

ДИНАМИКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРИ ПООЧЕРЕДНОМ ПУСКЕ ОТ ОДНОГО ПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА

В настоящее время в качестве пусковых устройств для асинхронных приводных двигателей (АД) используются тиристорные преобразователи напряжения (ТПН – "софтстартеры" или устройства плавного пуска) и преобразователи частоты (ПЧ). Главными целями управляемого пуска являются ограничение пускового тока АД с целью уменьшения ударных нагрузок в сетях и ускорения с целью уменьшения динамических нагрузок в механизмах и механических передачах. При использовании обратных связей по скорости возможна реализация сложных траекторий движения при пуске и останове, например с ограничением второй производной скорости – рывка. Стоимость пусковых устройств достаточно высока и поэтому при нечастых пусках для уменьшения капитальных затрат применяют одно пусковое устройство для последовательного пуска нескольких двигателей. Такой способ применяется для пуска нескольких секций транспортеров, нескольких компрессоров, насосов или вентиляторов. При этом, кроме пускового устройства, требуется по два магнитных пускателя или контактора на каждый двигатель. Современные программируемые устройства плавного пуска предоставляют пользователям множество вариантов пуска для выбора оптимального по заданным техническим условиям. В то же время остается неучтенным и неуправляемым процесс переключения АД от пускового устройства на питающую сеть. При неблагоприятных сочетаниях начальных электромагнитных условий подключения АД к сети заданные условия процесса пуска могут быть в значительной степени искажены или даже сорваны, хотя визуально процесс переключения может оцениваться положительно.

В работе рассматриваются процессы, протекающие в электроприводе на выбеге и при переключении на сеть и возможности управления этими процессами. Исследования проводились методом математического моделирования с применением программного комплекса Matlab и прикладного пакета Simulink. Для поставленных целей исследования асинхронный двигатель рассматривается в виде двухфазной обобщенной электрической машины, представленной в неподвижных координатных осях $\alpha\beta$. В модели учтено насыщение стали по путям главного магнитного потока и путям рассеяния, а также эффект вытеснения тока в стержнях обмотки ротора.

Поставлены следующие задачи исследований:

- оценка влияния скорости на процесс подключения к сети при нулевых начальных электромагнитных условиях (НЭМУ);
- описание процесса выбега АД;
- оценка влияния ненулевых НЭМУ и определение благоприятных и неблагоприятных условий подключения АД к сети при ненулевых НЭМУ;
- разработка рекомендаций по обеспечению благоприятных условий подключения АД к сети с учетом возможностей ТПН и ПЧ и использования контактной аппаратуры;
- оценка влияния мощности двигателя на переходные процессы подключения к сети;

С целью оценки последнего, моделирование производилось для двигателей трех мощностей – небольшой мощности 4 кВт, средней 55 кВт и большой мощности 315 кВт. Все величины на осциллограммах представлены в относительных единицах, где за базу приняты номинальный момент, амплитуда номинального тока и синхронная скорость двигателя. Для удобства наблюдения графики скорости приводятся с пятикратным увеличением.

Подключение двигателя к сети с нулевыми НЭМУ. Подключению к сети предшествует срабатывание двух контактных аппаратов, поэтому имеет место процесс выбега, в течение которого скорость электропривода может значительно снизиться, вплоть до полной остановки. Относительно большое время выбега может также приводить к полному затуханию магнитного потока ротора. Поэтому предельным случаем подключения двигателя к сети является повторное включение с нулевыми НЭМУ. На рис. 1 приведены осциллограммы повторного включения АД при различных скольжениях. Поскольку нас интересуют амплитуды тока и момента в начальной фазе включения, показаны только первые 10 периодов после включения. По представленным осциллограммам можно сделать следующие выводы. Наиболее благоприятные условия для подключения к сети существуют на рабочем участке механической характеристики, от скольжения, близкого к нулю до критического. В этом диапазоне у всех двигателей формируется колебательный затухающий момент с амплитудой от 2Мн до 3Мн. Время затухания электромагнитного момента больше у двигателей большей мощности. Амплитуды тока доходят до 4-6 от амплитуды номинального тока. Во всех остальных случаях формируются моменты и токи большего значения, доходящие до пусковых значений при $s=1$.

