

УДК 621.313.333.2

ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ НАБЛЮДАТЕЛЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА РОТОРА

Е.В. КРАСИЛЬНИКЪЯНЦ, А.П. БУРКОВ, А.А. СМОРНОВ, Г.А. БУЛДУКЯН
ФГБОУВПО «Ивановский энергетический государственный университет им. В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: krev@eims.ispu.ru, burkov@eims.ispu.ru, smirnov@eims.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В связи с широким использованием приводов на базе асинхронных двигателей актуальной является проблема обеспечения их максимального использования по моменту и скорости. Одним из важных шагов в данном направлении является качественная настройка наблюдателя магнитного потока ротора.

Материалы и методы: Представленные результаты были получены путем имитационного и натурного моделирования.

Результаты: Предложена методика настройки наблюдателя, использующая в качестве критерия постоянство ускорения при постоянной величине активной и намагничивающей составляющих тока статора.

Выводы: Для обеспечения максимального использования асинхронных двигателей по моменту и скорости необходимо выполнять точную настройку наблюдателя магнитного потока ротора.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный двигатель, наблюдатель магнитного потока ротора, методика настройки.

ADJUSTMENT PECULIARITIES OF ROTOR MAGNETIC FLUX OBSERVER

E.V. KRASILNIKYANTS, A.P. BURKOV, A.A. SMIRNOV, G.A. BULDUKYAN
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: krev@eims.ispu.ru, burkov@eims.ispu.ru, smirnov@eims.ispu.ru

Abstract

Background: The authors consider the problem of using the maximum power of asynchronous motors according to the moment and speed to be very urgent because of the wide usage of drives based on asynchronous motors. The fine adjustment of rotor magnetic flux observer is one of the important stages in the research.

Materials and Methods: The given results were received by means of simulation and field modellings.

Results: The technique of observer adjustment is put forward. The criterion of optimality is a constancy of acceleration providing magnitude constancy of active and magnetizing components of stator current.

Conclusions: Implementation of rotor magnetic flux observer fine adjustment is of critical importance for asynchronous motor torque and velocity maximum utilization.

Key words: electric drive, asynchronous motor, magnetic flux observer tuning approach.

Основную долю двигателей, применяемых в настоящее время в промышленности, составляют асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. Их преимуществами являются низкая стоимость, а также высокие ремонтотпригодность, надежность, перегрузочная способность. Наиболее качественное управление АД может быть достигнуто при использовании системы векторного управления моментом. Отличительной особенностью таких систем управления является наличие наблюдателя магнитного потока ротора для определения фазы координатных преобразований. Существуют различные структуры наблюдателей, которые можно разделить на две группы. К первой группе относятся наблюдатели, использующие информацию о фазных токах статора и положении или скорости ротора [1]. Ко второй группе относятся наблюдатели, работающие по данным от датчиков тока и напряжения [2]. Условно системы управления с таким наблюдателями называют «бездатчиковыми», отмечая отсутствие измерителя на валу двигателя.

Применение наблюдателей первой группы является более предпочтительным в тех случаях, когда главным требованием выдвигается обеспечение высокого быстродействия в контуре момента и широкого диапазона регулирования скорости. Наблюдатели, относящиеся ко второй группе, обеспечивают значительно более узкий диапазон регулирования скорости и меньшее быстродействие в контуре момента, но позволяют снизить стоимость электропривода.

Независимо от типа используемого наблюдателя, для обеспечения работоспособности системы управления требуется оценка параметров двигателя, в том числе и таких, непосредственное измерение которых затруднено или невозможно. К ним относятся постоянная времени ротора T_r и взаимная индуктивность статор-ротор L_{12} . Следует отметить, что данные параметры подвержены значительным вариациям в зависимости от нелинейности кривой намагничивания и температуры [2]. Как результат, параметры наблюдателя необхо-

димо корректировать в зависимости от внешних факторов.

