

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В УСТРОЙСТВЕ ПЛАВНОГО ПУСКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Н. Н. Беспалов, Я. В. Синюков, А. М. Романов

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева,  
Тел. (834-2) 24-17-77, 24-37-05. E-mail: bnn48@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются результаты моделирования переходных процессов в тиристорных устройствах плавного пуска (УПП) электрических двигателей и в двигателях на интервале пуска с учетом влияния разброса значений параметров элементов снаберной  $RC$ -цепочки.

**Ключевые понятия:** тиристорные устройства пуска, асинхронный электродвигатель, снаберная  $RC$ -цепь, переходные процессы, моделирование.

### Постановка задачи

Пуск асинхронных двигателей (АД) непосредственным включением двигателя в сеть промышленной частоты сопровождается формированием пускового тока, величина которого всегда в несколько раз больше номинальной величины тока в установившемся режиме. Длительность воздействия этого тока при пуске электродвигателя зависит от момента сопротивления на его валу и при частых и тяжёлых пусках приводит к превышению допустимого уровня температуры обмоток, снижению электрической прочности изоляции и соответственно к межвитковым коротким замыканиям.

Одним из решений указанных проблем является выполнение плавного пуска электродвигателя, который может быть осуществлён двумя способами:

- 1) плавным изменением частоты и напряжения на двигателе (частотный пуск);
- 2) плавным изменением величины напряжения подаваемого на двигатель (фазовый пуск).

Частотный метод плавного пуска даёт возможность разгона вала АД по любому заданному закону, а также возможность регулирования оборотов его вала, что является неоспоримым преимуществом указанного способа пуска.

Следует отметить, что использование преобразователей частоты только для пусковых режимов нецелесообразно, так как их стоимость может превышать стоимость двигателя и для их настройки и обслуживания требуются специалисты высокой квалификации. Следует отметить также, что в настоящее время еще не созданы преобразователи частоты, способные работать непосредственно от высоковольтной промышленной сети.

УПП (рис. 1), реализующие фазовый метод пуска, целесообразно применять, когда нет острой необходимости регулирования скорости вращения электропривода во время его работы. В этом случае подобные УПП в сравнении с частотными преобразователями обладают следующими

преимуществами: значительно меньшие стоимость и потери от прямого падения напряжения на силовых элементах, простота схемы и, как следствие, большая надежность.

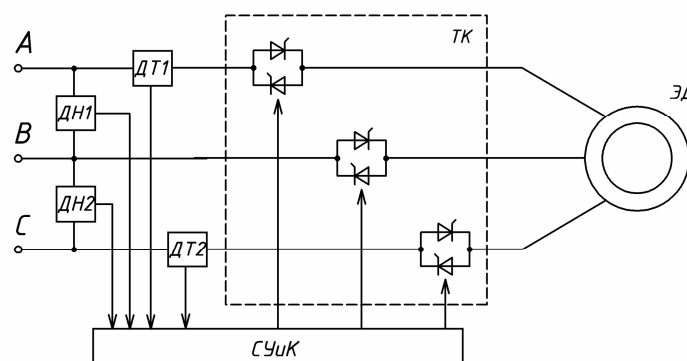


Рис. 1 – Функциональная схема устройства плавного пуска асинхронных электродвигателей

На рис. 1 представлена функциональная схема УПП электродвигателей, реализующих фазовый метод, где:

- СУиК – система управления и контроля;
- ТК – 3-х фазный тиристорный коммутатор;
- АД – приводной асинхронный двигатель;
- ДТ1, ДТ2 – датчики тока;
- ДН1, ДН2 – датчики напряжения.

При использовании высоковольтной промышленной сети свыше 3 кВ действующего значения ТК в УПП строится по схеме последовательного соединения тиристоров в плече (рис. 2).

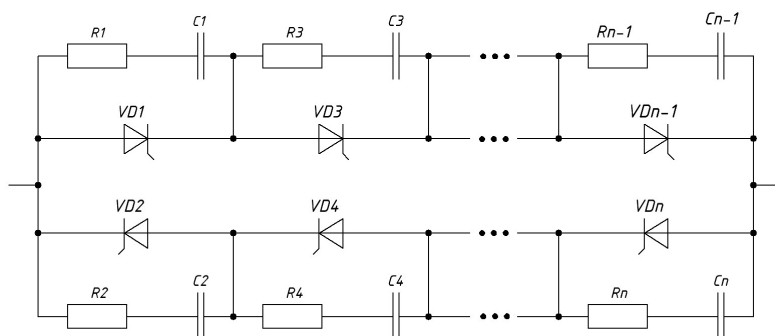


Рис. 2 – Схема тиристорного ключа

При эксплуатации УПП, подключаемых непосредственно к высоковольтной промышленной сети, наблюдаются отказы тиристоров. Исследование причин этих отказов является актуальной проблемой.

Целью данной работы является исследование переходных процессов в системах пуска с фазовым методом пуска и в двигателях на интервале пуска при влиянии разброса величин емкостей конденсаторов и сопротивлений резисторов снаберных RC-цепей.