Ненулевые электромагнитные условия асинхронного двигателя. Полагаем, что переключение двигателя на сеть происходит после завершения пуска и достижения установившегося режима с заданным моментом нагрузки. Перед отключением записываем конечные значения вектора потокоцепления ротора $\Psi_{20 \text{ кон}}$ и $\Psi_{2f \text{ кон}}$, скорости и вектора напряжения сети $U_{10 \text{ кон}}$ и $U_{1f \text{ кон}}$. Во всех случаях установившегося режима вектор пото-

косцепления отстает от вектора напряжения примерно на 90 эл. град, а ЭДС статора на 180 эл. град. Отметим, что в данном случае уточнение пространственного расположения вектора потокоосцепления не имеет решающего значения.

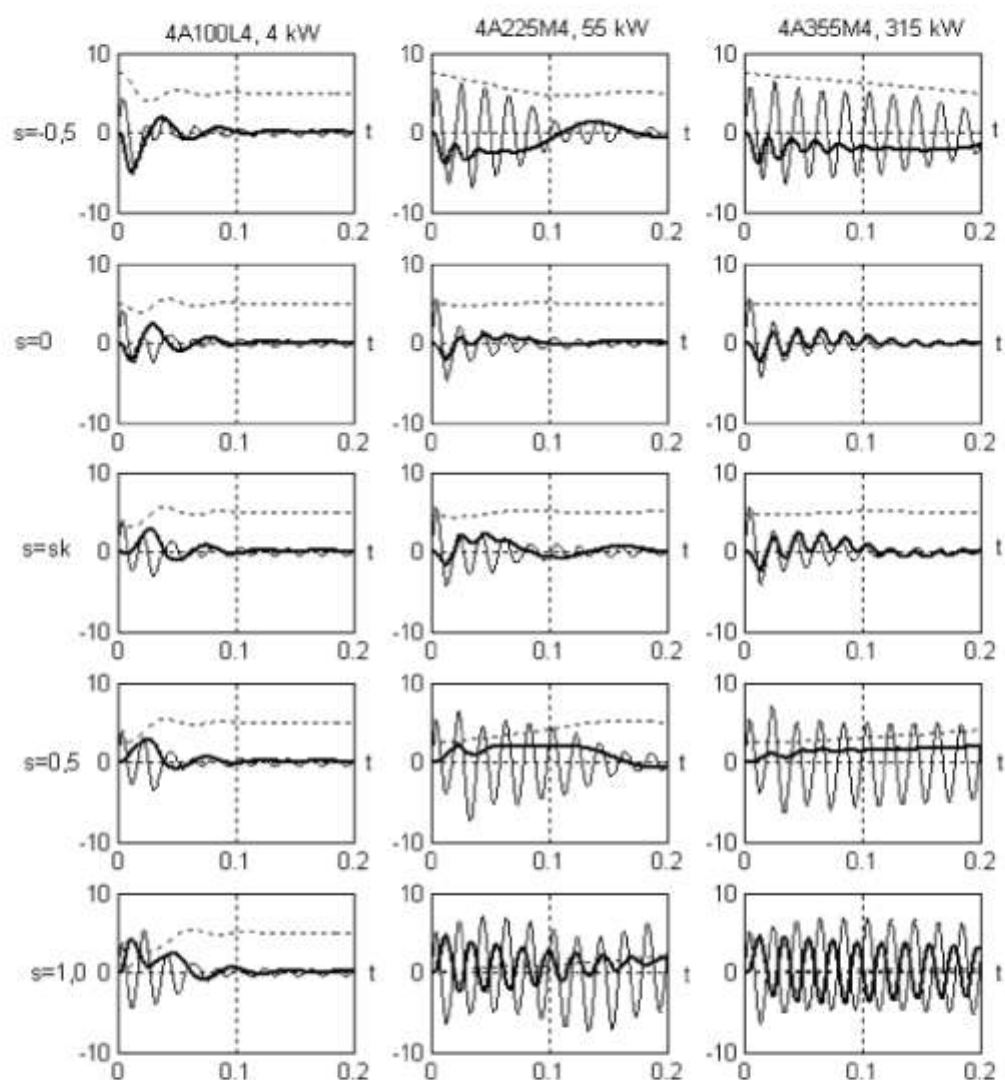


Рис. 1. Осциллограммы повторного включения АД с нулевыми электромагнитными начальными условиями при скольжениях от 1 до -0,5

----- скорость ротора;
 ————— электромагнитный момент;
 ————— ток фазы статора

Переходный процесс выбега АД. После отключения ток статора приравнивается к нулю и решаются только уравнения электрического равновесия ротора и механического равновесия

$$0 = i_{2\alpha} r_2 + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \omega \psi_{2\beta}; \quad 0 = i_{2\beta} r_2 + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} - \omega \psi_{2\alpha}; \quad 0 - M_C = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{1}{p}. \quad (1)$$

где начальные значения проекций вектора тока ротора вычисляются по конечным значениям проекций вектора потокоосцепления ротора

$$i_{2\alpha \text{ нач}} = \psi_{2\alpha \text{ кон}} \cdot \frac{\omega_0}{x_r}; \quad i_{2\beta \text{ нач}} = \psi_{2\beta \text{ кон}} \cdot \frac{\omega_0}{x_r}. \quad (2)$$

