

УДК 621.313:678

МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛИНИИ ОБРЕЗИВАНИЯ КОРДА

С.Н. Сидоров¹, Н.И. Горбачевский², Е.Н. Гаврилов²

¹Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

²Нижекамский химико-технологический институт
филиал «Казанский национальный исследовательский университет»
г. Нижнекамск, Россия

Резюме: В работе представлены результаты исследования в области создания энергетически эффективных многодвигательных приводов, с помощью обратимых преобразователей частоты, способных уменьшить суммарную установленную мощность многодвигательного привода кордной линии. Обоснован выбор наиболее целесообразной конструкции, основывающейся на использовании в схеме инвертора тока запираемых вентилей типа GTO или IGBT и полярных демпфирующих конденсаторов в составе устройств защиты от возможных повышений коммутационных перенапряжений.

Ключевые слова: электротехнические системы, электропривод линии обрезающего корда, обратимые преобразователи частоты.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-89-98

MULTIVULATED FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE OF CORD WRAPPING LINE

S.N. Sidorov¹, N.I. Gorbachevsky², E.N. Gavrilov²

¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

²Nizhnekamsk Chemical-Technological Institute, Nizhnekamsk, Russia

Abstract: The urgency of the work is due to the need to develop a multi-motor frequency-controlled electric drive for cord clipping lines. The study of the construction of energy-efficient multi-motor drives, with the help of reversible frequency converters, which can reduce the total installed power of the multi-motor drive of the cord line. Justification of the choice of the most suitable design, based on the use in the inverter current circuit of lockable gates such as GTO or IGBT and polar damping capacitors as part of protection against possible increases in switching overvoltage.

Keywords: Electrical systems, the electric drive of a line of rubberizing of a cord, reversible converters of frequency.

В настоящее время наметилась устойчивая тенденция опережающего развития химических отраслей в Российской промышленности. Нарастание выпуска востребованной продукции реализуется как введением новых мощностей, так и реконструкцией и модернизацией действующих установок.

Новые требования обязывают выполнять установленные «Международной электротехнической комиссией» (МЭК) стандарты и нормативы в отношении

электромагнитной совместимости электроприводов с питающей сетью. Приоритетными признаются решения, основывающиеся на принципах активного энергетического взаимодействия преобразователя с питающей сетью. Переход к активному электропотреблению превращает преобразователь в потребитель полезной (активной) мощности сетевого входа, а при необходимости повышения общесетевого коэффициента мощности – в компенсатор пассивных составляющих этой мощности, генерируемых другими нагрузками [1–3]. На сегодняшний день электроприводы линии обрезаживания корда не отвечают указанным требованиям [4–10]. Как правило, их эксплуатация сопряжена с необходимостью компенсации значительного объёма пассивной (реактивной) мощности, а также мощности генерируемых в сеть высших гармоник тока. Представленный материал посвящён поиску более приемлемого решения. Дается сравнительный анализ нескольких вариантов построения многодвигательного электропривода на основе обратимых преобразователей частоты (ОПЧ).

Представляющие наибольший интерес варианты частотно-регулируемых приводов на основе двухзвенных ОПЧ показаны на рис. 1.