Анализ специальной литературы показал, что проблеме идентификации параметров АД с короткозамкнутым ротором уделяется значительное внимание [2, 5]. Рассматриваемые способы идентификации можно разделить на две группы. К первой группе относятся способы, предполагающие идентификацию параметров при вводе электропривода в эксплуатацию. Для этого предлагается использовать набор различных тестовых режимов, например холостой ход, короткое замыкание, формирование нулевой и синхронной скорости или отработка переходного процесса, например ступенчатого изменения частоты [5]. Ко второй группе относятся способы, ориентированные на оценку параметров двигателя в процессе работы. При этом в сигнал управления предлагается добавлять тестовый сигнал, малый по сравнению с основным задающим сигналом.

Для обработки результатов экспериментов в автоматическом режиме предлагается использовать генетические алгоритмы, аппарат нечеткой логики или спектральный анализ [3]. Следует отметить, что применение сложных вычислений и тестовых сигналов, значительно отличающихся от используемых в процессе эксплуатации привода, является трудноосуществимым в условиях производства.

Среди рассмотренных методик идентификации параметров АД для практического применения наиболее подходят предложенные в [2, 5]. Методика, описанная в [5], позволяет определить параметры Т-образной схемы замещения АД. При этом активное сопротивление статора измеряется при постоянном напряжении статора, а остальные параметры – в режимах холостого хода и короткого замыкания. Для сбора данных необходимо наличие амперметра, ваттметра и вольтметра.

Подход, изложенный в [2], предполагает использование четырех испытательных режимов: пульсирующего вектора (среднее значение амплитуды и углового положения неизменны), холостого хода, короткого замыкания (вал заторможен, вектор напряжения вращается с некоторой частотой), отключения двигателя от источника питания. Согласно данному подходу, все параметры двигателя определяются последовательно. Для расчетов используется информация

о фазных токах и напряжениях, измеряемых в приводе, что позволяет избежать применения дополнительных измерительных приборов. Каждый из параметров имеет свой критерий качества настройки.

Однако данные подходы, несмотря на сравнительную простоту, обладают рядом недостатков. Первая методика позволяет определить параметры только для статического режима работы, что затрудняет коррекцию параметров в зависимости от нелинейности кривой намагничивания, температуры и других внешних факторов. Вторая методика предполагает наличие квалифицированного персонала для проведения сложных расчетов, а также требует значительных временных затрат. Следует также отметить, что в обоих случаях производится определение параметров схемы замещения двигателя, не используемых непосредственно, и в каждой конкретной системе требуется их дополнительный пересчет с учетом масштабирующих коэффициентов.

Таким образом, в условиях использования современных асинхронных приводов с векторной системой управления актуальной является задача разработки методики настройки наблюдателя магнитного потока ротора, обеспечивающей максимальное использование АД по моменту и скорости. Данная методика должна отличаться простотой, минимумом вычислений и выполняться по критерию качества настройки, универсальному относительно структуры наблюдателя.

Для определения влияния погрешности в оценке значения постоянной времени ротора T_r на характеристики системы были проведены исследования математической модели векторного контура управления моментом в среде Simulink. В процессе экспериментов модель электропривода работала в режиме удержания положения. Оценка T_r , используемая в структуре наблюдателя фазы потока ротора, изменялась в диапазоне от 0,4 до 1,6 номинального значения постоянной времени ротора с шагом 0,1. Для каждого значения T_r момент двигателя определялся при номинальном значении тока статора. Результаты моделирования для двигателя мощностью 15 кВт представлены на рис. 1.

