

УДК 692.66:62-83

Бойко А.А., к.т.н.

ОГРАНИЧЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИФТОВЫХ ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТПН-АД

В ряде режиме работы, определяемых совпадением параметров, в разомкнутых асинхронных электромеханических системах (ЭМС) на базе тиристорных преобразователей напряжения (ТПН), имеют место неустойчивые режимы, которые характеризуются колебаниями выходных координат, по своим проявлениям приближающиеся к аварийным [1]. Колебания нарушают нормальную работу механизма, усложняют расчет и настройку замкнутых ЭМС, ухудшают качество регулирования координат и энергетические показатели. Этот режим сопровождается большими ударными нагрузками, шумом и вибрациями, и его следует классифицировать как близкий к аварийному [1,2]. Практическое исследование режимов работы механизма подъема лифта с двухскоростным асинхронным двигателем АСС 92-6/24 при питании от ТПН, также выявили возможность возникновения подобных режимов. При пуске пустой кабины лифта по треугольной диаграмме, формируемой в разомкнутой системе ТПН-АД при питании от источника с пониженным напряжением $U = 0,85U_n$, был зафиксирован переход в режим незатухающих гармонических колебаний выходных параметров (рис. 1.).

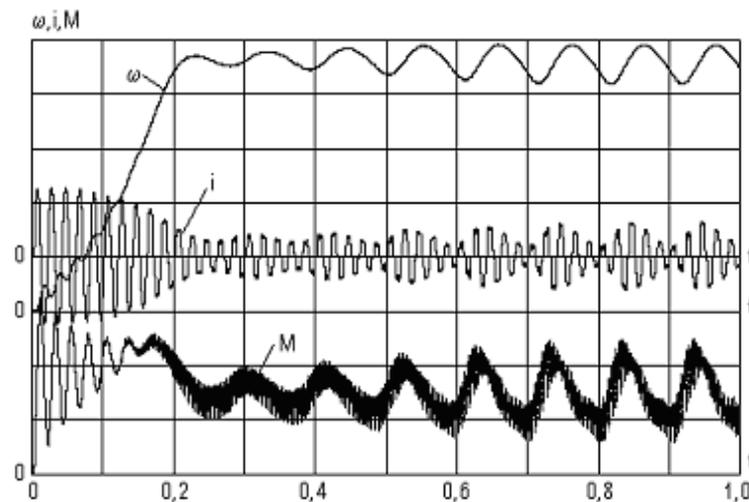


Рис. 1. Осциллограмма пуска и режима малых колебаний

$M_c = 0,2 M_n$; Масштаб: $m_i = 2I_n/\text{дел.}$; $m_M = 0,2M_n/\text{дел.}$; $m_\omega = 0,2\omega_0/\text{дел.}$

Скорость АД и подъемного механизма, при подобных автоколебаниях может изменяться в пределах первого квадранта или

может превысить синхронную, а область колебаний охватить первый и второй квадранты [2]. Физически, подобные автоколебания связаны с обменом энергии между электромагнитными контурами и инерционными маховыми массами подъемного механизма, а их наличие определяется внутренними особенностями тиристорного преобразователя [3]. Характер и количественные показатели подобного колебательного процесса весьма разнообразны. Неустойчивые режимы работы возникают чаще всего на рабочих участках искусственных характеристик ЭМС, в динамических режимах при нагрузках значительно меньших номинальной и при небольших моментах инерции подъемного механизма (отсутствия груза).

Показательно поведение разомкнутой ЭМС в режиме пуска при подходе к синхронной скорости и в области перерегулирования. Если параметры подъемного механизма, двигателя и условия пуска создают предпосылки к перерегулированию скорости, то при приближении к подсинхронной скорости фаза тока увеличивается, а выходное напряжение преобразователя благодаря действию внутренней обратной связи ТПН повышается [3]. При скорости выше синхронной, когда фаза тока становится больше 90 эл. град., процесс сопровождается практически полным открытием вентилей, независимо от заданного угла включения. Благодаря электромагнитной инерционности двигатель продолжает оставаться в двигательном режиме при скорости выше синхронной, что способствует усилению процесса перерегулирования. В результате в ТПН перерегулирование развивается всегда, как при номинальном напряжении, даже если задана искусственная механическая характеристика с напряжением меньшим номинального. ЭМС может войти в режим колебаний с перерегулированием по скорости до 40% и провалами до $0,5\omega_0$. Период колебаний включает процесс резкого торможения одним или несколькими импульсами момента до некоторой минимальной скорости и последующий разгон. Этот процесс по характеру далек от гармонического и его исследование возможно только путем математического моделирования или экспериментально. Для изучения природы колебаний ЭМС обязательными условиями, при математическом описании, является учет нелинейностей параметров АД и упругих колебательных процессов элементов механизма подъема [4,5].