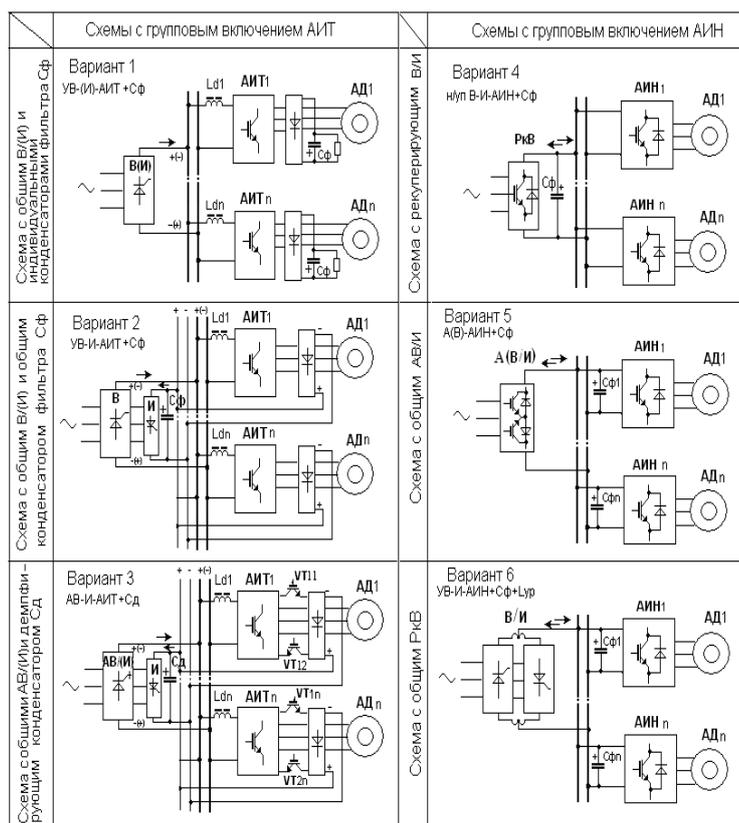


Рис. 1. Варианты исполнения многодвигательного электропривода

При составлении расчётной схемы замещения ограничимся рассмотрением 2-х двигательного привода, режимы работы которого определяются соотношением сетевого напряжения E_1 и напряжения на шинах постоянного тока E_d как функции угла управления тиристорами α блока В/И – с одной стороны и приведённой эдс вращения двигателя E_{12} – с другой. Рассмотрение проведём с учётом эквивалентных сопротивлений сети r_1 , L_1 и обмоток статора АД r_2 , L_2 . Начальное представление об условиях выпрямительного и

инверторного режимов в тиристорном преобразователе даёт показанная на рис. 2 компьютерная модель однодвигательного привода, выполненного, согласно варианту 1, на основе автономного инвертора тока. Условием работы частотно-токовых электроприводов является задание не только величины, но и фазы тока на выходе АИТ. С этой целью АИТ выполняется на запираемых вентилях с односторонней проводимостью тока, попарная работа которых в составе мостовой схемы происходит с длительностью проводящего состояния каждого вентиля на периоде $\lambda=2\pi/3$. В этих условиях отсутствие обратных диодов и конденсаторного фильтра в звене знакопостоянного тока (ЗЗПТ) могут привести к значительным коммутационным перенапряжениям в моменты запираания вентилей. Одно из наиболее простых устройств защиты от перенапряжений работает по принципу вывода избыточной энергии коммутации в полярный конденсатор фильтра C_f , оснащённый параллельно подключенным разрядным резистором. Ввиду невозможности нахождения полярного конденсатора в ЗЗПТ со знакопеременным напряжением, его подключение, как показано на рис. 1, осуществляется посредством вспомогательного диодного моста параллельно статорным обмоткам двигателя АД. Достижимое, благодаря ключам с односторонней проводимостью, постоянство знака тока $i_d(t)$ на входах АИТ делает возможным, как уже отмечалось, выполнение блока выпрямления/(инвертирования) В/(И) в виде однокомплектного преобразователя.

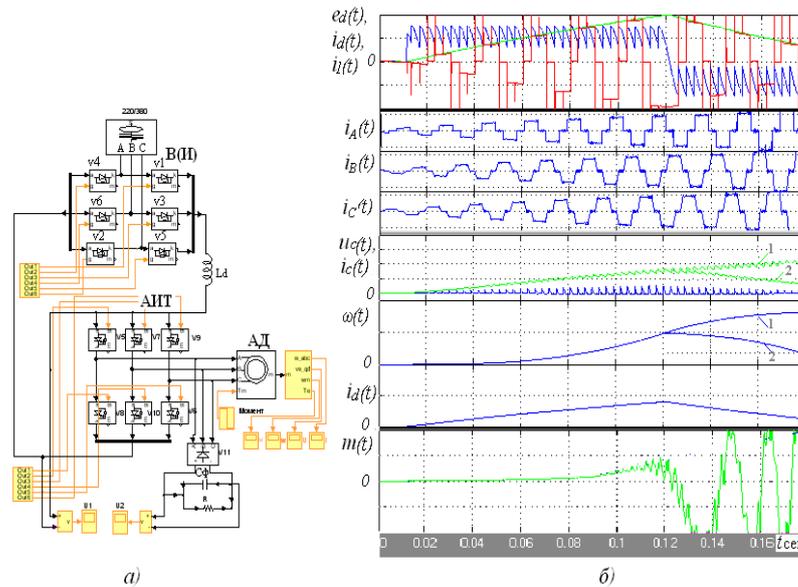


Рис. 2. Компьютерная модель однодвигательного привода с инвертором тока (а) и полученные с её помощью диаграммы выпрямительного, при $t \leq 0,12c$, $\alpha \leq \pi/2$, и инверторного, при $t \geq 0,12c$, $\alpha \geq \pi/2$ режимов (б)

