

Олейников А.М., Пронина А.К., Агафонов В.В.

## ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СУДОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Рассматриваются вопросы плавного регулирования скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя в судовом электроприводе при тиристорном управлении. Оцениваются принципиальные возможности осуществления такого регулирования с помощью тиристорного коммутатора.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, плавное регулирование скорости, тиристорный коммутатор, импульсное управление, показатели регулирования.

**Введение.** Сущность импульсного регулирования скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя, заключается в поочередном подключении и отключении обмотки статора к сети с номинальным напряжением, происходящих с ненулевыми начальными электромагнитными условиями [1,2].

Цикл работы при импульсном регулировании описывается периодом включения относительной продолжительностью включения  $\gamma = \tau_p / T_n$  и частотой импульсов  $f_u = 2\pi / T_n$ , которая должна быть достаточно высокой для уменьшения колебаний скорости. При очередном подключении с целью уменьшения переходного магнитного момента, необходимо увеличить время паузы  $\tau_0$  (безтоковое состояние). Основным недостатком применения импульсного регулирования скорости короткозамкнутым асинхронным двигателем является значительное увеличение потерь при работе под нагрузкой на пониженных скоростях [1].

**Постановка задачи.** Ввиду актуальности задачи получения регулируемого привода АД с короткозамкнутым ротором в широком диапазоне скоростей, в данной публикации исследуются и обосновываются условия реализации принципа импульсного управления. При этом учитывается режим работы привода, характер момента нагрузки, диапазон регулирования скорости, момент инерции, параметры двигателя и условия его охлаждения.

**Характеристика задачи.** Импульсный режим можно рассматривать как регулирование величины среднего напряжения, подводимого к двигателю, а устойчивая работа электропривода обеспечивается, если система охвачена обратной связью. Плавное изменение величины напряжения традиционно осуществляется с использованием принципа фазового управления тиристорными коммутаторами [3]. Полувольту напряжения пропускают с задержкой на величину фазового угла  $\alpha$  открытия тиристора, при этом действующее значение напряжения уменьшается с увеличением угла открытия тиристора. Импульсный и фазовый принципы регулирования напряжением имеют друг перед другом ряд преимуществ и недостатков. Достоинством фазового регулирования является отсутствие скачков тока по величине, однако, действующее значение тока на любой скорости такое же, как и при импульсном регулировании. Следовательно, величина потерь скольжения оказывается независимой от принципа управления напряжением. Однако при фазовом управлении возникают не только искажения синусоидальности кривых тока и напряжения, но и несимметрия по фазам из-за неточности работы системы импульсно-фазового управления.

Вследствие этих факторов в питающую сеть будут поступать высшие гармоники тока и напряжения, которые вызывают добавочные потери, соизмеримые с номинальными потерями.

ми [3], высокочастотную вибрацию машины и снижение коэффициента мощности по первой гармонике. Все эти потери отсутствуют при импульсном регулировании.

**Решение задачи.** Рассмотрим условия, при которых показатели регулирования становятся приемлемыми для практического применения импульсного способа регулирования.

Необходимо, чтобы к моменту подачи очередного импульса напряжения на обмотку статора, в роторе практически завершился электромагнитный процесс, который протекает тем быстрее, чем больше соотношение  $\frac{\tau_p'}{\tau_p}$ .

На рисунке 1а изменение скорости в пределах  $\Omega_i'$  до  $\Omega_i''$  происходит на интервалах времени  $\tau_p$  и  $\tau_0$ , при этом средняя скорость имеет значение  $\Omega_{cp}$ . В период разгона скорость увеличивается на величину  $\Delta\Omega_i = \Omega_i'' - \Omega_i'$  под действием избыточного момента  $\Delta M_i$ , который в данном случае можно принять постоянным.

Тогда время разгона от точки 1 до точки 2 (Рис.1а) может быть рассчитано из соотношения

$$\tau_p = \frac{J}{\Delta M_i} \cdot \Delta\Omega_i. \quad (1)$$

Снижение скорости происходит под действием момента сопротивления механизма  $M_{ci}$  в течение времени

$$\tau_0 = \frac{J}{M_{ci}} \cdot \Delta\Omega_i, \quad (2)$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся частей.

