

ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С КОСВЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ СКОРОСТИ

Приводятся результаты исследования систем регулирования электропривода постоянного тока и асинхронного электропривода с косвенным измерением скорости с учетом влияния обратных связей по току и напряжению на устойчивость системы. Определены условия устойчивости: системы регулирования при положительной обратной связи по току; контура регулирования с тиристорным преобразователем при цифровом сглаживании пульсаций; асинхронного двигателя как объекта регулирования. Обоснованы структурные схемы и параметры системы, обеспечивающие качественное регулирование.

Ключевые слова: электропривод, система регулирования, устойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение регулирования скорости электроприводов (ЭП) с вычислением скорости по току и напряжению наталкивается на проблему устойчивости работы контура компенсации статической ошибки регулирования скорости. Помимо этого в ЭП постоянного тока возникает проблема устойчивости работы контура регулирования напряжения; в асинхронном ЭП – проблема устойчивости работы асинхронного электропривода (АЭП) и обеспечения его устойчивости без потери статической точности регулирования.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Компенсация статической ошибки регулирования скорости при увеличении нагрузки электродвигателя (ЭД) осуществляется введением положительной обратной связи (ОС) – по току в ЭП постоянного тока (ЭППТ) и по активной составляющей тока в АЭП [1]. Путем увеличения положительной ОС в ЭППТ можно свести статизм до нуля при некотором среднем значении температуры ЭД с допущением перекомпенсации статизма при температурном уменьшении сопротивления ЭД, таким образом можно повысить статическую точность регулирования. В [2] показано, что, если пренебрегать влиянием ОС по ЭДС ЭД, характеризуемым электромеханической постоянной времени, то при полной компенсации статизма система автоматического регулирования (САР) находится на границе устойчивости. Получено выражение для предельного с точки зрения устойчивости коэффициента перекомпенсации, учитывающее влияние ОС по ЭДС. Выражение получено без учета инерционности датчика напряжения. Так как инерционность датчика напряжения может лишь ухудшить устойчивость, в ЭППТ предложено ее сводить к минимуму, а для уменьшения пульсаций предлагается использовать цифровое сглаживание путем многократного чтения и усреднения сигнала на периоде дискретности преобразователя микропроцессорной системой управления (МПСУ). Указан-

ное выражение дает возможность выбрать параметры регулятора, при которых допустимая величина перекомпенсации больше возникающей из-за температурного изменения сопротивления ЭД.

Однако параметры регулятора должны выбираться с учетом возможной неустойчивости работы внутренних контуров регулирования.

В ЭППТ при уменьшении инерционности датчика напряжения наиболее критичным к автоколебаниям, связанным с дискретностью преобразователя, является контур регулирования напряжения. Условия устойчивости при цифровом сглаживании пульсаций сигнала ОС получены в [3]. Этими условиями существенно ограничивается коэффициент усиления контура регулирования напряжения, что, в свою очередь, ограничивает быстродействие регулирования скорости. Найдено средство повышения быстродействия, а попутно, повышения статической точности регулирования скорости и упрощения настройки регулятора [4].

Асинхронный ЭД с учетом ОС по ЭДС также представляет собой замкнутый контур регулирования, в котором могут возникать автоколебания. Наличие положительной ОС по активной составляющей тока в АЭП с косвенным измерением скорости может способствовать появлению автоколебаний, которые могли не проявляться при отрицательных ОС или при их отсутствии. Проводимые ранее исследования устойчивости асинхронного ЭД [5] методом анализа частотных характеристик при линеаризации системы уравнений позволили лишь качественно исследовать устойчивость. В [6] проведено исследование электромеханических автоколебаний, возникающих в асинхронном ЭД, методом математического моделирования полной системы дифференциальных уравнений ЭД, содержащих в себе произведения переменных. При этом граница области устойчивости ЭД определялась путем многократного автоматического перебора вариантов расчета по специальному алгоритму. Из возможных способов подавления электромеха-

нических автоколебаний выбран способ введения ОС по реактивной составляющей тока с воздействием на частоту f , так как при этом не ухудшается точность регулирования скорости.

При поддержании постоянным потокосцепления ротора выражение для допустимой величины перекомпенсации для ЭППТ справедливо и для АЭП, если процессы рассматриваются по отношению к активной составляющей тока статора [2].