Согласно варианту 2, элементной базой этого преобразователя могут служить однооперационные тиристоры [11]. Обозначенное скобками звено (И) присутствует в составе однокомплектного преобразователя в неявном виде, так как его функции обеспечиваются установкой угла управления тиристорами в диапазоне $\alpha \geq \pi/2$, в то время, как функции звена В требуют установки угла управления этими же тиристорами в диапазоне $\alpha \leq \pi/2$. Данное свойство подтверждают приведённые на рис. 2,б результаты компьютерного моделирования [12]. Полученная картина иллюстрирует перевод блока В/(И) в момент $t = 0,12c$ из выпрямительного режима в инверторный. Видно, что

произошедшее в данный момент изменение знака выпрямленного напряжения $e_d(t)$ способствует началу рекуперативного торможения. На это указывает снижение скорости вала $\omega \rightarrow 0$, сопровождающееся передачей накопленной энергии двигателя не только в конденсатор C_Φ , но и посредством звена (И) в питающую сеть. Процесс сопровождается снижением напряжения конденсатора $u_C(t)$ (кривая 2) и потребляемого тока на сетевом фазном входе $i_1(t)$. Происходящая на интервале торможения $t \geq 0,12c$ подпитка со стороны электрической машины объясняет поддержание токов статорных обмоток двигателя $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ в это время на некотором постоянном уровне.

Аналитическое описание однодвигательного привода предполагает получение результирующего вектора 3-х фазного синусоидального напряжения питания в комплексной форме записи:

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= (e_A(t)a^0 + e_B(t)a^1 + e_C(t)a^2) \cdot 2/3 = E_{1,M} \exp(j\omega_1 t); \\ e_A(t) &= E_{1,M} \sin(\omega_1 t); \\ e_B(t) &= E_{1,M} \sin(\omega_1 t - 2\pi/3); \\ e_C(t) &= E_{1,M} \sin(\omega_1 t + 2\pi/3); \\ a^0 &= 1; a^1 = \exp(j2\pi/3); \\ a^2 &= \exp(j4\pi/3). \end{aligned}$$

Аналогичное представление остальных напряжений и токов в схеме замещения рис. 3 превращает блоки В/(И) и АИТ в однофазную вентильную схему с эквивалентными параметрами сетевого входа $r_1, x_1, \bar{E}_1, \bar{E}_{12}$ и нагрузки r_2, L_2, \bar{E}_2 [3; 6; 14].

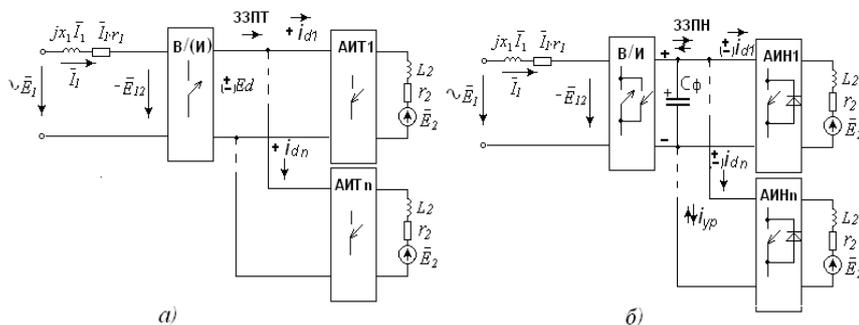


Рис. 3. Упрощенная схема замещения многодвигательного электропривода на основе инверторов тока АИТ1÷АИТn (а) и инверторов напряжения АИН1÷АИНn (б)

Тогда для рассмотрения энергетического взаимодействия ОПЧ с питающей сетью достаточно записать уравнение баланса установившихся напряжений в цепях сетевого входа полученной модели:

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_{12} + \bar{I}r + j\bar{I}x, \quad (1)$$