Система уравнений дополняется уравнениями ЭДС статора и напряжения на контакте (закрытых тиристорах). В данном случае используем только одну ось для визуализации фазных величин.

$$E_{1\alpha} = \frac{di_{2\alpha}}{dt} \cdot \frac{x_0}{\omega_{01}}; \quad (3)$$

$$U_{k\alpha} = U_{1\alpha} - E_{1\alpha}. \quad (4)$$

Известно, что при отключении АД от источника питания, обнуляется только ток статора, магнитное поле ротора сохраняется неизменным и после отключения становится неподвижным относительно ротора. В процессе выбега это поле вращается вместе с ротором и затухает по амплитуде в соответствии с постоянной времени

$$T_s = \frac{x_0 + x_2}{r_2 \omega_0}. \quad (5)$$

Для рассматриваемых двигателей эта постоянная времени равна соответственно 0,153с; 0,92с и 1,33с.

Поле ротора наводит в обмотке статора трехфазную, затухающую по амплитуде систему ЭДС с частотой, пропорциональной частоте вращения ротора. С учетом постоянных времени полное затухание ЭДС на обмотках статора следует ожидать примерно через $3T_s$, то есть через 0,46с, 2,76с и 3,99с. ЭДС уменьшается также за счет уменьшения скорости ротора на выбеге, поэтому при сильном замедлении двигателя ЭДС может затухнуть за меньшее время. Взаимодействие векторов напряжения сети и ЭДС, вращающихся с разными частотами приводит к возникновению на разомкнутом контакте (закрытых тиристорах) напряжения своеобразной формы, подробно описанной в [1]. При совпадении векторов наблюдается "пучность" напряжения, а в противофазе "узел" напряжения. С учетом того, что в установившемся режиме эти векторы находятся примерно в противофазе, в момент отключения АД от сети всегда наблюдается узел напряжения на контакте. После полного затухания ЭДС напряжение на контакте становится равным фазному напряжению, рис. 2.