## Метод решения

Для проведения исследования переходных процессов в системах пуска, реализующих фазовый метод пуска и выполненные на основе тиристорных преобразователей напряжения, и двигателях на интервале пуска при влиянии разброса величин емкостей конденсаторов и сопротивлений резисторов снабренных  $RC$ -цепей необходимо создать модель устройства плавного пуска АД и модель самого двигателя. В качестве среды моделирования был выбран программный продукт MultiSIM Professional 10, поскольку в названном программном продукте наиболее подробно описана работа силовых полупроводниковых приборов на основе языка PSpice.

В качестве исследуемого двигателя был выбран асинхронный двигатель 4АНК250М4У3. Данная модель двигателя широко применяется на различных предприятиях и достаточно хорошо изучена.

Технические данные асинхронного двигателя 4АНК250М4У3 [2]:

- номинальная мощность  $P_{2н} - 110$  кВт;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1н} - 380$  В;
- номинальное скольжение  $s_n - 3,5$ ;
- критическое скольжение  $s_k - 18$ ;
- синхронная частота вращения  $n_c - 1500$ ;
- коэффициент полезного действия  $\eta - 0,92$ ;
- коэффициент мощности  $\cos \varphi - 0,9$ ;
- момент инерции  $J - 0,96$  кг·м<sup>2</sup>;
- кратность пускового тока  $i_n - 6,5$ ;
- число пар полюсов  $p_n - 4$ .

В качестве модели асинхронного двигателя использована его Т-образная схема замещения (рис. 3), которая реализована с помощью моделей пассивных элементов в программной среде MultiSIM Professional 10. Методика расчёта Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя приведена в [3].

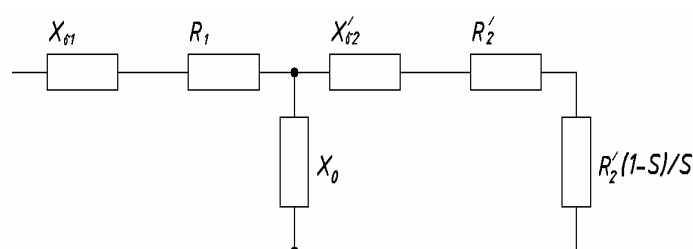


Рис. 3 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

На рис. 3 представлена Т-образная схема замещения асинхронного двигателя, где:

$X_{\sigma 1} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{\sigma 1}$  – индуктивное сопротивление рассеяния статора при  $S = 1$ ;

$R_1$  – активное сопротивление статора;

$X'_{\sigma 2} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L'_{\sigma 2}$  – индуктивное сопротивление рассеяния ротора при  $S = 1$ , приведённое к обмотке статора;

$R'_2$  – активное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора;

$X_0$  –главное индуктивное сопротивление;

$S$  – скольжение.

Основное отличие представленной на рис. 3 Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя от аналогичной схемы трансформатора состоит в том, что в ней ротор (вторичная обмотка) нагружен на сопротивление  $R'_2 \cdot (1 - S)/S$ , зависящее от скольжения  $S$  и, следовательно, от режимов работы двигателя [4].

В качестве модели тиристорного ключа использована структура, визуализация которой в MultiSIM показана на рис. 4. Для создания модели тиристора использована имеющаяся в MultiSIM модель диода по той причине, что она подробнее описывает процессы, происходящие в силовых полупроводниковых приборах (СПП) [5], а процессы выключения тиристора и диода практически одинаковы. С помощью ключа  $S1$  задаётся угол управления, сопротивление  $R_{u1}$  моделирует сопротивление утечки СПП. Модель, изображённую на рис. 4, выделена в подсистему *Tir* для упрощения дальнейшего её использования.

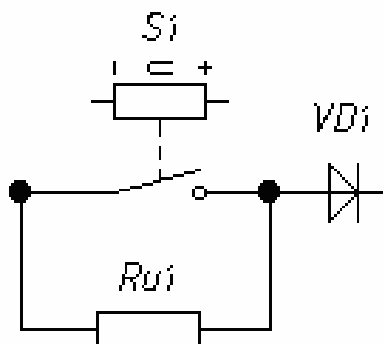


Рис. 4 – Визуализация математической модели тиристора в MultiSIM Professional 10

Как упоминалось выше, действующее значение номинального фазного напряжения  $U_{1н}$  моделируемого двигателя 4АНК250М4У3 равно 380 В. Учитывая, что предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на зажимах электроприёмников в соответствии с данными [6] составляют величины:  $\Delta U = (+5\%) ? (-10\%)$ , амплитуда напряжения питающей сети с учётом возможного максимального положительного отклонения может достигать значения равного 564 В. Действующее значение тока нагрузки моделируемой схемы равно 760 А. Исходя из допустимых значений сетевого напряжения и тока нагрузки в моделируемом тиристорном ключе, в качестве величин параметров модели тиристорного ключа для исследования использованы соответствующие величины параметров тиристора T253-1250. Его классификационные данные, приведённые в [7], следующие:

- средний ток в открытом состоянии  $I_{T(AV)} = 1250$  А;
- повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии  $U_{DRM}$  и повторяющееся импульсное обратное напряжение  $U_{RRM}$ :  $U_{DRM} = U_{RRM} = 400 \div 1200$  В;
- заряд обратного восстановления  $Q_{rr} = 1100$  мкКл при  $I_T = 1250$ ;
- время обратного восстановления  $t_{rr} = 30$  мкс при скорости спада тока в открытом состоянии  $di_T / dt = -5$  А/мкс;

Количество последовательно соединённых тиристоров в схеме эквивалентного вентиля определяется по формуле [7]:

$$n \geq \frac{U_{EM}}{U_{RRM} \cdot K_{\partial.н.} \cdot \psi_{UW}} = 1,825.$$

где  $n$  – число последовательно соединённых тиристоров в схеме эквивалентного вентиля;

$U_{EM}$  – наибольшая амплитуда рабочего напряжения, прикладываемого к эквивалентному вентилю в схеме преобразовательного устройства, В;

$K_{\partial.н.}$  – коэффициент равномерности деления напряжения по последовательно соединённым тиристорам, принят равным 0,8;

$\psi_{UW}$  – коэффициент нагрузки, принят равным 0,8.

Таким образом, число последовательно соединённых тиристоров в тиристорном ключе равно 2.

Режим  $RC$ -контура выбран апериодическим, что позволяет получить относительно низкую скорость нарастания напряжения  $du/dt$  на СПП в закрытом состоянии. С помощью методики расчёта снаберной  $RC$ -цепи, которая приведена в [7], для этого случая было установлено, что для сопротивление резистора демпфирующей цепочки должно быть равно 160 Ом, ёмкость конденсатора – 0,47 мкФ.

При апериодическом режиме работы  $RC$ -контура обратное напряжение на тиристоре определяется по формуле:

$$u_{AK} = U_K + \left( A_2 \cdot e^{\lambda \cdot t} + B_2 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \right) \cdot e^{-b \cdot t} + D_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (1)$$

где

$$A_2 = U_K \cdot \left( \frac{R}{4 \cdot \lambda \cdot L} - \frac{1}{2} \right) + I_{rr} \cdot \left( \frac{R \cdot \tau_i + 2 \cdot L - R^2 \cdot C}{4 \cdot \lambda \cdot (\tau_i^2 - R \cdot C \cdot \tau_i + L \cdot C)} - \frac{L \cdot \tau_i + R \cdot L \cdot C}{2 \cdot (\tau_i^2 - R \cdot C \cdot \tau_i + L \cdot C)} \right);$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{R^2}{4 \cdot L^2} - \frac{1}{L \cdot C}};$$

$$B_2 = -U_K \cdot \left( \frac{R}{4 \cdot \lambda \cdot L} + \frac{1}{2} \right) - I_{rr} \cdot \left( \frac{R \cdot \tau_i + 2 \cdot L - R^2 \cdot C}{4 \cdot \lambda \cdot (\tau_i^2 - R \cdot C \cdot \tau_i + L \cdot C)} + \frac{L \cdot \tau_i + R \cdot L \cdot C}{2 \cdot (\tau_i^2 - R \cdot C \cdot \tau_i + L \cdot C)} \right);$$

$$D_1 = I_{rr} \cdot \frac{L \cdot \tau_i - R \cdot L \cdot C}{(\tau_i^2 - R \cdot C \cdot \tau_i + L \cdot C)}.$$

При выбранных значениях параметров обратное напряжение на тиристоре в соответствии с (1) определяется в виде:

$$u_{AK} = 282 + \left( 247 \cdot e^{10^5 \cdot t} - 189 \cdot e^{-10^5 \cdot t} \right) \cdot e^{-1,13 \cdot 10^5 \cdot t} - 170 \cdot e^{-\frac{t}{36 \cdot 10^{-6}}}. \quad (2)$$

Форма обратного напряжения, рассчитанная по (2) показана на рис. 5. Полученный результат близок к оптимальному в отношении потерь в схеме и параметров  $RC$ -контура.