где $\bar{E}_{12} = \mu E_{12,M} \cdot \exp(j\varphi_E)$ – вектор приведённой к сетевому входу основной гармоники противо-эдс вращения двигателя; $\bar{I} = I_{1,M} \exp(j\varphi_i)$ – вектор основной гармоники сетевого тока; $r = r_1 + r_2$; $x = x_1 + x_2$ – эквивалентные, приведённые к сетевому входу, активное и индуктивные сопротивления схемы замещения. Указанное приведение осуществляется исходя из баланса активной мощности сетевого входа и звена постоянного тока (ЗПТ) $\bar{E}_1 \bar{I} 3/2 = E_d I_d$. На плоскости вращающихся с частотой сети ω_1 ортогональных координат $[x; jy]$ уравнение (1) можно отобразить в виде неподвижной векторной диаграммы (рис. 4, а, б).

Совместим неизменный по модулю $E_{M1}=\text{const}$ и фазе $\varphi=0$ вектор сетевого напряжения с вещественной осью ОХ этой диаграммы.

Видим, что существование того или иного энергетического режима зависит от величины и взаимного расположения двух векторов, представляющих сетевое напряжение \bar{E}_1 и приведённую к сетевому входу ЭДС звена постоянного тока \bar{E}_{12} . Геометрическая разность указанных векторов, согласно уравнению (1), представляет вектор падения напряжения на суммарном эквивалентном сопротивлении схемы замещения $\bar{I}_1 Z$.

Показанный на рис. 4 случай характеризует работу ОПЧ в режиме компенсированного преобразователя при отсутствии в составе мощности сетевого входа $S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$ реактивной составляющей $Q_1=0$. Видно, что данный режим существует благодаря отсутствию фазового сдвига тока относительно сетевого напряжения $\varphi_1=0$. Видно, что возникновению компенсированного режима при нулевых значениях угла управления тиристорами $\alpha=0$ в условиях подтормаживания привода $E_{12} \leq E_1$ может способствовать уменьшение реактивного сопротивления схемы замещения $x \rightarrow 0$ (см. рис. 4, б). И наоборот, при подкручивании двигателя со стороны нагрузки $E_{12} \geq E_1$ сохранения компенсированного режима при $\varphi_1=0$ можно добиться уменьшением активного сопротивления этой схемы $r \rightarrow 0$ (см. рис. 4, в).

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_{12} + \bar{I}_1 r + j \bar{I}_1 x, \text{ при}$$

$$\varphi_E := \frac{-\pi}{6} \quad E_1(t) := \sin(t) \quad E_{12}(t) := 0.5 \cdot \sin(t + \varphi_E)$$

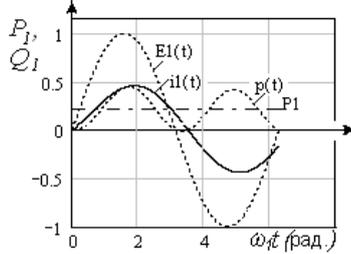
Given

$$\frac{d}{dt} i_1(t) + i_1(t) \cdot 1 = E_1(t) - E_{12}(t)$$

$$i_1(0) = 0$$

$$i_1 := \text{Odesolve}(t, 3 \cdot \pi, 500)$$

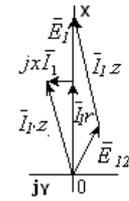
$$t := 0, \frac{1}{5000} \dots 2 \cdot \pi$$



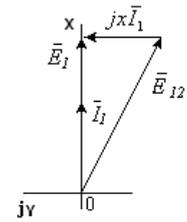
a)

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1^2 dt}; \quad p(t) = E_1(t) i_1(t); \quad S_1 = \frac{E_{1M}}{\sqrt{2}} I_1;$$

$$P_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(t) dt; \quad \varphi_1 = \arctg\left(\frac{Q_1}{S_1}\right); \quad Q_1 = S_1 \sin(\varphi_1).$$



б) при $x \rightarrow 0$



в) при $r \rightarrow 0$

Рис. 4. Алгоритм получения векторной диаграммы ОПЧ с помощью программы *Matchad* (процедура *Given*): расчётные кривые мгновенных $E_1(t)$, $i_1(t)$, $p(t)$ и интегральных P_1, Q_1 координат при $\varphi_1=0$, $Q_1=0$ (а); векторные диаграммы для случаев $E_1 \geq E_{12}$ (б), $E_1 \leq E_{12}$ (в)