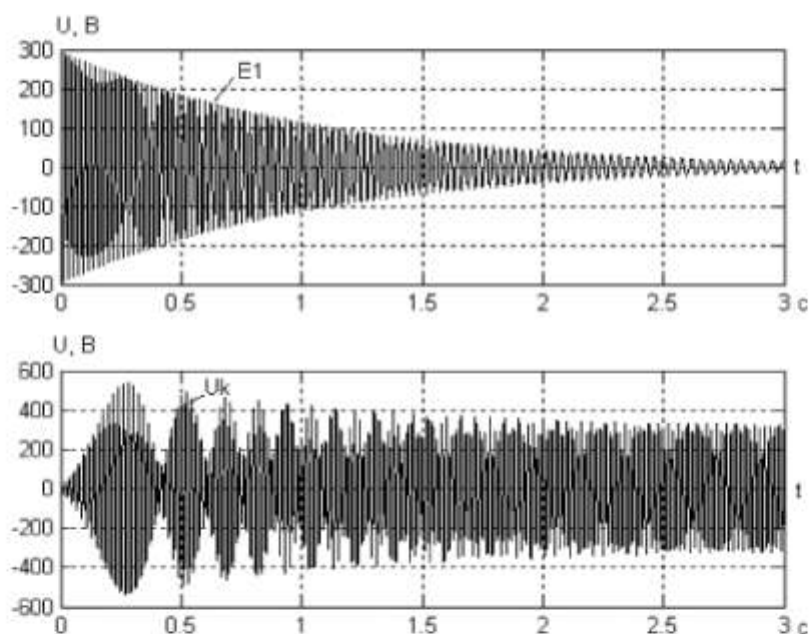


Рис. 2. Осциллограммы ЭДС статора и напряжения на закрытых тиристорах на выбеге двигателя 4A355M4
 $J_{\Sigma}=1,5\text{Дж}$; $M_c=0,15\text{Мн}$

Время наступления узлов и пучностей в процессе выбега в общем случае

$$t = \frac{J_{\Sigma}}{M_c p} \left(\omega_{\text{нач}} p - \omega_0 + \sqrt{(\omega_0 - \omega_{\text{нач}} p)^2 - \frac{2M_c p}{J_{\Sigma}} \pi(1-N)} \right), \quad (6)$$

где J_{Σ} и M_c - суммарный момент инерции и момент нагрузки электропривода; p - число пар полюсов; ω_0 и $\omega_{\text{нач}}$ - синхронная скорость электрическая и начальная скорость ротора механическая. При отключении двигателя в установившемся режиме $\omega_{\text{нач}} = \omega_c$; N - целое число, начиная от 1.

Для нечетных значений ($N=1, 3, 5, \dots$) получаем значения времени наступления узлов в кривой напряжения на контакте. Для четных значений ($N=2, 4, 6, \dots$) получаем значения времени наступления пучностей. Если задавать дробные значения N , то можно определять время наступления не только для коллинеарного расположения векторов. Например, при последовательности $N=1; 1,5; 2; 2,5 \dots$, можно определять время наступления

условий, когда взаимное расположение векторов изменяется с шагом $\pi/2$.

Благоприятные и неблагоприятные условия подключения АД к сети. В случае совпадения результирующих трехфазных векторов напряжения сети и ЭДС статора процесс подключения будет проходить наиболее жестко под действием суммы напряжения сети и ЭДС, с большими токами, пиками момента и колебаниями скорости. И наоборот, подключение АД к сети в момент времени, когда векторы напряжения сети и ЭДС находятся в противофазе, вызовет более мягкий переходный процесс. В этом смысле будем называть условия включения благоприятными или неблагоприятными. В соответствии с картиной напряжения на контакте во время выбега благоприятные условия включения соответствуют узлам, а неблагоприятные условия пучностям кривой напряжения на контакте.

Иллюстрация переходных процессов при благоприятных и неблагоприятных НЭМУ приведена на рис. 3. Здесь, на фоне графика напряжения на контакте, приводятся переходные процессы, отличающиеся выдержкой времени между отключением и повторным включением. Каждое из включений совпадает с пучностью или с узлом напряжения на контакте. При подключении в момент пучности наблюдаем десятикратные импульсы тока и десятикратные отрицательные импульсы момента. При подключении в момент наступления узла отрицательные импульсы момента отсутствуют, амплитуды тока намного меньше.