На качественном уровне механизм возникновения колебаний в разомкнутой системе ТПН-АД достаточно наглядно объясняется наличием положительной обратной связи между фазой тока статора и амплитудой первой гармоники выходного напряжения преобразователя. Количественные показатели и характер колебательного процесса зависят от многих обстоятельств: величины угла включения вентилей, параметров двигателя, момента нагрузки и

суммарного момента инерции привода, колебательности элементов подъемного механизма. При прочих равных условиях характер установившегося колебательного процесса может зависеть от начальных условий- включения с нулевыми или ненулевыми НЭМУ с нулевой или ненулевой скоростью и даже от схмотехнических особенностей СИФУ и выходных каскадов ТПН.

По характеру можно выделить два варианта колебательных процессов. Первому варианту соответствуют незатухающие гармонические или близкие к ним колебания скорости, токов статора и ротора и других координат АД [2]. Важным условием этого варианта является то, чтобы при колебаниях скорость ротора не превышала синхронную, то есть, чтобы колебания были ограничены пределами I квадранта. Вторым, отличным от первого, вариант соответствует случаю, когда скорость двигателя превышает синхронную и область колебаний охватывает два квадранта (рис. 2). В этом смысле показательно поведение ЭМС в режиме пуска при подходе к синхронной скорости и в области перерегулирования. Если параметры АД и условия пуска создают предпосылки к перерегулированию скорости, то при приближении к подсинхронной скорости фаза тока увеличивается, а выходное напряжение ТПН благодаря действию внутренней обратной связи повышается. При скорости выше синхронной, когда фаза тока становится больше 90 эл. град, процесс сопровождается практически полным открытием вентилей, независимо от заданного угла включения. Благодаря электромагнитной инерционности двигатель продолжает оставаться в двигательном режиме при скорости выше синхронной, что способствует усилению процесса перерегулирования. В результате перерегулирование развивается всегда при номинальном напряжении, даже если задана искусственная характеристика с $U < U_n$. ЭМС может войти в режим автоколебаний с перерегулированием по скорости до 30% и провалами до $0,5\omega_0$. Колебательным такой процесс можно назвать лишь условно. Период колебаний включает резкое торможение одним или несколькими импульсами момента до некоторой минимальной скорости и последующий более медленный новый разгон двигателя. График скорости при этом имеет пилообразную форму (рис. 2).

Известно, что в отличие от двигателей постоянного тока в установившемся режиме идеального холостого хода ток статора АД не становится по абсолютной величине меньше тока намагничивания. В переходных колебательных процессах вблизи подсинхронной скорости частота и амплитуда напряжения сети и ЭДС статора могут стать соизмеримыми по абсолютной величине и возможны случаи, когда обобщенные векторы напряжения сети и ЭДС статора могут оказаться в положении, близком к противофазе.

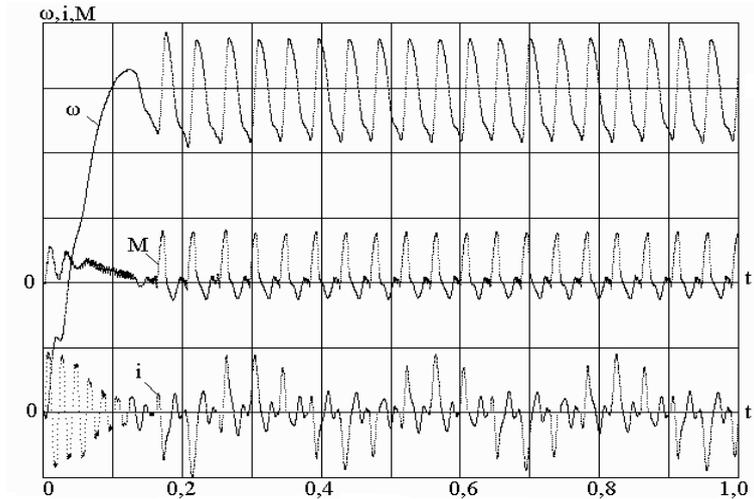


Рис. 2. Экспериментальные осциллограммы скорости, момента и тока статора АД в неустойчивом режиме ЭМС