Целью данной работы является обобщение результатов ранее проведенных исследований устойчивости и рассмотрение их практического использования.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ С ТИРИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПРИ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Для исследования устойчивости работы контура применен аппарат Z-преобразования. Отличительная особенность данного анализа от предыдущих исследований [6] – наличие цифрового фильтра сигнала ОС связи с передаточной функцией $G_{\phi}(p) = (1 - \exp(-pT)) / p$, где T – период дискретности преобразователя.

В результате анализа определена следующая зависимость предельного коэффициента усиления системы K_{pu} от постоянной времени датчика напряжения $T_{дн}$ (рис. 1):

$$K_{pu} < \left(1 - \frac{1}{2} \frac{T}{T_{int}}\right) \frac{1 + \exp(-T/T_{дн})}{1 - \exp(-T/T_{дн})} + \frac{T_{дн}}{T_{int}}, \quad (1)$$

где T_{int} – постоянная времени интегрирования контура.

Для сравнения на рис. 1 приведены известные области устойчивости [7] при управлении преобразователем по методам ШИМ-I и ШИМ-II. Из сравнения видно, что САР с ТП и цифровым сглаживанием пульсаций по устойчивости занимает промежуточное положение по отношению к указанным методам управления.

Для повышения точности регулирования скорости требуется увеличение коэффициента K_{pu} , что возможно, как следует из рис. 1, при одновременном увеличении постоянной времени датчика напряжения $T_{дн}$. Однако при этом ухудшается динамика и уменьшается допустимая вели-

чина перекомпенсации, вызываемая изменением температуры. Для устранения влияния запаздывания датчика напряжения предлагается использовать асимптотический дифференциатор, который позволяет проводить также интегрирование и усреднение [8].

УСТОЙЧИВОСТЬ САР ПРИ ПЕРЕКОМПЕНСАЦИИ СТАТИЗМА

Структурная схема наиболее распространенной однократно интегрирующей САР с косвенным измерением скорости (рис. 2) содержит контур регулирования тока I_d с ПИ регулятором тока РТ, тиристорным преобразователем ТП, цепью якоря ЭД с постоянной времени $T_{я}$, сопротивлением якоря $R_{я}$, датчиком тока с параметром $R_{дт}$; контур регулирования напряжения U_d параметрами датчика $T_{дн}$, $K_{дн}$; регулятора напряжения с коэффициентом K_U ; контур токовой компенсации с коэффициентом $K_{РУ}$. При постоянном магнитном потоке скорость V и ЭДС E пропорциональны друг другу. Пунктирная связь пока не рассматривается и о ней будет сказано далее.

Как отмечено выше, большая инерционность датчика напряжения снижает возможность полной компенсации статизма с учетом перекомпенсацией при температурном изменении сопротивления ЭД. В то же время, малая инерционность датчика напряжения практически не влияет на процессы изменения скорости. Принимая $T_{дн} = 0$ и пренебрегая дискретностью ТП, процессы в системе при полной компенсации статизма можно описать дифференциальным уравнением третьей степени, которое позволяет получить условие устойчивости системы в аналитическом виде. Это условие получено по отношению к коэффициенту компенсации

$$k = (R_{я,расч} - R_{я}) / R_{я}. \quad (2)$$

Коэффициент компенсации определяет относительную разницу между расчетным сопротивлением цепи двигателя $R_{я,р}$, исходя из которого компенсируется падение напряжения, и фактическим сопротивлением цепи двигателя $R_{я}$, зависящего от изменения температуры,

$$k < \frac{1 + K_{РУ}(1 + K_{РУ}) \frac{T_{int}}{T_M} + \frac{T_{я}}{T_{int}} - \sqrt{\left(1 + K_{РУ}(1 + K_{РУ}) \frac{T_{int}}{T_M} + \frac{T_{я}}{T_{int}}\right)^2 - 4K_{РУ}(1 + K_{РУ}) \frac{T_{int}}{T_M}}}{2K_{РУ}}, \quad (3)$$