Управление процессом повторного включения с учетом возможностей контактной аппаратуры. Оценку возможностей управления можно выполнить, сопоставляя между собой временные интервалы: постоянную времени затухания ЭДС статора T_m , время наступления первого или второго после отключения узла напряжения на контакте t_{y1} и t_{y2} , время срабатывания контакторов $t_{откл}$ и $t_{вкл}$ и механическую постоянную времени

$$T_m = \frac{J_{сум} \omega_0}{M_c} \quad (7)$$

Механическая постоянная равна времени торможения электропривода от синхронной скорости до нуля под действием постоянного момента нагрузки. В таблице 1 приведены указанные величины для трех рассматриваемых двигателей и двух характерных режимов – легкого (холостой ход с $M_c=0,1M_n$) и тяжелого (работа под нагрузкой с $M_c=M_n$). Во всех случаях учитываем инерционность электропривода $J_{сум}=1,1J_{дв}$. Время срабатывания взято по данным контакторов серии DILM фирмы Moeller.

Таблица 1

Двигатель	Режим работы	Постоянные времени		Время наступления узлов напряжения		Время срабатывания контакторов	
		T_m , с	T_m , с	t_{y1} , с	t_{y2} , с	$t_{откл}$, с	$t_{вкл}$, с
4A100L4, 4 кВт	$M_c=0,1M_n$	0,152	0,712	0,18	0,259	0,015	0,02
	$M_c=M_n$		0,0712	0,055	0,08		
4A225M4, 55 кВт	$M_c=0,1M_n$	0,92	3,12	0,384	0,545	0,012	0,03
	$M_c=M_n$		0,312	0,118	0,169		
4A355M4, 315 кВт	$M_c=0,1M_n$	1,33	5,97	0,532	0,754	0,07	0,07
	$M_c=M_n$		0,597	0,164	0,235		

По приведенным в табл. 1 данным можно сделать следующие выводы.

- Во всех рассмотренных случаях время появления узла напряжения на контакте больше времени срабатывания контакторов, следовательно введением дополнительной выдержки времени можно реализовать благоприятные условия повторного включения.
- Начальные условия более благоприятны в режиме холостого хода, когда и скорость и ЭДС статора не успевают значительно затухнуть к моменту наступления узла.
- При работе привода под нагрузкой также возможна формальная реализация благоприятных условий включения, однако при этом за время t_{y1} скорость двигателя значительно уменьшается (двигатель 4A100L4 уменьшает скорость до $0,23\omega_0$, а двигатель 4A225M4 до $0,62\omega_0$) и при переключении на сеть двигателю практически приходится повторять пуск заново.
- При экспериментальной наладке режима переключения следует совмещать появление тока статора в момент включения с узлом напряжения на контакте.
- При последовательном пуске нескольких АД от одного ПЧ необходимо учитывать особенности:
- Двигатель можно разгонять до скорости выше синхронной и, тем самым, компенсировать падение скорости за время наступления благоприятных условий.
- В тоже время проблема определения благоприятных условий включения более сложная. После отключения двигателя от ПЧ на контакте подключающего к сети аппарата наблюдается та же картина напряжения, однако не синхронизированная с моментом отключения, как это имеет место при пуске от ТПН. В таком случае наступление узлов напряжения надо контролировать не расчетным, а аппаратным способом.

Литература

1. Андриющенко О.А., Бойко А.А. Анализ процессов отключения от сети и выбега асинхронного двигателя. Зб. // Електромашинобуд. та електрообладн. - 2007. - Вип. 69. С. 28-31