Известно, что фазовое регулирование напряжения на выходе тиристорного выпрямителя при $\alpha = \varphi_i \geq 0$ превращает блок В(И), а значит и весь электропривод, в потребитель «реактивной мощности сдвига» из питающей сети. Наглядным отображением энергетических

процессов в данном электроприводе может служить 2-х квадрантная энергетическая диаграмма. На рис. 5 показано, что осями указанного графика могут служить величины активной P_1 и реактивной Q_1 мощностей сетевого входа ОПЧ. При этом верхний квадрант иллюстрирует работу блока В/(И) в выпрямительном режиме с потреблением обеих составляющих мощности $P_1 \geq 0$, $Q_1 \geq 0$, в то время, как нижний квадрант помогает выяснить условия возникновения инверторного режима, протекающего при $P_1 \leq 0$, $Q_1 \geq 0$.

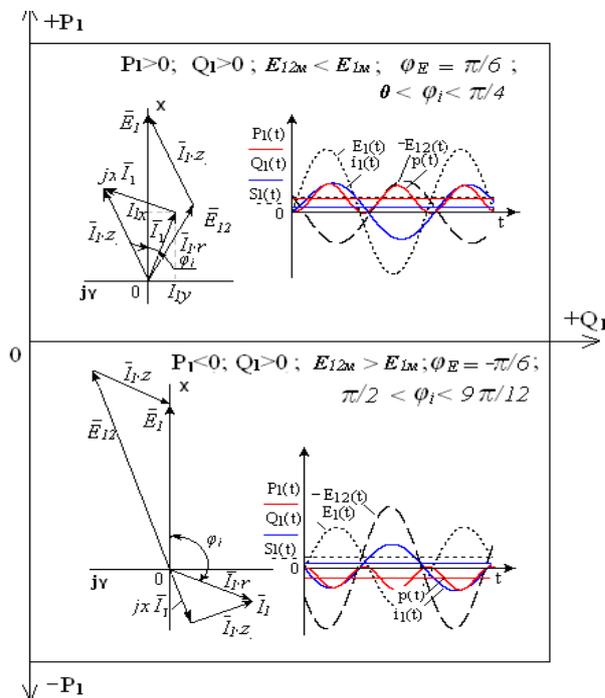


Рис. 5. Энергетическая диаграмма ОПЧ с однокомплектным тиристорным преобразователем В/(И) на сетевом входе

Как отмечалось, рассмотрение потоков электрической мощности в структуре многодвигательного электропривода должно учитывать наличие общих шин питания инверторов и появляющуюся в связи с этим возможность взаимного энергетического влияния приводов друг на друга. Признаком существующего энергетического режима в схеме ОПЧ служит знак активной мощности в среднем звене двухзвенной структуры. При определении этого знака следует учитывать степень проводимости ключей инвертора. Выполнение АИТ на однонаправленных ключах превращает указанную часть схемы в звено знакопостоянного тока. В противоположность данным схемам, выполнение АИН на ключах с двухсторонней проводимостью делает эту часть схемы звеном знакопостоянного напряжения (ЗЗПН). Рассмотрение условий энергетического взаимовлияния ОПЧ проведём с помощью схем замещения на рис. 3 в предположении синусоидальности сетевого напряжения. Наличие общего блока питания В/И позволяет считать величину и форму напряжения на входе всех инверторов одинаковой. В связи с этим основной причиной энергетического взаимовлияния приводов в многодвигательной структуре следует рассматривать уравнительный ток $i_{yp} = i_{dl} - i_{dn}$.

Из схемы ЗЗПН на рис. 3,б видно, что в схемах на основе АИН появление уравнительного тока возможно в случаях работы соседних приводов в разных энергетических режимах, причём его замыкание происходит по цепям, минуя конденсатор C_ϕ . Положительной стороной данного явления следует рассматривать токовую

разгрузку конденсатора и, соответственно, уменьшение пульсаций напряжения в звене ЗЗПН. Подтверждение данного вывода получено с помощью компьютерной модели 2-х двигательного привода, выполненной по варианту 4 (рис. 1) на инверторах АИН1 и АИН2. При условии, что регулирование напряжения и частоты на выходах АИН ведётся широтно-импульсным способом, блок В может быть выполнен на неуправляемых вентилях (диодах), в то время, как блок (И) требует применения управляемых, а для устранения между В и блоком (И) токов междуфазного к.з. – полностью управляемых (запираемых) вентилях. Наличие в звене ЗЗПН этой схемы конденсаторного фильтра C_{ϕ} обеспечивает не только традиционные функции сглаживания напряжения и замыкания реактивного тока, но и запирающие диоды блока В, препятствующего развитию тока междуфазного к.з. на интервалах одновременной работы вентилях блоков (И) и В.