где $T_{int} = T/K_{IU}$ – постоянная времени интегрирования контура регулирования напряжения; $K_{IU} = K_{дн} K_U K_{IT} K_{ТП}$, $K_{РУ} = K_{дн} K_U K_{IT} K_{ТП}$ – коэффициенты усиления разомкнутого контура регулирования напряжения с учетом коэффициентов усиления интегральной K_{IT} и пропорциональной $K_{П}$ частей регулятора. Из этого общего условия устойчивости можно определить отдельные случаи:

$$k < \frac{T_{int}}{T_M \left(1 + \frac{T_{я}}{T_{int}}\right)}, \quad \text{при } K_{РУ} = 0; \quad (4)$$

$$k < 0, \quad \text{при } T_{int}/T_M \rightarrow 0. \quad (5)$$

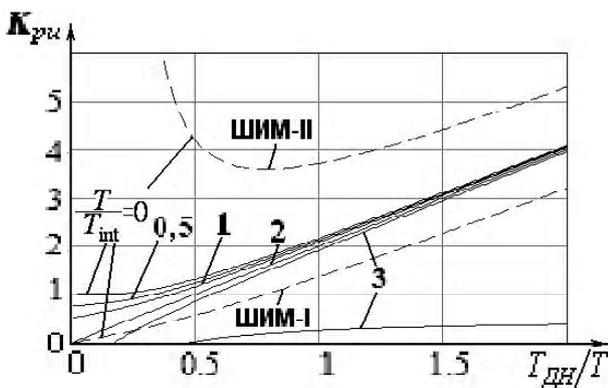


Рис. 1. Области устойчивости САР с ТП

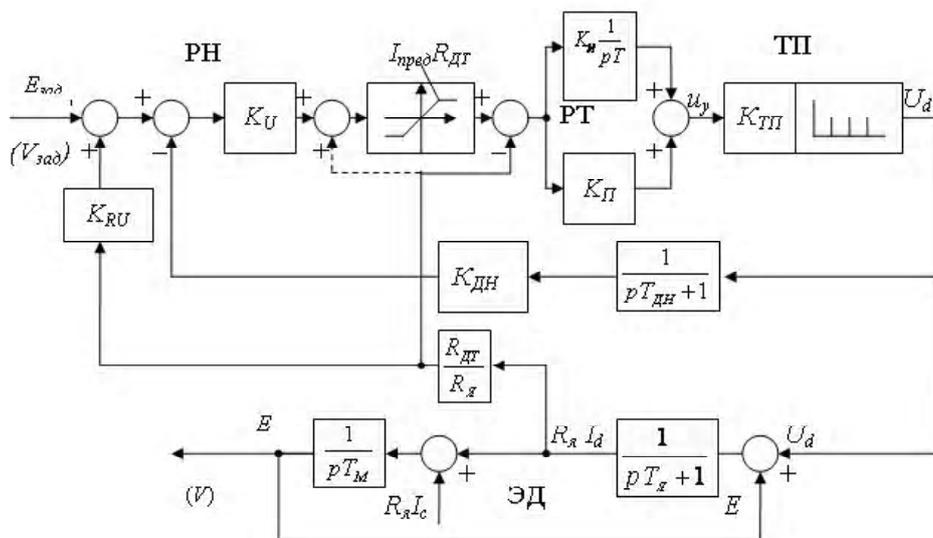


Рис. 2. Структурная схема САР ЭППТ с косвенным измерением скорости

Условие устойчивости (5) означает, что если не учитывать ОС по ЭДС двигателя, что иногда допускается, то система при перекомпенсации неустойчива и поэтому перекомпенсация не допускается. На самом деле, благодаря ОС по ЭДС двигателя, можно обеспечить компенсацию статизма и ее перекомпенсацию при изменении температуры. Выражение (3), которое учитывает ОС по ЭДС, позволяет выбирать соответствующие параметры регулятора, при которых допустимое значение коэффициента компенсации меньше реально возможного. Области устойчивости согласно выражению (3) приведены на рис. 3.

С учетом (1) целесообразно выбирать коэффициент пропорциональной части контура напряжения близким к максимально допустимому при $T_{дн} \leq 0,5 T$: $K_{пу} = 1$. При таком коэффициенте из условия возможностей перекомпенсации при температурном изменении сопротивления цепи двигателя на 20 % ($k = 0,2$) из выражения (3) и графиков (рис. 3) можно определить, что постоянная времени интегрирования контура должна равняться $T_{инт} = (0,2..0,3)T_M$ при постоянной времени цепи якоря $T_я = (0,1..0,4)T_M$. Выбирая постоянную времени $T_{инт}$ еще больше, можно увеличить запас устойчивости системы. Однако при этом система становится более инерционной. Поэтому правильной является настройка системы с недокомпенсацией для одной части температурного диапазона, что уменьшает перекомпенсацию во второй части температурного диапазона.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ В ЭППТ С КОСВЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ СКОРОСТИ