Из (1) и (2) получили соотношение  $\frac{\tau_p}{\tau_0} = \frac{M_{ci}}{\Delta M_i}$ . Таким образом, чтобы уменьшить время разгона  $\tau_p$  и, тем самым увеличить время безтоковой паузы  $\tau_0$  (с учетом  $T_u = \tau_p + \tau_0 = \text{const}$ ) необходимо иметь большее значение  $\Delta M_i$  при определенном моменте  $M_{ci}$ . Относительная продолжительность времени паузы равна

$$\gamma_0 = \frac{\tau_0}{T_u} = \frac{\Delta M_i}{\Delta M_{ci} + \Delta M_i} = 1 - \gamma_i$$

Увеличение  $\gamma_0$  может быть достигнуто в двигателе с повышенным сопротивлением ротора  $r_2^f$ , каким и является АД с двуслойным ротором [2].

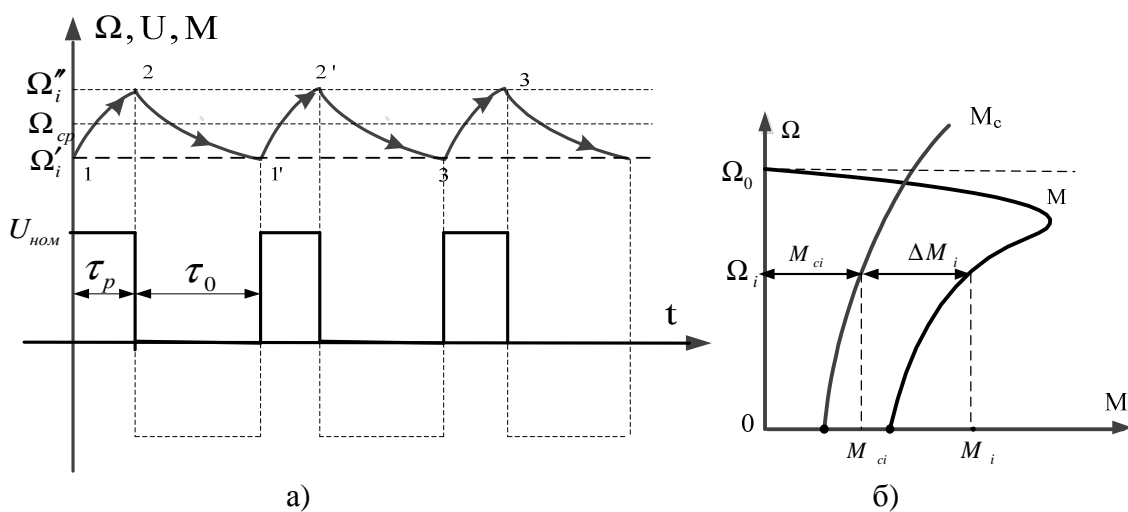


Рис. 1. Характеристики изменения скорости  $\Omega$  и напряжения  $U$  при импульсном регулировании (а) и графики зависимости  $M(\Omega)$  двигателя с квадратичной нагрузкой (б)

Анализ характеристик показывает, что использование двигателя с двуслойным ротором при импульсном регулировании имеет преимущества:

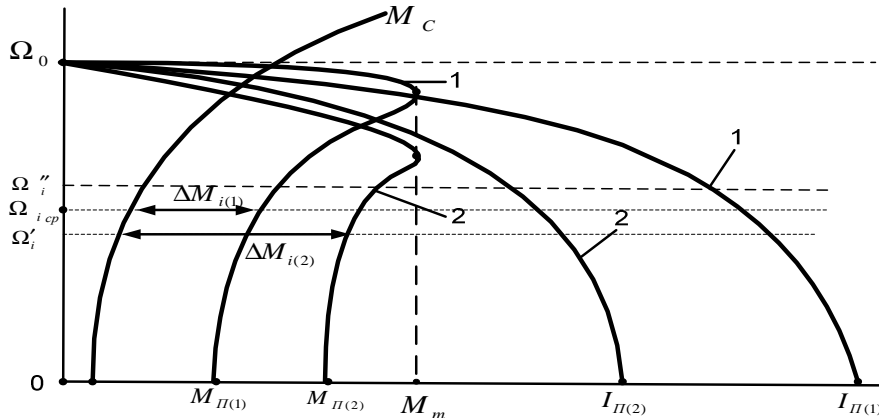


Рис. 2. Характеристики тока и момента АДКЗ обычного исполнения (индекс 1) и АДКЗ с двухслойным ротором (индекс 2)