Программа испытаний модели включала запуск электропривода на холостом ходу с последующим последовательным переводом АД1 и АД2 в моменты $t=0,05$ с и $t=0,1$ с в режим рекуперативного торможения путём приложения к валу подкручивающего момента. Для сравнения торможение проведено при выключенном и включённом состояниях сетевого инвертора (И). Как видно из кривой рис. 6,б, перевод АД2 в момент $t=0,1$ с в генераторный режим, наряду с повышением уровня напряжения конденсатора, привёл к заметному уменьшению результирующего тока на входе инвертора АИН1 $i_{d1} = i_{d2} - i_{yp}$ см. рис. 6,л. Повторение этого эксперимента при включённом инверторе (И) позволило стабилизировать напряжение конденсатора на меньшем уровне см. рис. 6,в.

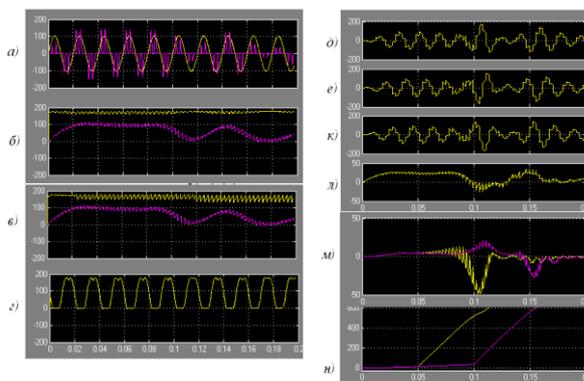


Рис. 6. Результаты моделирования электропривода по системе н/уп В–И–АИН -АД+ C_{ϕ} (вариант 4): а – фазное напряжение и ток сетевого входа; б – выпрямленное напряжение и ток в звене ЗЗПН на общем входе инверторов; в – напряжение на одном из ключей блока В/(И); д,е,ж – токи статорных обмоток АД1; з,и – кривые момента и скорости двигателей

В противоположность данным схемам, появление уравнительного тока в схемах с инверторами тока, по причине односторонней проводимости ключей, оказывается невозможным. Тем не менее, говорить об энергетической автономности приводов в схеме варианта 1 (рис. 1) нельзя. Причиной взаимозависимости приводов в данной схеме является совмещение функций выпрямления и инвертирования в одном блоке В/(И), поэтому перевод этого блока во время торможения одного из приводов в инверторный режим повлечёт нежелательное изменение величины и знака напряжения питания на входах всех остальных приводов кордной линии. Таким образом, использование инверторного режима в схеме варианта 1 имеет смысл лишь в одном случае, а именно – при экстренном электрическом торможении и одновременном выключении всех приводов кордной линии. Тем не менее, удовлетворить требованию автономности приводов в схемах с АИТ можно, для чего необходимо разделить потоки потребляемой и возвращаемой мощностей приводов, работающих в разных энергетических режимах. Для этого каждый из приводов

предлагается оснастить индивидуальными цепями вывода энергии торможения в общий конденсатор фильтра C_{ϕ} на входе единого для всей линии рекуперирующего инвертора. Согласно варианту 2 (рис. 1) структурная схема многодвигательного электропривода с отдельными потоками мощностей, кроме шин потребляемой мощности, оснащается дополнительными шинами возвратной мощности. В отличие от первых, полярность напряжения на шинах обратной мощности, благодаря выпрямительным диодам, сохраняется неизменной, соответствующей проводящему состоянию тиристоров рекуперирующего инвертора. Проверка данного решения проведена с помощью компьютерной модели 2-х двигательного привода с автономными инверторами АИТ1 и АИТ2. Так же, как и ранее, программа испытаний включала одновременный запуск электродвигателей АД1 и АД2 на холостом ходу с последующим переводом их в режим рекуперативного торможения. Этот перевод осуществлялся последовательным приложением к двигателям при $t=0,1$, $t=0,15$ с отрицательного момента нагрузки.