Условие устойчивости (1) для контура напряжения ограничивает быстродействие регулирования скорости. За счет положительной ОС по току при правильном

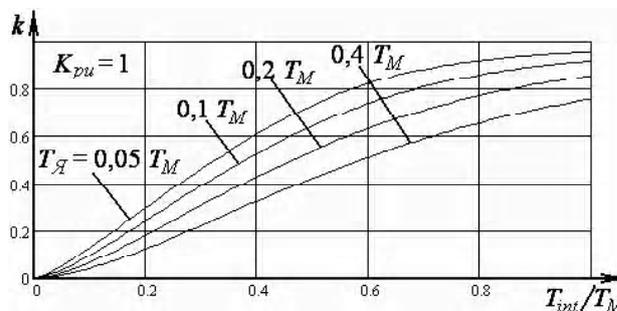


Рис. 3. Граничные значения коэффициента компенсации

выборе коэффициента токовой компенсации $K_{ру}$ это снижение быстродействия можно компенсировать. Если разделить положительную ОС на две составляющие, перенеся одну из составляющих на вход узла ограничения, как показано пунктирной линией на рис. 2 [4], то оставшаяся часть положительной ОС по току будет отвечать только за токовую компенсацию, а перенесенная часть устранил статизм регулирования напряжения. При малых отклонениях скорости от заданного значения положительная и отрицательная ОС по току компенсируют друг друга, и САР превращается в астатический регулятор скорости. При больших ошибках регулирования скорости сигнал задания тока выходит на ограничение. При этом за счет действия положительной ОС по току уровень ограничения достигается раньше, а выход из ограничения происходит позже. Ток в течение большего времени изменяется с максимальным темпом, за счет чего и обеспечивается повышение быстродействия. При входе в активную зону переходный процесс происходит при относительно малом значении входного сигнала. За счет этого уменьшается перерегулирование (рис. 4). Вышесказанное видно из осциллограммы переходного процесса, приведенной на рис. 4.

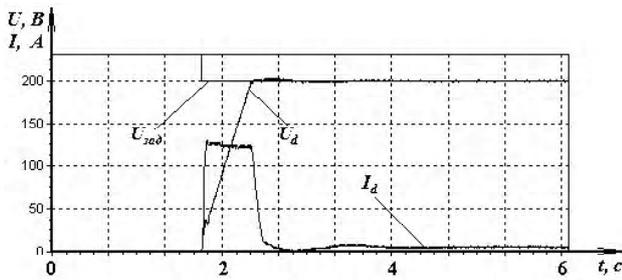


Рис. 4. Переходный процесс при скачке задания

УТОЧНЕНИЕ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННОГО ЭД. ПОДАВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Проведенные на математической модели расчеты [5] систематизированы в виде областей устойчивости в координатах: коэффициент рассеяния магнитного потока между статором и ротором σ и механическая постоянная времени τ_m по отношению к постоянной времени статора τ_1 отношение постоянных времени ротора и статора $\tau_2 / \tau_1 = 1, 2, 3$ (рис. 5). Расчеты проводились для зависимости напряжения от частоты с учетом компенсации падения напряжения на активном сопротивлении статора.

Учитывая, что постоянные времени обратно пропорциональны сопротивлениям, из представленных кривых видно, в какой степени увеличивается область неустойчивости при увеличении сопротивления цепи статора, в том числе при удалении ЭД от преобразователя на большие расстояния.

Автоколебания (осциллограмма приведена на рис. 6, а) можно подавить отрицательной ОС по активной составляющей тока, поэтому в ряде ЭП автоколебания на проявлялись. Путем моделирования выявлен предпочтительный способ подавления автоколебаний введением положительной ОС по реактивной составляющей тока I_x (рис. 6, б).

Структурная схема системы регулирования скорости асинхронного ЭП с вычислением скорости при постоянном потокосцеплении ротора аналогична представленной на рис. 2 ЭП постоянного тока. Эту схему для переменных в относительных единицах можно привести к виду рис. 7, где I_{RE} – активная составляющая тока ПЧ по отношению к ЭДС ротора; I_{REC} – установившееся значение активной составляющей тока ПЧ по отношению к ЭДС ротора; T_1, T_{int} – параметры регулятора тока; T_c – эквивалентная постоянная времени цепи статора.