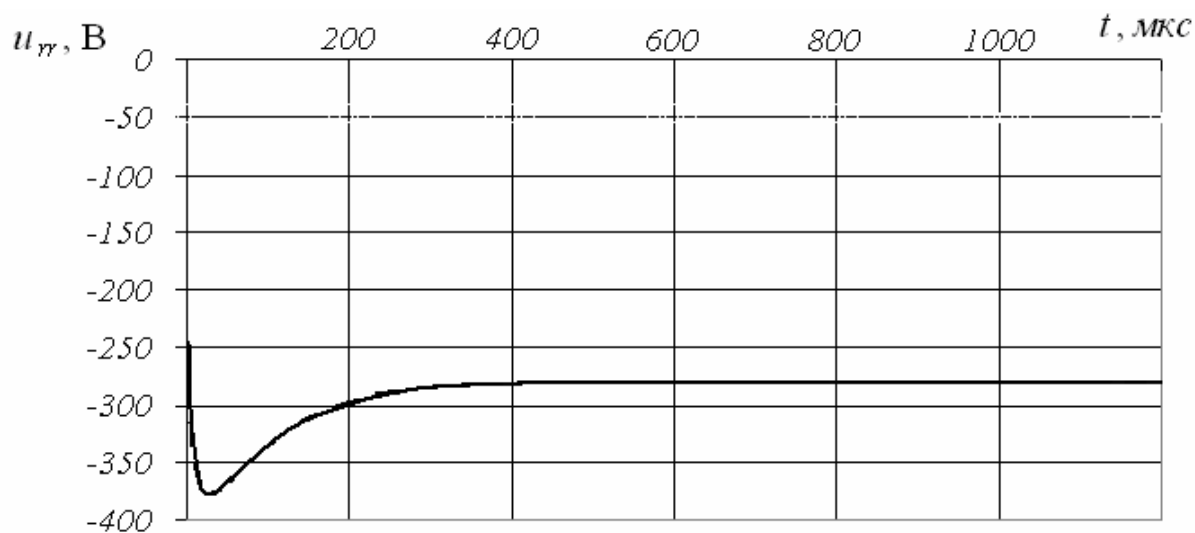


Рис. 5 – Временная зависимость обратного напряжения на тиристоре при аperiodическом процессе демпфирования

Имеющийся в начальный момент выключения тиристора выброс напряжения можно убрать, повышая значение емкости снаберной цепи, однако это приводит к увеличению разрядного тока, протекающего через прибор в это же время, что увеличивает вероятность теплового пробоя вентиля.

После выполненных расчётов получена модель (рис. 6), с помощью которой возможно исследование переходных процессов в системах пуска, реализующих фазовый метод пуска и выполненные на основе тиристорных преобразователей напряжения, и двигателях на интервале пуска при влиянии различных факторов.

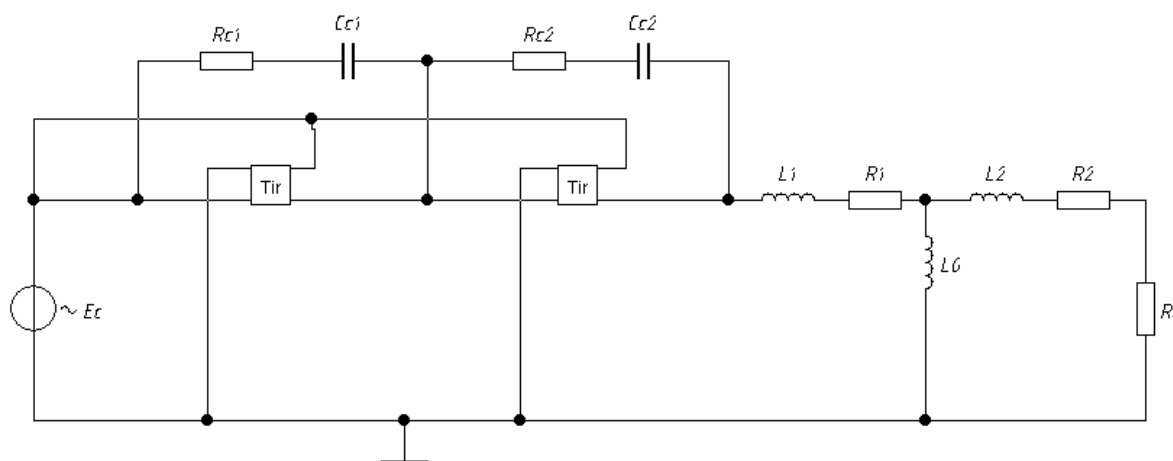


Рис. 6 – Визуализация модели простейшего устройства плавного пуска асинхронных электродвигателей в среде MultiSIM

На рис. 6 представлена визуализация модели простейшего устройства плавного пуска асинхронных электродвигателей в MultiSIM, где:

$E_c$  – напряжение сети;

$R_{c1}, R_{c2}, C_{c1}, C_{c2}$  – активное и емкостное сопротивление снаберных  $RC$ -цепей;

$R_1, L_1$  – активное и индуктивное сопротивление рассеяния статора при  $S = 1$ ;

$L_2$  – индуктивное сопротивление рассеяния ротора при  $S = 1$ , приведённое к обмотке статора;

$R_2$  – активное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора;

$L_0$  – главное индуктивное сопротивление;

$R_l$  – сопротивление нагрузки.

На рис. 7 представлена диаграмма напряжений на тиристоре в номинальном режиме работы при равных значениях параметров тиристоров и снаберной  $RC$ -цепи. Угол управления равен 85 электрических градусов.