В этих случаях ток статора уменьшается, стремясь к нулю, и такое состояние может длиться в течение времени большего, чем обычная бестоковая пауза при коммутации вентилях. Хотя вентили ТПН и продолжают работать по-прежнему с заданным углом включения, двигатель оказывается практически обесточенным и находится в режиме выбега [1]. В это время ток и магнитный поток ротора не равны нулю, а обобщенный вектор магнитного потока ротора вращается со скоростью ротора. Через некоторое время, определяемое разностью скоростей вращения векторов напряжения сети и ЭДС статора, противостояние векторов прекращается и в обмотке статора вновь появляется ток. Этот новый процесс аналогичен повторному включению АД с ненулевыми НЭМУ. При этом ток статора может не быть точно равным нулю и процесс выбега может не совсем соответствовать полному отключению двигателя. Поэтому и отключение и новое, повторное включение двигателя можно называть таковыми лишь как условные или фиктивные. Знак возникающего при включении электромагнитного момента зависит от угла между обобщенными векторами напряжения питающей сети и потокосцепления ротора в момент появления тока, а амплитуда момента - от амплитуды вектора потокосцепления ротора, скорости и параметров двигателя.

Исходя из описанной картины колебаний, для ее подтверждения, кроме момента, скорости ротора и фазного тока, следует фиксировать также амплитуды обобщенных векторов тока статора, ЭДС обмотки статора, напряжения сети и фазу между

векторами потокосцеплений статора и ротора. Возникновение противостояния векторов напряжения сети и ЭДС с близкими по величине амплитудами в известной мере может быть процессом случайным, но определенно можно сказать, что это возможно в режиме перерегулирования или выхода из этого режима при скорости близкой к синхронной [2,6]. Длительность противостояния векторов и безтоковой паузы зависит от скорости, с которой расходятся векторы, а именно от скорости ротора, момента инерции привода, статического момента нагрузки. В нормальных условиях вектор потокосцепления ротора вращается с синхронной скоростью, отставая по фазе или опережая вектор потокосцепления статора в зависимости от режима преобразования энергии. Когда наступает безтоковая пауза, вектор потокосцепления, начинает вращаться со скоростью ротора, меньшей или большей синхронной. Во всех случаях за время паузы он изменяет свое положение, и после фиктивного повторного включения начинается новый переходный процесс. В данном случае начальные условия, (и это показывает знак φ_{12}), соответствуют формированию положительного момента АД.

Какие факторы или средства могут ограничивать колебание, или полностью предотвращать их возникновение?

1). При плавном пуске по трапецеидальным оптимальным диаграммам за заданное время, колебания выходных координат, во всех рассмотренных случаях, не переходят в характерный режим автоколебаний. В конце пуска вентили ТПН полностью открываются, при этом колебаний уже не может быть принципиально [7]. Во всех случаях это заданное время разгона по трапецеидальным диаграммам достаточно для отсутствия перехода в неустойчивый режим в рассматриваемых лифтовых системах со скоростью подъема кабины 0,7 и 1 м/с. При этом рассматривался подъем (спуск) с произвольной загрузкой кабины.

2) При существенном изменении (уменьшении) напряжения питания (более 15-20%), работу электромеханической системы не следует допускать. Во всех исследуемых случаях, при существенном снижении напряжения питания был зафиксирован переход лифтовых ЭМС в режим «больших» колебаний.

3). Ограничение упругих колебаний элементов многомассовой системы подъемного механизма уменьшает вероятность перехода ЭМС с ТПН в режим автоколебаний [8].

4). При использовании замкнутых систем ТПН-АД (ограничение пусковых токов, регулирование скорости оптимизация энергетики за счет стабилизации коэффициента мощности, и т.д.) развитие колебательных режимов полностью ограничивается за счет действия обратных связей [2].

5). Переход к принципиально другому способу синхронизации вентиляей - с током нагрузки позволяет полностью избежать возникновения неустойчивых режимов разомкнутой системы ТПН-АД.