Определены параметры регулятора, при которых система при полной компенсации скольжения ($K=1$) имеет достаточный запас устойчивости. Переменная составляющая положительной ОС по реактивной составляющей тока \tilde{I}_{XE} для подавления возможных автоколебаний АД практически не влияет на процессы регулирования. Погрешность определения активной составляющей тока ротора определяется по данным измерения токов двух фаз. Из-за возможной неидентичности датчиков погреш-

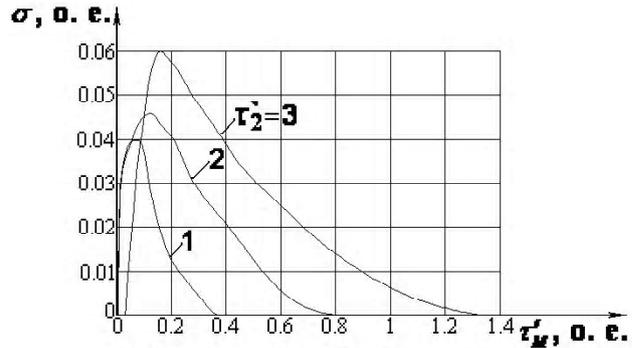
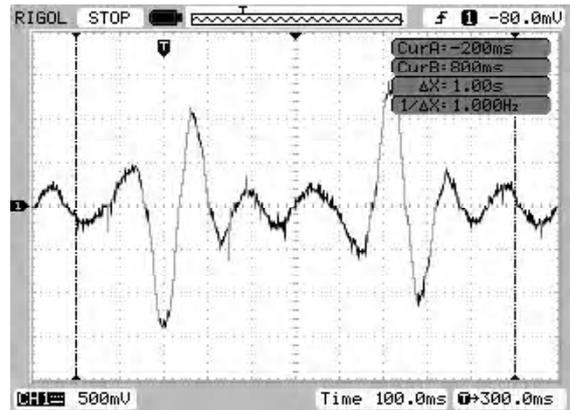
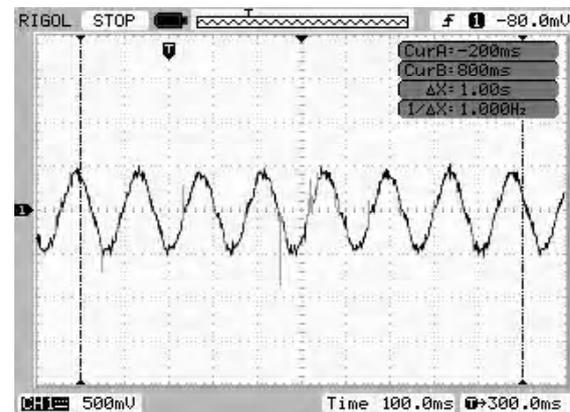


Рис. 5. Области устойчивости АД



а)



б)

Рис. 6. Осциллограммы тока АД при синусоидально модулированном напряжении статора:

а – без обратной связи; б – с обратной связью по реактивной составляющей тока

ность определения тока больше, чем в ЭП постоянного тока, и в течение периода выходной частоты ПЧ вычисленные значения могут отличаться, при этом имеет место периодическое изменение значений активной составляющей тока, и пропорциональная часть ПИ-регулятора может вызвать нестабильность частоты даже в установившемся режиме работы ПЧ. Поэтому целесообразно использование интегрального регулятора ($T_1=0$), который с учетом ОС превращается в инерционное звено, которое усредняет разброс в измерении активной составля-