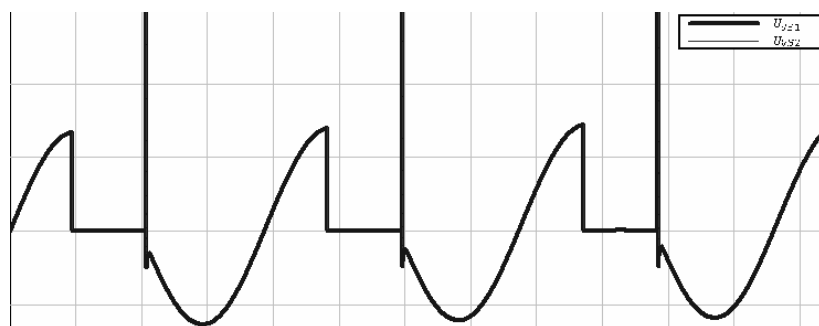


Рис. 7 – Форма напряжения на тиристоре при одинаковых параметрах снаберных  $RC$ -цепей и параметрах самих приборов

Результаты моделирования, представленные на рис. 7, показали, что в момент выключения тиристора на нём возникает импульс напряжения, скорость нарастания которого на тиристоре в закрытом состоянии достигает величины свыше 180 кВ/мкс, что значительно превышает критическое значение.

На рис. 8 представлены диаграммы тока вентиля и напряжения на вентиле в начале (угол управления 155 электрических градусов) и конце (угол управления 20 электрических градусов) процесса пуска электродвигателя при одинаковых параметрах снаберных  $RC$ -цепей и параметрах самих приборов, входящих в состав УПП. Из данных расчёта, представленных на рис. 8 получено, что процессе пуска электродвигателя в момент выключения тиристора напряжение на нём скачком изменяется. Значения скорости нарастания напряжения в начале пуска – 140 кВ/мкс, в конце пуска –  $6 \cdot 10^3$  кВ/мкс), прикладываемого к тиристору в прямом направлении в момент его выключения, а амплитуды этого напряжения на СПП в закрытом состоянии более 15 кВ, что значительно больше предельно допустимых значений соответствующих параметров выбранного тиристора. Это является одной из возможных причин выхода тиристорov из строя.

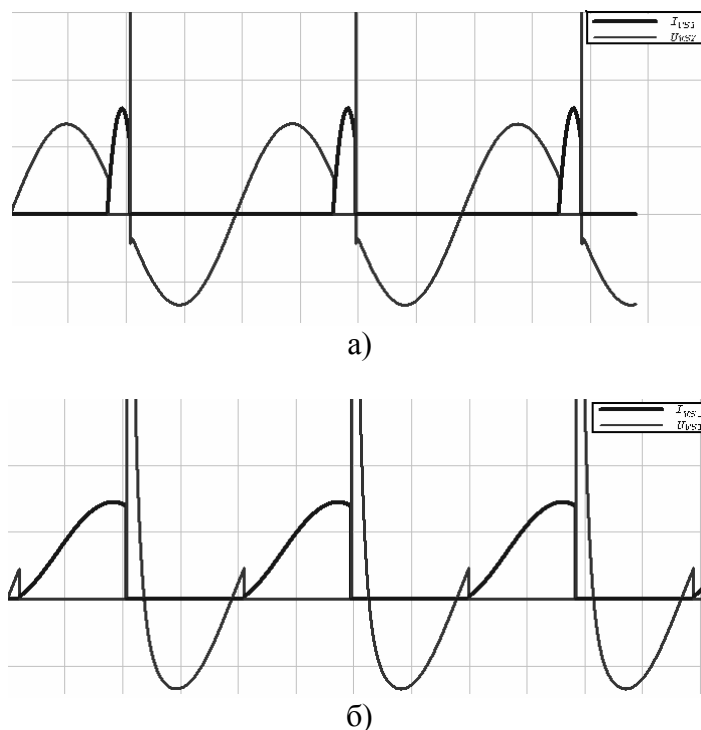


Рис. 8 – Форма тока ( $I_{VS1}$ ) тиристора и напряжения ( $U_{VS1}$ ) на тиристоре при одинаковых параметрах снабрных  $RC$ -цепей и параметрах самих приборов в начале (а) и конце (б) процесса пуска электродвигателя

Кроме того, импульс напряжения, обусловленный выбросом энергии в момент выключения тиристора, накопленной в обмотках двигателя, может привести к выходу из строя не только тиристора, но и самого двигателя. На рис. 9 представлены диаграммы напряжений на тиристоре ( $U_{VS1}$ ) и электродвигателе ( $U_{dv}$ ) при угле управления 20 электрических градусов. На представленном рис. 9 видно, что в момент запириания тиристора к двигателю прикладывается большое по величине (более 15 кВ) и скорости нарастания (более 15 кВ/мкс) напряжение, которое может привести межвитковому короткому замыканию обмоток двигателя.



Рис. 9 – Форма напряжения на тиристоре ( $U_{VS1}$ ) и электродвигателе ( $U_{dv}$ ) при одинаковых параметрах снабрных  $RC$ -цепей и параметрах самих приборов в конце процесса пуска электродвигателя



В отрицательный полупериод питающего напряжения через тиристор протекает только ток прибора в состоянии низкой проводимости, пренебрежимо малый по сравнению с током через снаберную  $RC$ -цепь. Схема замещения тиристора в состоянии низкой проводимости – активное сопротивление. Оценим величину этого сопротивления. Типовое значение амплитуды тока тиристора в состоянии низкой проводимости при температуре структуры  $T_j = 25^\circ\text{C}$  равно  $I_{rm} \leq 200$  мкА. При напряжении питания 380 В и одинаковых параметрах тиристора и параметрах снаберной  $RC$ -цепи к каждому тиристорному прикладывается напряжение, максимальное амплитудное значение которого равно 282 В. Тогда сопротивление тиристора равно:

$$R_{VD} = \frac{U_{rm}}{I_{rm}} > 1 \text{ МОм.} \quad (3)$$

Тогда эквивалентная схема моделируемой цепи в случае, когда тиристор находится в состоянии низкой проводимости (в отрицательный полупериод питающего напряжения) будет выглядеть так, как показано на рис. 10.