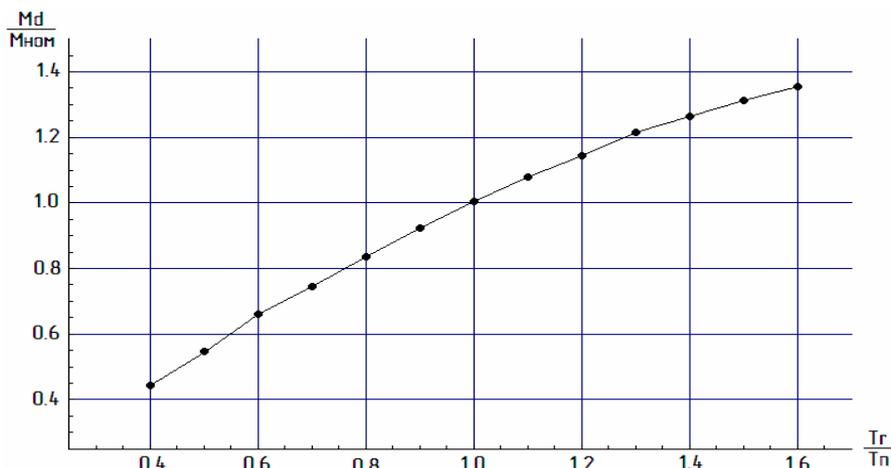


Рис. 1. Зависимость момента от величины отклонения оценки Tr

Анализ полученной зависимости показывает, что погрешность настройки наблюдателя фазы потока ротора существенно сказывается на величине момента, развиваемом двигателем при одном и том же токе и напряжении статора. Полученные данные показывают, что при отклонениях оценки Tr в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения влияние допущенной ошибки на момент незначительно и составляет $\pm 7-8\%$. При отклонениях оценки Tr 60% и более отклонения в моменте при заданном значении тока статора могут достигать $40-50\%$.

Причиной возникновения зависимости момента АД от погрешности оценки Tr является наличие перекрестной связи между намагничивающей и активной составляющими тока статора. При совпадении оценки Tr с действительным значением постоянной времени ротора Tn активная составляющая практически не оказывает влияния на магнитный поток двигателя. При этом токи оказываются параллельными осям координатной системы. В случае неправильной настройки составляющая тока статора, формируемая в канале управления моментом,

оказывается неперпендикулярной к магнитному потоку и току намагничивания. В данном случае активный ток частично либо размагничивает, либо намагничивает двигатель, то есть создает паразитный намагничивающий ток, тем больший, чем больше нагрузка на двигатель (рис. 2).

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что даже при значительных отклонениях оценки постоянной времени ротора от действительного значения (до $50-60\%$) система сохраняет свою работоспособность, но при этом с энергетической точки зрения становится малоэффективной. Из этого следует, что при отсутствии жестких требований к энергоэффективности привода оценка постоянной времени возможна с погрешностью $20-30\%$. Однако в случаях, когда любые потери момента или скорости недопустимы, определение точного значения постоянной времени является необходимым условием обеспечения заданных характеристик электропривода.