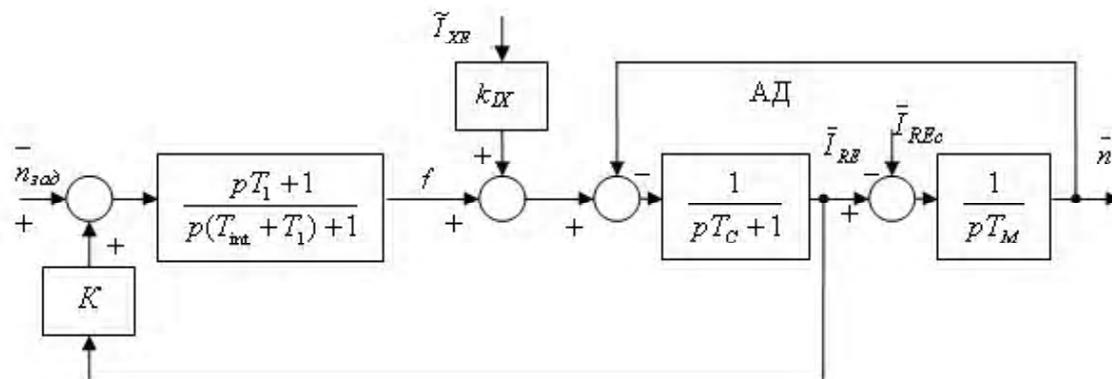


Рис. 7. Структурная схема САР АЭП с косвенным измерением скорости

ющей тока ротора. При этом условие устойчивости принимает вид (4) с той разницей, что вместо постоянной времени якоря $T_{я}$ следует иметь ввиду эквивалентную постоянную времени цепи статора T_C . Из этого условия следует, что для обеспечения достаточного запаса устойчивости постоянную времени интегрирования T_{int} следует выбирать сравнимой с механической постоянной времени двигателя T_M .

Рассмотренная система регулирования реализована на базе микроконтроллеров KR196CA, dsPIC30F, dsPIC33F [9] в электроприводах постоянного и переменного тока, выпускаемых ПАО «Запорожский электроаппаратный завод» и ОАО «УкрНИИ силовой электроники «Преобразователь».

ВЫВОДЫ

Использование предлагаемых структурных схем и методик определения параметров регулятора улучшает качество регулирования электроприводов с косвенным измерением скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов, О. И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод / Осипов О. И. – М. : Издательство МЭИ, 2004. – 79 с.
2. Чепкунов, Р. А. Устойчивость системы регулирования скорости электроприводов без датчика скорости / Чепкунов Р. А. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – Випуск 4, Ч. 3. – С. 21–25.
3. Чепкунов, Р. А. Параметрическое регулирование скорости мощных электроприводов / Чепкунов Р. А. // Пробле-

- ми энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. – 2011. – № 1. – С. 120–121.
4. Чепкунов, Р. А. Спосіб регулювання параметра зовнішнього контура з обмеженням параметра внутрішнього контура при підпорядкованому регулюванні параметрів в системі автоматичного регулювання / Чепкунов Р. А. – Патент на винахід №103128 від 10.09.2013. Бюл. №17.
5. Эпштейн, И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока / Эпштейн И. И. – М. : Энергоиздат, 1982. – 192 с.
6. Чепкунов, Р. А. Исследование электромеханических автоколебаний в асинхронном электроприводе на низких частотах / Чепкунов Р. А. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Випуск 4/ (51), Ч. 2. – С. 17–20.
7. Шипило, В. П. Устойчивость замкнутой системы при управлении тиристорным преобразователем по методу ШИМ-I / В. П. Шипило, И. И. Чикотило // Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. – 1981. – № 2. – С. 2–4.
8. Потапенко, Е. М. Асимптотическое дифференцирование ступенчатых сигналов в задачах управления скоростью и перемещением / Потапенко Е. М., Потапенко Е. Е., Казурова А. Е. // Електромашинобудування та електрообладнання. Тем. вип. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Київ : «Техніка». – 2006. – Випуск 66. – С. 286–288.
9. Чепкунов, Р. А. Управляющие устройства на основе микроконтроллера dsPIC30F / Р. А. Чепкунов, Д. И. Левинзон // Наука і вища освіта. Тези доповідей учасників XV Міжнародної наукової конференції молодих науковців. Частина 2. Гуманітарний університет «ЗДМУ». – 2007. – Ч. 2. – С. 357–358.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2013.

Чепкунов Р. А.¹, Левінзон Д. І.²

¹Науковий співробітник, ВАТ НДІ «Перетворювач», Запоріжжя, Україна

²Д-р техн. наук, проф., Класичний приватний університет, Запоріжжя, Україна

ОСОБЛИВОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З НЕПРЯМИМ ВИМІРЮВАННЯМ ШВИДКОСТІ

Приводяться результати дослідження системи регулювання електропривода постійного струму і асинхронного електропривода з непрямим вимірюванням швидкості з урахуванням впливу зворотних зв'язків за струмом і напругою на стійкість системи. Визначені умови стійкості: системи регулювання при додатному зворотному зв'язку за струмом; контуру регулювання з тиристорним перетворювачем при цифровому згладжуванні пульсацій; асинхронного двигуна як кола регулювання. Обґрунтовано структурні схеми і параметри системи, які забезпечують якісне регулювання.