В блоках синхронизации системы импульсно-фазового управления, построенных на этом принципе, сигнал управления тиристорами синхронизируется с окончанием тока статора АД в полупериоде, предшествующем подаче управляющего сигнала, а вместо сигнала, управляющего величиной угла α , используется управление длительностью бестоковой паузы γ (рис. 3) [9]. При совпадении по величине напряжения управления с напряжением “пилы” в выходном каскаде формируется импульс тока управления тиристором I_y . Связь между углами управления по двум рассматриваемым способам синхронизации - классическим синхронизацией с напряжением сети α и током нагрузки γ осуществляется через угол запаздывания окончания тока δ с помощью выражений $\alpha = \delta + \gamma$ или $\gamma = \alpha - \delta$. В соответствии с этим, в системе с синхронизацией с током нагрузки режим $\gamma = 0$ означает равенство $\alpha = \delta$ при любом значении угла нагрузки ϕ , а случай $\alpha < \delta$ принципиально не имеет места, а на тиристоры подается одиночный короткий импульс управления, с определенной шириной. Границы диапазона регулирования угла бестоковой паузы γ не зависят от угла нагрузки ϕ и поэтому при любом его значении $\gamma_{\min} = 0$, а $\gamma_{\max} = \alpha_{\max} - \delta$. Диапазон изменения угла бестоковой паузы меньше чем угла управления и составляет $0 \leq \gamma \leq 60$ эл. град.

Этот способ нуждается в реализации новых схемотехнических решений, но предоставляет электроприводу много новых положительных свойств.

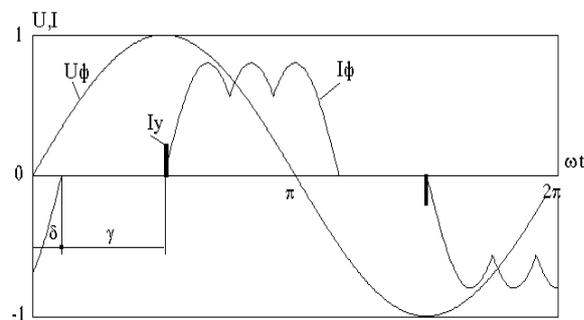


Рис. 3. Временные диаграммы токов, напряжений и синхроимпульсов при синхронизации с током нагрузки

Среди них главные, в данном случае: величина исходного напряжения ТПН в меньшей степени зависит от фазы тока нагрузки и имеет обратный, или отрицательный характер, в отличие от системы с синхронизацией с напряжением сети. В такой системе внутренняя

обратная связь по фазе тока действует как стабилизирующая. Например, при набросе нагрузки при уменьшении фазы тока напряжение ТПН увеличивается, а при сбросе, наоборот, уменьшается. В таких системах колебания принципиально не могут возникнуть, что подтверждается экспериментально.

б). Применение нового способа управления ТПН, при котором обеспечивается заданное выходное напряжение преобразователя, независимо от фазы тока нагрузки [10].

Задачу можно сформулировать следующим образом: система импульсно-фазового управления должна обеспечить пропорциональную зависимость между напряжением управления U_y и выходным напряжением ТПН, при этом действие внутренней обратной связи автоматически компенсируется соответствующими изменениями текущего угла управления α . Это возможно, если использовать известную приближенную аналитическую зависимость $U_{1ТПН} = f(\alpha, \varphi_{\Sigma})$ []. Данную зависимость необходимо преобразовать к виду $\alpha = f(U_{1ТПН}, \varphi_{\Sigma})$, где управляющим воздействием становится $U_{1ТПН}$, возмущающим по-прежнему остается φ_{Σ} , а угол включения вентиляей α автоматически вычисляется для поддержания заданного напряжения, независимо от текущей фазы тока статора АД [10]

$$\alpha = \frac{-A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4A_2(A_0 - U_{1\text{дв}})}}{2A_2}, \quad (1)$$

где

$$A_0 = -0.1291 + 0.06165 \cdot \varphi_{\Sigma} - 7.2407E-04 \cdot \varphi_{\Sigma}^2,$$

$$A_1 = 0.02723 - 0.0015212 \cdot \varphi_{\Sigma} + 2.038E-05 \cdot \varphi_{\Sigma}^2,$$

$$A_2 = -2.1534E-04 + 8.2836E-06 \cdot \varphi_{\Sigma} - 1.1941E-07 \cdot \varphi_{\Sigma}^2.$$