- при поддержании любой скорости  $\Omega_i$  на заданном уровне, время паузы больше у АД с двухслойным ротором, что способствует более полному затуханию остаточного магнитного потока ротора за время выбега;
- быстрое затухание магнитного потока, вследствие большого активного сопротивления ротора, обеспечивает более благоприятные условия протекания электромагнитного переходного процесса при повторном подключении;
- пусковой ток оказывается меньше  $I_{i(2)} < I_{i(1)}$ , что обеспечивает меньшие колебания момента при включении; одновременно пусковой момент оказывается больше, чем у двигателя обычного исполнения при меньшем токе;
- на любой скорости двигатель с повышенным  $r_2'$  работает при большем коэффициенте мощности  $\cos \phi$ .

Оценим далее влияние характера нагрузки на потери мощности скольжения (Рис. 1б). В установившемся режиме работы на скорости  $\Omega_i$ , среднее значение момента двигателя равно моменту сопротивления

$$M_{ci} = \frac{\tau_p \cdot M_i}{T_u} = \gamma_i \cdot M_i$$

Потери скольжения составляют

$$\Delta p_{2i} = M_{ci} \cdot \Omega_0 \cdot s_i = 3 \cdot (I_{2i\text{cp}}')^2 \cdot r_2'$$

где  $s_i$  - скольжение ротора при скорости  $\Omega_i$ ;  $s_i = 1 - v_i$ ;  $v_i$  - относительная скорость  $\frac{\Omega_i}{\Omega_0}$ .

Для центробежных механизмов с моментом сопротивления  $M_c(v) = M_{c\text{ном}} \cdot v^2$ .

Потери в роторе представляются функцией

$$\Delta p_2(v) = M_{c\text{ном}} \cdot \Omega_0 \cdot (1 - v) \cdot v^2$$

Исходя из условия

$$\frac{d\Delta p_2(v)}{dv} = P_{12\text{н}}(2v - 3v^2) = 0$$

следует, что при скорости  $v_m = 2/3$  (скольжении  $s_m = 1/3$ ), рассчитаны максимальные потери в роторе, которые составили  $\Delta p_{2m} = 0,148 P_{12\text{ном}}$ .

Из известного соотношения  $\Delta p_1 = \Delta p_2 \cdot \frac{r_2}{r_2'}$  очевидно, что потери в статоре будут тем меньше, чем больше  $r_2'$ .

Таким образом, импульсное регулирование скорости АД может быть рекомендовано для кратковременных и повторно-кратковременных режимов работы привода с квадратичным моментом нагрузки, с улучшенными условиями охлаждения и с увеличенным сопротивлением ротора. К таким приводам можно отнести судовой привод погружных подруливающих устройств.

Система импульсного управления привода по массогабаритным показателям, сложности силовой части и системы управления аналогична обычному тиристорному пускателю; при этом схема автоматического управления приводом на порядок проще, чем при частотном управлении.

Принципиальная возможность импульсного регулирования скорости привода погружного подруливающего устройства с использованием АДДР реализована моделированием в среде MatLab (рис. 3).