Ключові слова: електропривод, система регулювання, стійкість.

Chepkunov R. A.¹, Levinzon D. I.²

¹Scientist, Science research institute of the power electronics, Zaporizhja, Ukraine

²Doctor of Technical Sciences, professor, Classic private University, Zaporizhja, Ukraine

FEATURES OF CONTROL OF THE ELECTRIC DRIVES WITH INDIRECT SPEED MEASURING

The features of control of the electric drives with the indirect measuring of speed are related by the presence of positive feed-back on a current, by the large pulsations of signal of feed-back on voltage in the direct-current electric drive, by the display of instability of electric motor in an asynchronous electric drive. The areas of stability at a positive feed-back on a current in the direct-current electric drive and on the active constituent of current in an asynchronous electric drive are certain. For reduction of the sensor inertness of the thyristor converter voltage the digital smoothing out of pulsations of the feed-back signal offers and the areas of stability of the control system are certain. The areas of stability of asynchronous electric drive are certain depending on the coefficient of dispersion of magnetic stream, electromechanics permanent to time, permanent to time of stator and rotor, the method of suppression of self-excited oscillations offers. The structural schemes and system parameters that ensure quality control are substantiated.

Keywords: electric drive, control system, stability.

REFERENCES

1. Osipov O. I. Chastotno-reguliruemiy asinhronnsy elektroprivod. Moscow, Izdatelstvo MEI, 2004, 79 p.
2. Chepkunov R.A. Ustoychivost sistemi regulirovaniya skorosti elektroprivodov bez datchika skorosti, *Visnik Kremtnchutskogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradckogo*, 2010, Issue 4, Ch. 3, pp. 21–25.
3. Chepkunov R. A. Parametricheskoe regulirovanie skorosti moshnih elektroprivodov, *Problemi energoresursosberezhennja v elektrotehnichnsh sistemah. Nauka, osvita i praktika*, 2011, No. 1, Kremenchuk, pp. 120–121.
4. Chepkunov R. A. Sposib reguljuvannja parametra zovnishnjogo kontura z obmehzennjam parametra vnutrishnjogo kontura pri pidporjadkovomu reguljuvanni parametriv v sistemi avtomatichnogo reguljuvannja. Patent na vinohid №103128 vid 10.09.2013. Bjul. №17.
5. Epshteyn I. I. Avtomotizirovanniy elektroprivod peremennogo toka. Moscow, Jenergoizdat, 1982, 192 p.
6. Chepkunov R. A. Issledovanie elektromehaničeskikh avtokolebanij v asinhronnom elektroprivode na nizkih chastotah, *Visnik Kremtnchutskogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradckogo*, 2008, Vipusk 4, Ch. 2, pp. 17–20.
7. Shipillo V. P., Chikotilo I. I. Ustoychivost zamknutoy sistemi pri upravlenii tiristorim preobrazovatelem po metodu SHIM-I, *Elektrotehnicheskaja promishlennost. Ser. Preobrazovatel'naja tehnika*, 1981, No. 2, pp. 2–4.
8. Potapenko E. M., Potapenko E. E., Kazurova A. E. Asimptoticheskoye differentsyrovaniye stupenchatykh signalov v zadachakh upravleniya skorostyu i peremescheniem / Potapenko E. M., Potapenko E. E., Kazurova A. E. *Elektromashynobuduvannya ta elektroobladnannya. Tem. vyp.: Problemy avtomatyzovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktyka. Mizhvidomchyj naukovo-tehnichnyj zbirnyk*, Kyiv, Tekhnika, 2006, Vypusk 66, pp. 286–288.
9. Chepkunov R. A., Levinzon D. I. Upravljajushije ustroystva na osnove mikrokontrollera dsPIC30F, *Nauka i visha osvita. Tezi dopovidey uchasnikiv XV Mizhnarodnoy naukovoy konferentziji molodih naukovtziv*, Chastina 2, Gumanitarnie universitet «ZIDMU», Ch. 2, pp. 357–358.