в электротехнических отраслях таких как, преобразовательная техника и электропривод, оказалось неоправданно забытым. Развитие указанных отраслей пошло по пути резкого усложнения схмотехнических решений электроприводов в ущерб надежности и простоты обслуживания. В настоящее время чрезвычайно обширная, как сейчас модно говорить, интеллектуализация технических разработок в различных областях электротехники, которая наглядно просматривается в университетских курсах всех уровней, не позволяет продвигать вперед её величество – *энергетическую электронику*, без развития которой не смогут появиться новые силовые схемы преобразователей и электроприводов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P i e p l o w Н. Zur Theorie der Transformation von konstantem Strom auf konstantem Strom auf konstante Spannung, Arch. – Electrotechn.,1937, 31,1.
2. Свенчанский А.Д., Гуттерман К.Д. Стабилизация тока нагрузки электротермических установок с переменным сопротивлением нагрузки // Электротермия. – 1963. – № 12. – С. 27 - 32.
3. Милых А.Н., Кубышин Б.Е., Волков И.В. Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источники тока. – Киев: Наукова думка, 1964. – 304 с.
4. Ильинский Н.Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. – М.: Энергия, 1979. – 144 с.
5. Лабунцов В.А., Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е. Токопараметрические вентильные преобразователи // Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. – 1980. – Вып. 1 (120). – С. 3 - 4.
6. Волков И.В., Калюжный В.В., Калюжный С.В. Преобразователь токопараметрического асинхронно-вентильного каскада // Электричество. – 2009. - № 11. – С. 57 - 61.
7. Калюжный В.В., Сиротин С.С., Шевченко И.С., Яценко А.М. Реконструкция электроприводов подъемных установок угольных шахт // Уголь Украины. – 2002. - № 5. - С. 40-41.
8. Волков И.В., Калюжный В.В., Окалелов В.Н., Калюжный С.В., Яценко А.М., Корсун В.А. Снижение энергетических и эксплуатационных расходов стационарных установок // Уголь Украины. – 2010. - № 3. – С. 10 - 12.
9. Патент на корисну модель 64917 U, Україна, МПК (2011.01) H02P 5/00, H02P 7/00. Регульований електропривод змінного струму стаціонарних установок / Калюжний В. В., Калюжний С. В., Садовой О.В. – № u201104378 ; заявл. 11.04.2011 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.
10. Калюжний С.В. Електромеханічні системи узгодженого обертання з живленням від струмопараметричного вентильного перетворювача. – Автореф. дис. канд. техн. наук. – НТУ „ХПІ”, Харків, 2012. – 20 с.