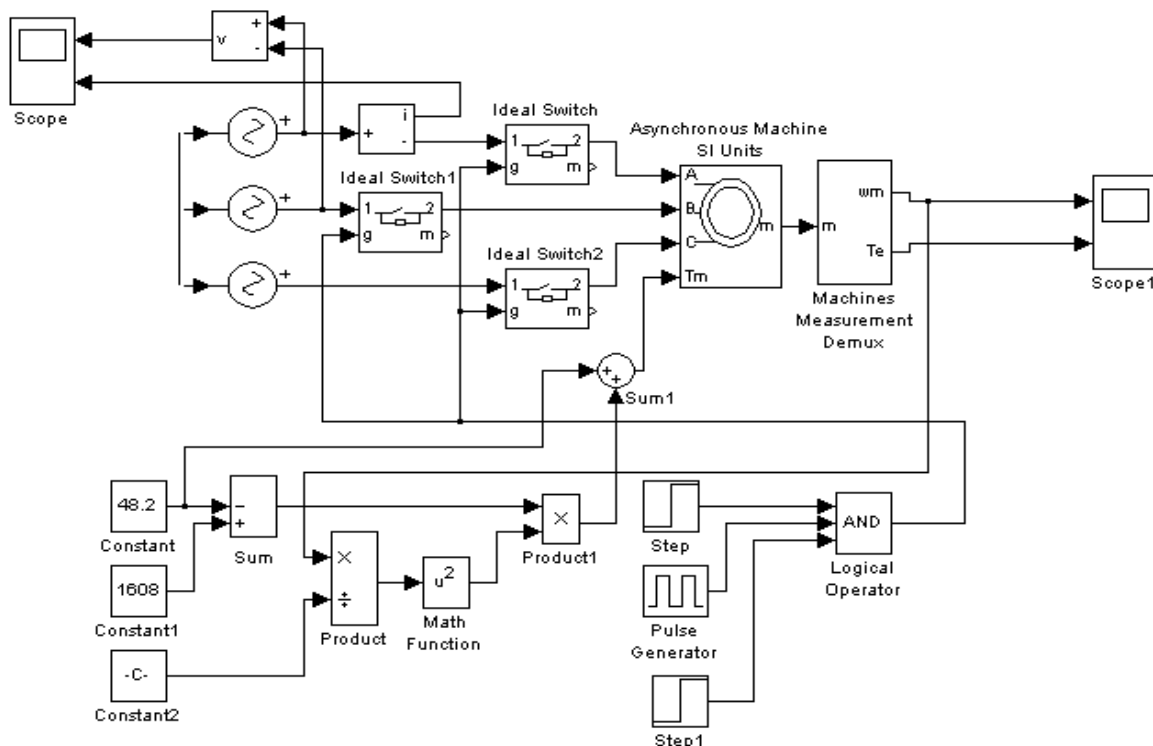


Рис.3. Структурная схема модели импульсного регулирования скорости АДДР

В качестве объекта управления использован АДДР мощностью 270кВт, напряжением 380 В с номинальным током 485 А. при квадратичном моменте сопротивления. Период импульсов  $T_{\text{и}} = 0,8$  сек. (рисунок 4) В случае  $\gamma = 0,1$  двигатель выходит на установившуюся скорость  $v_i = 0,25$  о.е., а при  $\gamma = 0,25$  двигатель выходит на скорость  $v_i = 0,5$  о.е. При малой регулируемой скорости в кривой момента имеют место колебания на среднем значении 2000 Н·м, а при работе на большей скорости момент имеет несущественные колебания в начальной части импульса на среднем значении момента 3000 Н·м (среднем на времени  $t_p$ ). Номинальный момент двигателя 1720 Н·м.

**Выводы.** Импульсный способ регулирования обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне для асинхронных приводов с квадратичной нагрузкой, работающих в повторно-кратковременном режиме, имеющих интенсивное охлаждение. Рассмотрены условия практического применения импульсного регулирования, удовлетворяющие основным показателям регулирования. Анализ характеристик тока и момента АДДР показал его преимущества перед АДКЗ традиционного исполнения. Обосновано применение АДДР в судовом электроприводе погружных подруливающих устройств.