Как видно из рис. 7,м, возникающее подкручивание двигателей сопровождается дополнительным увеличением скорости и противо-э.д.с. вращения, однако, в зависимости от состояния рекуперирующего инвертора (И), это может по-разному влиять на уровень напряжения конденсаторного фильтра C_{ϕ} (рис. 7,з). Согласно варианту 2 обкладки этого конденсатора подключены в проводящем направлении к входным зажимам инвертора (И), образуя, тем самым, упомянутые шины возвратной мощности. С целью сравнения работа этого инвертора рассматривалась в закрытом при $\alpha \rightarrow \pi$ и открытом при $\alpha \rightarrow \pi/2$ состояниях. Как можно видеть из рис. 7,в, закрытие инвертора приводит к существенному росту напряжения конденсатора, являясь причиной недопустимого роста перенапряжений. В этих условиях ограничить рост перенапряжений можно лишь путём рассеивания избыточной энергии в разрядном резисторе. В противоположность этому, кривые напряжения и тока конденсатора C_{ϕ} на рис. 7,з демонстрируют возможность решения задачи с помощью открытых для обратного потока мощности тиристоров инвертора (И). Видно, что появляющаяся возможность направить энергию торможения в питающую сеть ведёт к уменьшению уровня напряжения на обкладках конденсатора.

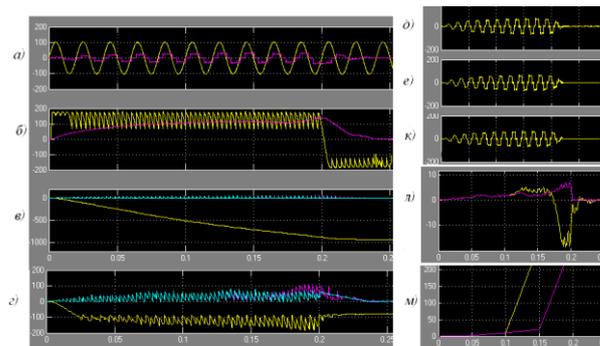


Рис. 7. Результаты моделирования электропривода по системе УВ-И-АИТ-АД+ C_{ϕ} (вариант 2):
 а – фазное напряжение и ток сетевого входа; б – выпрямленное напряжение и ток в звене ЗЗПТ на общем входе инверторов; в, з – напряжение и ток конденсатора фильтра C_{ϕ} в закрытом (в) и открытом (з) состояниях сетевого инвертора (И); д,е,ж – токи статорных обмоток АД;
 л, м – кривые момента и скорости двигателей

Главное достоинство этого варианта состоит в возможности изменять уровень установившегося напряжения конденсатора, регулируя угол управления тиристорами звена (И) в диапазоне $\alpha = \pi/2 \div \pi - \gamma_m$, где γ_m – максимальный угол коммутации, исключающий возможность аварийного режима «опрокидывания» инвертора. Результаты проверки эффективности этого решения подтверждают не только снижение перенапряжений, но и

отсутствие энергетического взаимовлияния приводов с отдельными потоками мощности. Из диаграмм рис. 7 можно убедиться, что происходящие в моменты $t=0,1; 0,15$ с изменения энергетического режима одного из приводов не оказывают какого-либо влияния на величины тока и скорости другого привода. Получило подтверждение и другое упомянутое свойство многодвигательного электропривода с однокомплектным блоком В/(И) на сетевом входе, создающее условия для экстренного выключения всех приводов кордной линии во время аварий: из полученных на рис. 7 диаграмм видно, как предпринятый в момент $t \geq 0,2$ с завершающий перевод блока В/(И) в инверторный режим действительно обеспечил экстренное торможение и одновременное выключение всех приводов кордной линии.