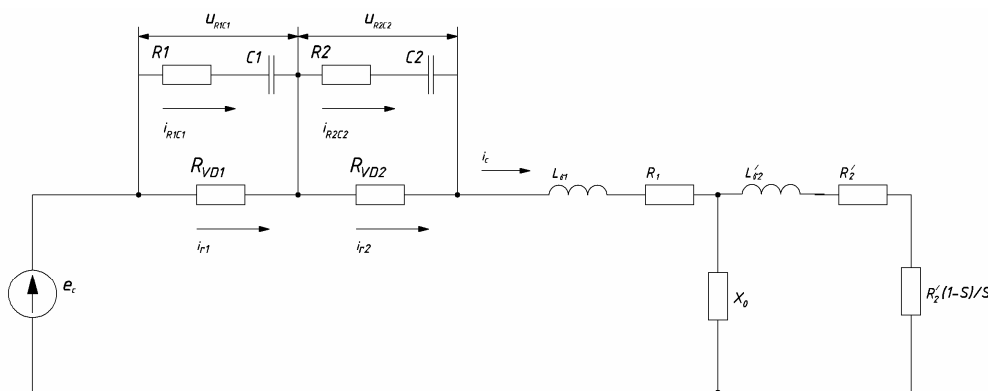


Рис. 10 – Эквивалентная схема УПП в момент нахождения тиристорных в состоянии низкой проводимости

На рис. 10 представлена эквивалентная схема УПП в момент нахождения тиристорных в состоянии низкой проводимости, где:

$e_c$  – напряжение сети;

$u_{R1C1}, u_{R2C2}$  – напряжения на снаберных  $RC$ -цепях;

$i_{R1C1}, i_{R2C2}$  – токи через снаберные  $RC$ -цепи;

$i_{r1}, i_{r2}$  – ток тиристора в состоянии низкой проводимости;

$i_c$  – ток сети;

$R_{VD1}, R_{VD2}$  – эквивалентная схема замещения тиристора в состоянии низкой проводимости;

$R_1, R_2, C_1, C_2$  – активное и емкостное сопротивление снаберных  $RC$ -цепей;

$R_1, L_{\sigma 1}$  – активное и индуктивное сопротивление рассеяния статора при  $S = 1$ ;

$L'_{\sigma 2}$  – индуктивное сопротивление рассеяния ротора при  $S = 1$ , приведённое к обмотке статора;

$R'_2$  – активное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора;

$X_0$  –главное индуктивное сопротивление;

$S$  – скольжение.

Емкостное сопротивление конденсатора определяется выражением:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}. \quad (4)$$

Силовые конденсаторы выпускаются с допуском отклонения емкости от номинала  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ . В таблице 1 представлена зависимость емкостного сопротивления конденсатора от значения емкости при частоте питающей сети 50 Гц при разбросе емкости на  $\pm 1\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  от номинальной величины. Величина емкостного сопротивления конденсатора рассчитана по формуле (2). В таблице 1 также показано напряжение на конденсаторе, выраженное в относительных единицах относительно напряжения на конденсаторе номинальной емкости.

Как видно из таблицы 1, емкостное сопротивление намного меньше сопротивления тиристора в состоянии низкой проводимости. Таким образом, напряжение на снаберной RC-цепочке и равное ей напряжение на тиристоре определяется напряжением, формируемым на конденсаторе снаберной RC-цепи.

С помощью созданной в MultiSIM модели (рис. 6) было исследовано влияние разброса величин емкостей конденсаторов снаберных RC-цепей  $\Delta C$  на распределение напряжения на тиристорах при их последовательном соединении. Значение разброса величин емкостей  $\Delta C$  выразим через проценты от номинальной величины. За номинальную величину принято значение емкости 0,47 мкФ. Тогда величину  $\Delta C$  можно определить по формуле:

$$\Delta C = \frac{|C_2 - C_1|}{0,47} \cdot 100\%.$$

В таблице 2 показаны значения  $\Delta C$  в зависимости от величины емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ .

Таблица 1 – Зависимость емкостного сопротивления от значения емкости при частоте питающей сети 50 Гц.

№ п/п	Величина емкости $C$ , мкФ	Отклонение от номинала, %	Емкостное сопротивление $X_C$ , кОм	Падение напряжения на конденсаторе, отн. ед.
1	0,376	- 20	8,5	1,2
2	0,423	- 10	7,5	1,1
3	0,4465	- 5	7,1	1,05
4	0,4653	- 1	6,8	1,01
5	0,47	0	6,8	1
6	0,4747	+ 1	6,7	0,99
7	0,4935	+ 5	6,5	0,95
8	0,517	+ 10	6,2	0,9
9	0,564	+ 20	5,6	0,8

Таблица 2 – Разброс величин емкостей конденсаторов демпфирующих цепочек  $\Delta C$ , % от номинального значения 0,1 мкФ.