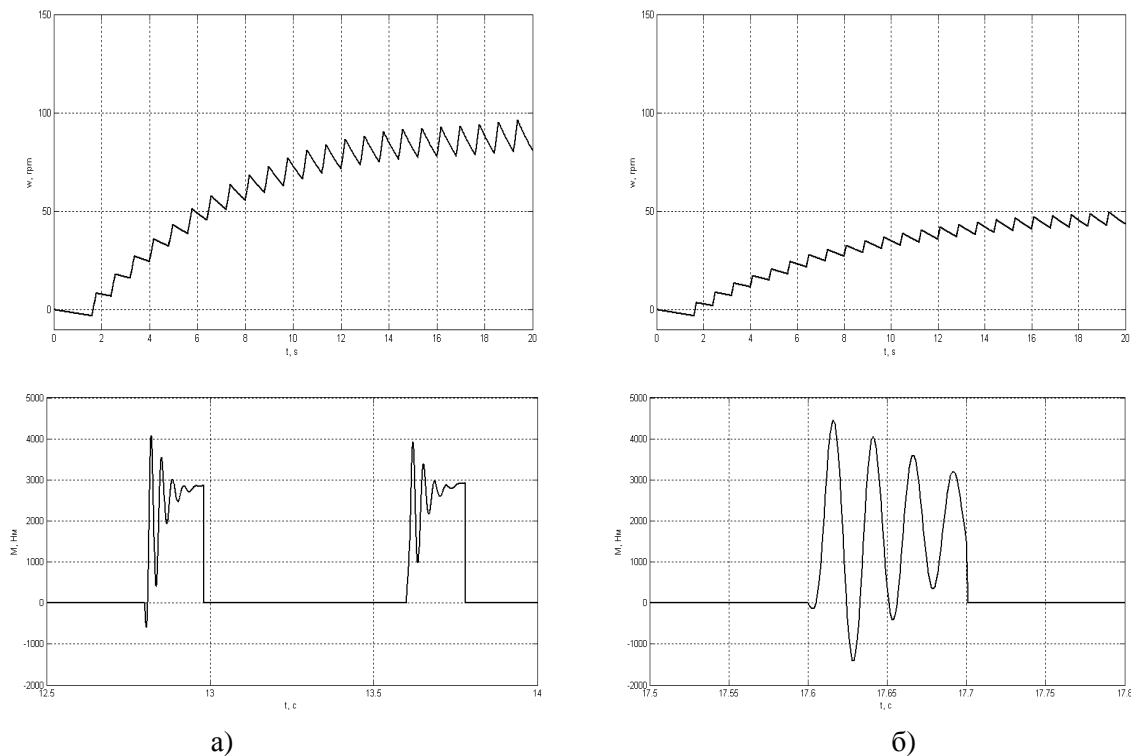


Рис. 4. Осциллограммы скорости и момента двигателя при импульсном регулировании:  
(а) при  $\gamma=0,25$ ;  $v_i = 0,5$  о.е. и (б) при  $\gamma=0,1$ ;  $v_i = 0,25$  о.е.

Величина потерь мощности скольжения в роторе при расчете составила незначительную величину. При составлении структурной модели импульсного регулирования в среде MatLab учитывались все необходимые параметры двигателя и параметры режима работы привода, система охвачена обратной связью. Исследования на математической модели показали устойчивость работы на всех уровнях скорости.

Дальнейшими разработками в направлении применения импульсного регулирования являются теоретические и практические исследования электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов, вопросы построения рациональных схем управления и уточнения всех показателей регулирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кречетович Н.Н. Электропривод с импульсным управлением скоростью асинхронного двигателя – М. «Электричество», 1956. – 367 с.
2. Роткоп Л.Л. Импульсный метод регулирования асинхронного двигателя с применением бесконтактной аппаратуры управления – М. «Вестник электропромышленности», 1958. – 275 с.
3. Петров Л.П. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров, О.А. Андрищенко, В.И. Капинос. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
4. Попович Н.Г. Электромеханические системы автоматического управления и электропривод / Лозинский А.Ю. Клепиков В.Б. – Киев, «Либідь», 2005. – 697 с.

#### Олейніков О.М., Проніна Г.К., Агафонов В.В. ІМПУЛЬСНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У СУДНОВОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

Розглядаються питання плавного регулювання швидкості короткозамкненого асинхронного двигуна в судновому електроприводі при тиристорному керуванні. Оцінюються принципові можливості здійснення такого регулювання за допомогою тиристорного комутатора.

*Ключові слова:* асинхронний двигун, плавне регулювання швидкості, тиристорний комутатор, імпульсне керування, показники регулювання.

**Oleynicov A.M., Pronina A.K., Agafonov V.V.**

**PULSE SPEED CONTROL OF INDUCTION MOTORS IN THE SHIP'S ELECTRIC DRIVE**

*Questions stepless speed short-circuited induction motor in the ship's motor drive with thyristor control. Estimated principal feasibility of such regulation with thyristor switch.*

**Keywords:** squirrel cage induction motor, stepless speed regulation, thyristor switch, impulse control, performance management.