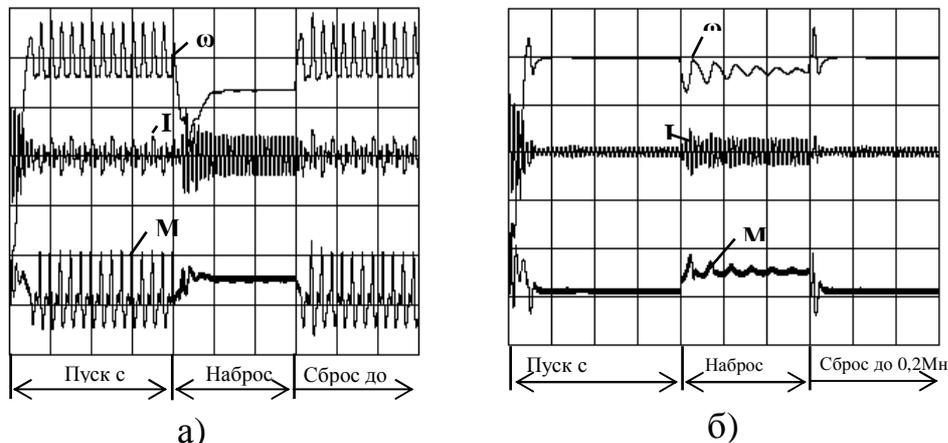


Рис. 4. Осциллограммы процесса пуска и наброса – сброса нагрузки двигателя 4A100L4, 4 кВт, $J_{\text{сум}} = 1,5J_{\text{дв}}$ а) управляющее воздействие $\alpha = 70$ эл. град; б) управляющее воздействие $U_1 = 0,85U_{\text{н}}$. Масштаб: $m_t = 0,2\text{с/дел.}$; $m_M = 2\text{Мн/дел.}$; $m_{\omega} = 0,2\omega_0/\text{дел.}$

На рис. 4 в качестве иллюстрации приведены две осциллограммы процессов пуска приводного двигателя, наброса и сброса нагрузки при управлении ЭМС по управляющему воздействию $\alpha = \text{const}$ (а) и $U_{\text{ТПН}} = \text{const}$ (б) []. В первом случае по окончании процесса пуска возникают описанные незатухающие колебания всех координат, при набросе нагрузки $M_c = M_n$ колебания затухают, однако процесс наброса сопровождается провалом скорости на 35 %. При сбросе нагрузки вновь возникают колебания. Во втором случае незатухающие колебания не возникают, а провал скорости при набросе нагрузки уменьшается до 15 %.

ВЫВОДЫ:

1. В ряде режиме работы лифтов, определяемых совпадением параметров, в разомкнутых электромеханических системах с ТПН и АД, возникают неустойчивые режимы, которые характеризуются колебаниями выходных координат, по своим проявлениям приближающиеся к аварийным. Колебания нарушают нормальную работу подъемных механизмов, усложняют расчет и настройку замкнутых лифтовых ЭМС, ухудшают качество регулирования координат и энергетические показатели лифтов.
2. Вид и само наличие неустойчивых режимов работы ЭМС полностью зависит от параметров АД, подъемных механизмов и начальных электромагнитных условий, что было проиллюстрировано на характерных примерах. Даны практические рекомендации по ограничению и устранению возникновения колебаний в лифтовых системах с ТПН, в том числе, инновационный способ управления преобразователем, при котором заданное выходное напряжение, инвариантно фазы тока нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриященко О.А., Бойко А.А. Исследование устойчивости разомкнутой системы электропривода ТПН-АД // ЭППТ - Екатеринбург, 2007 – С. 127 – 131.
2. Андриященко О.А., Бойко А.А. Методика исследования устойчивости электропривода ТПН-АД // Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Выпуск 113. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - С. 63-64.
3. Герасимьяк Р.П., Андриященко О.А. Автоколебания в ЭП ТПН-АД при синхронизации вентилей с напряжением сети // Электромашинобуд. та електрообладн. – 2000. - Вип. 52. – С. 25 - 30.

4. Бойко А.А. Динамические свойства асинхронных электродвигателей // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. - 2000. - №2(7). - С.75-80.
5. Andryushchenko O., Boyko A. Maple Software Applied for Stability Research of Electric Drive TVC-IM / Simulation News Europe. – 2003. № 38/39 – P. 35-37.
6. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - 224с.
7. Бойко А.О., Бересан А.А. Моделирование системы ТПН-АД // Математическое моделирование. Днепродзержинск: ДГТУ, 2010. – С. 39-42
8. Житомирский В.К. Механические колебания и практика их устранения – М: Машиностроение, 1966, 174 с.
9. Андриященко О.А., Бабийчук О.Б., Вычужанин А.А. Асинхронный электропривод с тиристорным преобразователем напряжения, синхронизированным с током нагрузки. // Электромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1991. - Вып. 46. - С. 29-32.
10. Андриященко О.А., Бойко А.А., Волянская Я.Б. Формирование выходного напряжения ТПН, инвариантного фазе тока нагрузки // Электромашинобуд. та електрообладн. - 2006. - Вип. 66. С. 33-34.