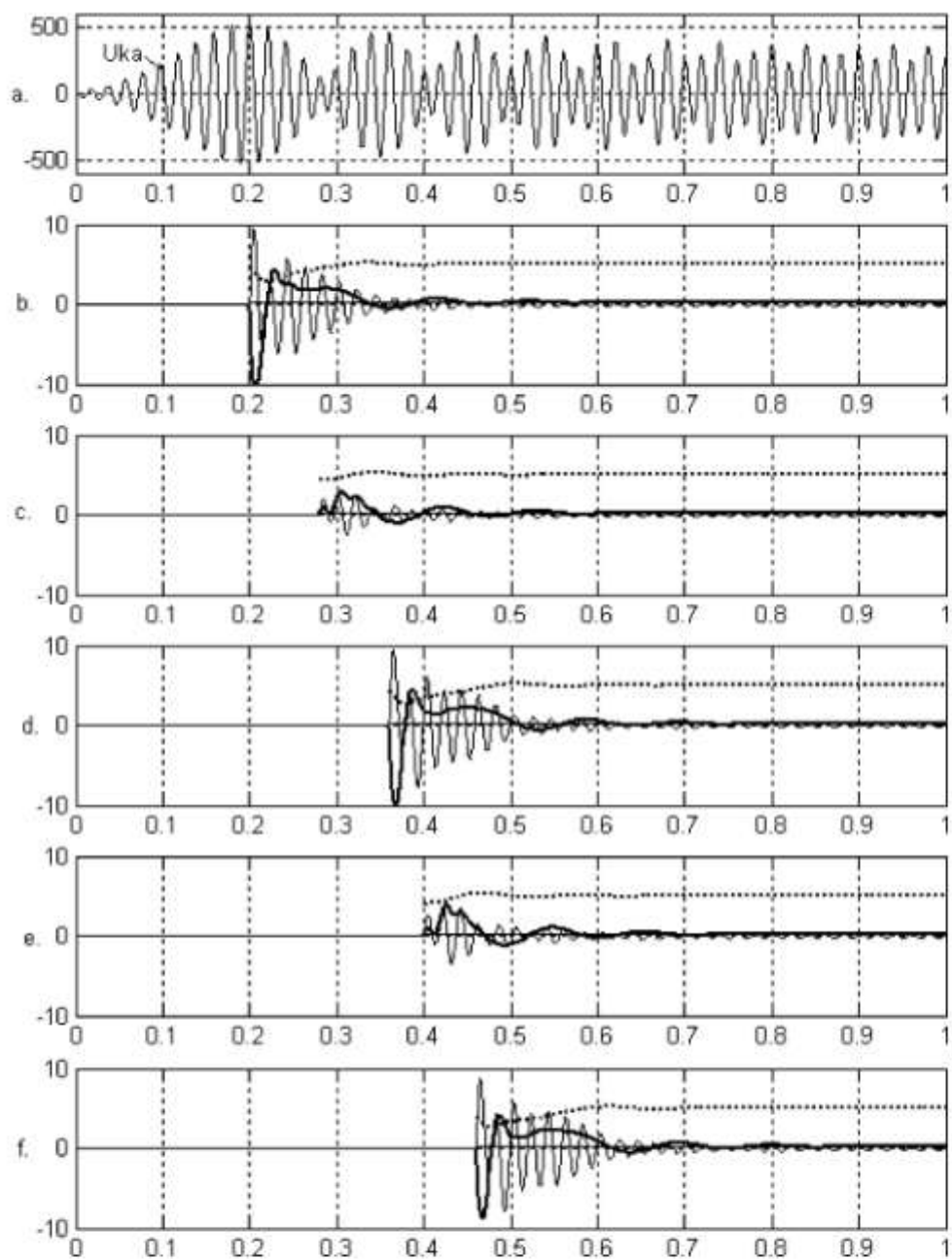


Рис. 3. Осциллограммы подключения асинхронного двигателя 4А225М4 ($M_c=0,1$ Мн; $J_{\text{сум}}=1,5J_{\text{ин}}$) к сети с различными начальными электромагнитными условиями.

а.- напряжение на контакте, b,d,f. - подключение с неблагоприятными НЭМУ, c.,e. - подключение с благоприятными НЭМУ.

- Ток фазы статора
- - - Скорость ротора
- Электромагнитный момент