		$C_2$ , мкФ				
		0,47	0,4747	0,4935	0,517	0,564
$C_1$ , мкФ	0,47	0	+1	+5	+10	+20
	0,4653	-1	2			
	0,4465	-5		10		
	0,4653	-10			20	
	0,376	-20				40

На рис. 11 представлена зависимость амплитудного значения напряжения на СПП  $U_{rm}$  при последовательном соединении тиристоров при разбросе величин емкостей демпфирующих цепочек  $\Delta C$ .

Из рис. 11 видно, что разброс величин емкостей снаберных  $RC$ -цепей оказывает большое влияние на распределение напряжения на тиристорах при их последовательном соединении и при  $\Delta C$  равном 40% разница между напряжениями на тиристорах может составлять более 140 В, то есть 50% напряжения, прикладываемого к тиристорам в номинальном режиме, что подтверждает приведенные выше предположения о влиянии разброса величин емкостей конденсаторов снаберных  $RC$ -цепей  $\Delta C$  на распределение напряжения на тиристорах при их последовательном соединении. Форма напряжений на тиристорах для этого случая представлена на рис. 12.

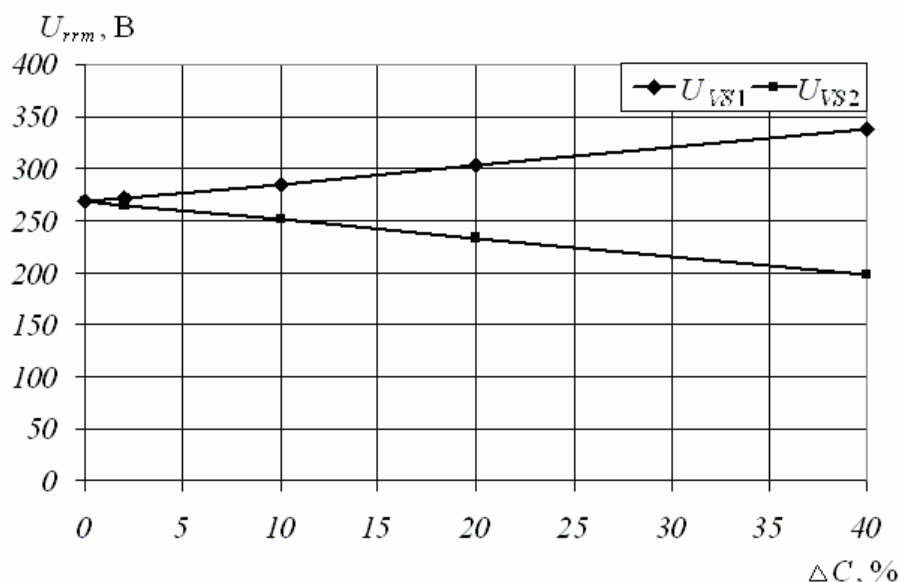


Рис. 11 – Зависимость амплитудного значения напряжения  $U_{rm}$  на тиристорах при последовательном соединении вентилей при разбросе величин емкостей конденсаторов снаберных  $RC$ -цепей  $\Delta C$

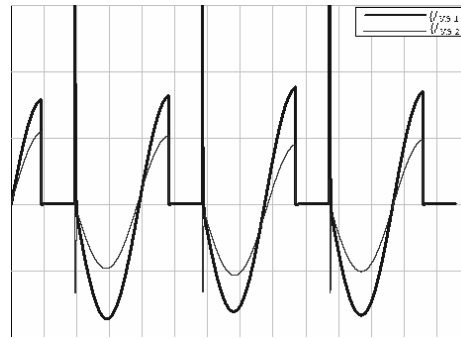


Рис. 12 – Форма напряжения на тиристорах при разбросе емкостей конденсаторов снаберных  $RC$ -цепей  $\Delta C$ , равном 40% от номинальной величины ёмкости конденсатора 0,47 мкФ

Из рис. 12 видно, что кроме различия в амплитуде напряжений на тиристорах при разбросе емкостей конденсаторов снаберных  $RC$ -цепей  $\Delta C$  имеется различие в величине  $du/dt$  в момент выключения прибора, что объясняется разной величиной постоянной времени каждой из снаберных цепочек. У тиристора  $VS2$ , ёмкость снаберной цепочки которого больше, скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии  $du/dt$  (400 В/мкс) значительно больше, чем у тиристора  $VS1$  (0,2 В/мкс), ёмкость снаберной цепочки которого меньше. Таким образом, прибор, имеющий меньшую ёмкость снаберной  $RC$ -цепочки, может выйти из строя не только по причине превышения повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии  $U_{DRM}$  и повторяющегося импульсного обратного напряжения  $U_{RRM}$ , но и из-за превышения скорости нарастания напряжения в закрытом состоянии по причине  $du/dt$  критического значения.