Литература

1. Частотно-регулируемые электроприводы в технологиях шинопроизводства / С.Н. Сидоров, В.Н. Дмитриев, Р.Н. Ганиев. Под ред. Н.И. Горбачевского. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 223 с.
2. Сидоров С.Н. Система частотно-токового управления электроприводом на базе запираемых вентилей // Приводная техника. 2011. № 1. С. 14–19.
3. Сидоров С.Н. Матричный преобразователь частоты в режимах скалярного управления // Электричество. 2010. № 7. С. 26–33.
4. Разработка, исследование и внедрение частотно-регулируемого электропривода экструдера в производстве автомобильных шин: монография / Р.Н. Ганиев. Нижнекамск: НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2015. 126 с.
5. Ганиев Р.Н., Горбачевский Н.И., Платов В.Н. Проблемы модернизации электроприводов технологических установок экструзионного типа // Известия Тульского государственного университета «Технические науки». Тула: ТулГТУ, 2010. С. 16–22.
6. Горбачевский Н.И. Разработка, исследование и внедрение электротехнического комплекса резиносмесителя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2006.
7. Орлов С.П. Повышение эффективности электрооборудования и системы управления экструзионной линии: дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2005. 193 с.
8. Проектирование экструзионных машин с учетом качества резинотехнических изделий: монография / М.В. Соколов [и др.]. М.: Машиностроение, 2007. 292 с.
9. Раувендал К. Экструзия полимеров: пер. с англ. А.Я. Малкина. СПб.: Профессия, 2008. 762 с.
10. Основы технологии шинного производства / Г.Я. Власов [и др.]. Воронеж: Государственная технологическая академия, 2002. 459 с.
11. Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью: пер. с англ. Б.И. Копылова. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с. ил.
12. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

Авторы публикации

Сидоров Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ).

Горбачевский Николай Иванович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электротехника и энергообеспечение предприятий» факультета управления и автоматизации Нижнекамского химико-технологического института (филиал) «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Гаврилов Евгений Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и энергообеспечение предприятий» факультета управления и автоматизации Нижнекамского химико-

технологического института (филиал) «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

References

1. Frequency-regulated electric drives in tire production technologies Sidorov, V.N. Dmitriev, R.N. Ganiev. Ed. N.I. Gorbachevsky. - Ulyanovsk: UISTU, 2015. 223 with.
2. Sidorov S.N The system of frequency-current control of the electric drive on the basis of the lockable valves // Drive technology. 2011. № 1. P.14–19.
3. Sidorov S.N. Matrix frequency converter in scalar control modes. // Electricity. 2010. № 7. P. 26–33.
4. Development, research and implementation of frequency-controlled electric drive of an extruder in the production of automobile tires: monograph / R/N Ganiev. Nizhnekamsk: NCTI FSBEI "KNRU", 2015. 126 p.
5. Ganiev R.N, Gorbachevsky N.I, Platov V.N Problems of modernization of electric drives of technological installations of extrusion type // But the Tula State University "Technical Sciences". Tula: TulSTU, 2010. P. 16–22.
6. Gorbachevsky N.I Development, research and introduction of the electrotechnical complex of the rubber-mixer: the author's abstract. dis. ... cand. tech. Nizhny Novgorod, 2006.
7. Orlov S.P Increase of efficiency of electrical equipment and control system of extrusion line: dis. ... cand. tech. - Krasnodar, 2005. 193 with.
8. Designing extrusion machines taking into account the quality of rubber products: monograph / M.V Sokolov [and others]. M.: Mechanical engineering. 2007. 292 p.
9. Rauwendal, K. Extrusion of polymers: Per. with angl.A. J. Malkina / K. Rauwendaal. SPb.: The profession, 2008 762 p.
10. Fundamentals of the technology of tire production / G. Ya. Vlasov [and others] Voronezh: State Technological Academy. 2002. 459 p.
11. Phillips, C. Control systems with feedback: Per. with English. B. I. Kopylova / C. Phillips, P. Harbor. - Moscow: Laboratory of Basic Knowledge, 2001. 616 p. yl.
12. Shreiner, R.T. Mathematical Modeling of AC Drives with Semiconductor Frequency Converters / R.T. Shreiner. Ekaterinburg: Uro RAS. 2000. 654 p.

Authors of the publication

Sidorov Sergey Nikolaevich – Cand. of Technical Sciences, Assistant professor of the electric drive and automation of industrial installations of the power faculty of the Ulyanovsk State Technical University.

Gorbachevsky Nikolay Ivanovich – Cand. of Technical Sciences, Head of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises of the Faculty of Management and Automation of the Nizhnekamsk Institute of Chemistry and Technology «Kazan National Research Technological University».

Gavrilov Evgeniy Nikolaevich – Cand. of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises of the Faculty of Management and Automation of Nizhnekamsk Chemical and Technological Institute «Kazan National Research Technological University».

Поступила в редакцию

27 декабря 2017 года.