Исследование влияния разброса значений сопротивлений резисторов снаберных  $RC$ -цепей  $\Delta R$  показало, что величина напряжения на СПП в состоянии низкой проводимости пренебрежимо мало зависит от значения  $\Delta R$ , ввиду того, что падение напряжение на резисторе снаберной  $RC$ -цепи значительно меньше падения напряжения на конденсаторе демпфирующей цепочки, то есть, как уже отмечалось выше, напряжение на снаберной  $RC$ -цепочке и равное ей напряжение на СПП определяется напряжением, формируемом на конденсаторе снаберной  $RC$ -цепочки. Форма напряжений на СПП при разбросе значений сопротивлений снаберных  $RC$ -цепей  $\Delta R$  равном 40% от номинальной величины сопротивления резистора 160 Ом представлена на рис. 13. При этом сопротивление  $R1$  снаберной  $RC$ -цепочки тиристора  $VS1$  равно 128 Ом, сопротивление  $R2$  снаберной  $RC$ -цепочки тиристора  $VS2$  – 192 Ом.

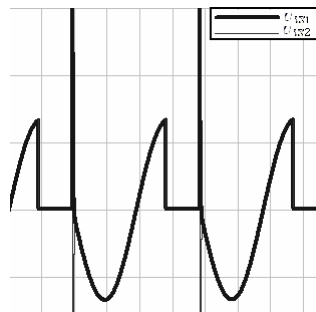


Рис. 13 – Форма напряжения на тиристоре при разбросе сопротивления резисторов снаберных  $RC$ -цепей  $\Delta R$ , равном 40% от номинальной величины сопротивления резистора 160 Ом

Анализ данных результатов исследования, представленного на рис. 13, свидетельствует, что уменьшение сопротивления демпфирующей цепочки приводит к снижению скорости нарастания напряжения на тиристоре, находящимся в состоянии низкой проводимости ( $(du/dt)_{VS1} = 0,5$  В/мкс,  $(du/dt)_{VS2} = 800$  В/мкс). Таким образом, разброс значений сопротивления демпфирующих цепочек может привести к превышению скорости нарастания напряжения на тиристоре, имеющего меньшее сопротивление снаберной  $RC$ -цепи, более его критической величины  $(du/dt)_{crit}$ , что может являться причиной выхода этого тиристора из строя.

### Выводы

1. Величина разброса значений емкостей  $\Delta C$  конденсаторов снаберных  $RC$ -цепочек определяет значение напряжения на тиристоре в состоянии низкой проводимости и величину скорости нарастания напряжения скорости нарастания напряжения  $du/dt$  на нём, находящимся в состоянии низкой проводимости.

2. Разброс величин сопротивлений  $\Delta R$  резисторов снаберных  $RC$ -цепочек оказывает большое влияние на величину скорости нарастания напряжения  $du/dt$  на тиристоре, находящимся в состоянии низкой проводимости.

3. Возникающий в момент запираания импульс напряжения, обусловленный выбросом энергии в момент выключения тиристором, накопленной обмотках двигателя, может привести к выходу из строя электродвигателя.

4. При практическом исполнении устройств плавного пуска для обеспечения их надёжности необходим тщательный подбор величин емкостей конденсаторов и сопротивлений резисторов снаберных  $RC$ -цепей.

5. На основе данного предварительного исследования появляется возможность определения причин отказов тиристором пусковых устройств и двигателей на интервале пуска и наметить пути введения дополнительных мер по их защите.

### Список использованных источников

1. Масандилов, Л. Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей / Л. Б. Масандилов, В. В. Москаленко. – М. : Энергия, 1978. – 96 с.

2. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик [и др.]. – М. : Энергоиздат, 1983. – 504 с., ил.

3. Суптель А. А. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: Учеб. пособие / А. А. Суптель. – Чебоксары : Издательство Чувашского университета, 2000. – 164 с. – ISBN 5-7677-0372-8.

4. Карлашук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronic Workbench и её применение / В. И. Карлашук. – М. : Солон-Р, 2001. – 726 с. – ISBN 5-93455-083-7.

5. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и P-Spice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 выпусках. Вып. 2: Модели

компонентов аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – 64 с. – ISBN 5-256-01090-5.

6. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-87; введ. 16.12.1987 до 01.01.1999. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 35 с.

7. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник / О. Г. Чебовский [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 400 с., ил.

8. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках / М. И. Абрамович [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 432 с. – ISBN 5-283-00670-0.

### **Сведения об авторах**

***Беспалов Николай Николаевич*** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, e-mail: [bnn48@mail.ru](mailto:bnn48@mail.ru)

***Синюков Ярослав Владимирович*** – студент 5 курса факультета электронной техники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, научный руководитель – ***Беспалов Николай Николаевич***, e-mail: [fet\\_2009@mail.ru](mailto:fet_2009@mail.ru)

***Романов Андрей Михайлович*** – студент 5 курса факультета электронной техники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, научный руководитель – ***Беспалов Николай Николаевич***, e-mail: [romanovam\\_box@mail.ru](mailto:romanovam_box@mail.ru)