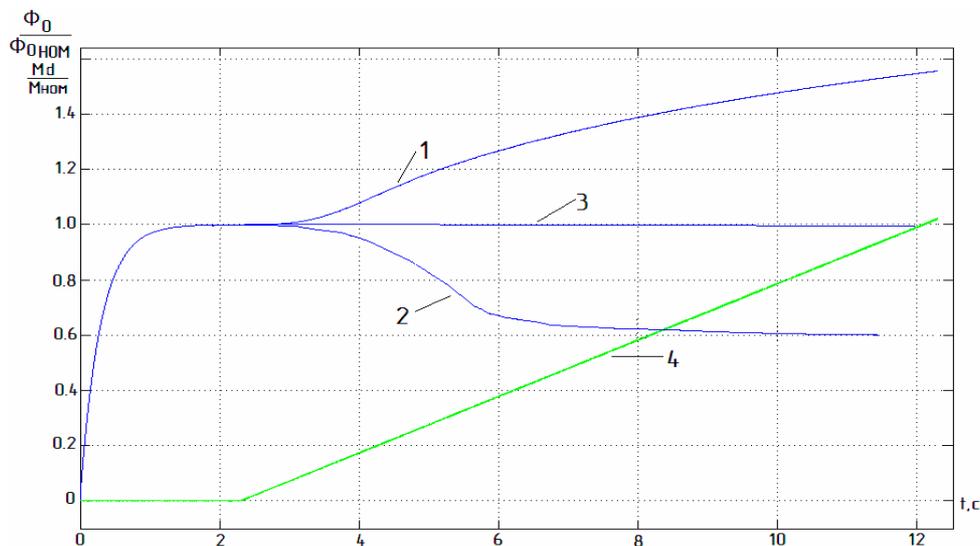


Рис. 2. Переходные процессы по магнитному потоку при увеличении момента нагрузки: кривая 1 – $Tr/Tn = 1,4$; кривая 2 – $Tr/Tn = 0,6$; кривая 3 – $Tr/Tn = 1$; кривая 4 – момент нагрузки

Примером могут служить приводы главного движения металлорежущих станков, работающие в зоне глубокого ослабления поля. В такой ситуации в случае сильного размагничивания двигатель оказывается неспособным обеспечить требуемый момент из-за ограничения на модуль тока статора. С другой стороны, при сильном намагничивании увеличение магнитной постоянной двигателя и, как следствие, противо-ЭДС приводит к сокращению скоростного диапазона. Исходя из этого, для более полного использования возможностей АД при векторном управлении необходимо разработать методику настройки параметра Tr .

Следует отметить, что, по опыту, разброс постоянных времени ротора АД общепромышленного исполнения одного типоразмера для разных производителей может достигать 30 %. У двигателей одного производителя и типоразмера разброс параметров может составлять 7–10 %. Как следствие, если высоких требований к характеристикам электропривода не предъявляется, то в качестве оценки Tr можно использовать усредненные значения. При необходимости обеспечения минимальных потерь момента оценку Tr необходимо выполнять для каждого АД.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1) погрешность оценки постоянной времени ротора определяет угол между вычисленными и фактическими составляющими тока статора, формируемыми каналами магнитного потока и момента, или, иными словами, степень перекрестной связи между каналами управления;

2) в случае некорректной настройки наблюдателя появление активного тока (при разгоне или торможении, приложении внешнего момента) будет приводить к размагничиванию или намагничиванию двигателя (рис. 3) и, как следствие, изменять момент двигателя и его магнитную постоянную.

Исходя из данных положений возможно оценить величину перекрестной связи между каналами активной и магнитной составляющих токов посредством измерения магнитного потока и момента АД. Поскольку непосредственное измерение магнитного потока затруднительно, для оценки параметра Tr воспользуемся значением момента АД.

Зависимость динамического момента АД от активного и намагничивающего токов описывается соотношением

$$M_D = C_M(I_{MAG})I_{MAG}I_{ACT}, \quad (1)$$

где M_D – динамический момент двигателя; $C_M(I_{MAG})$ – магнитная постоянная как функция тока намагничивания; I_{MAG} и I_{ACT} – намагничивающая и активная составляющие тока статора.

Данное выражение является математическим описанием того, что при постоянстве тока намагничивания, независимо от нелинейности кривой намагничивания, скорости, времени и внешних воздействий, в линейной зоне динамический момент двигателя должен быть линейной функцией от задания на активный ток:

$$M_D = const \cdot I_{ACT}. \quad (2)$$

В системе управления векторным приводом при замкнутом контуре управления положением или скоростью использование для настройки равенства (2) затруднительно вследствие взаимосвязи между активной и намагничивающей составляющими тока статора. Поэтому настройку наблюдателя потока следует производить с разомкнутым внешним контуром. При таком подходе, согласно (2), момент АД может быть использован в качестве оценки перекрестной связи:

$$M_D(t) \approx const. \quad (3)$$

Непосредственное использование соотношения (3) в процессе настройки требует в явном виде оценивать момент АД. В некоторых публикациях указывается на то, что косвенно о моменте, развиваемом двигателем, можно судить по составляющим тока статора в векторной системе управления. Однако, как показали исследования, данное допущение применительно к асинхронным двигателям верно только для качественно настроенного наблюдателя фазы магнитного потока ротора. Прямое измерение момента посредством нагрузочных машин является затратным, так как требует специального оборудования.

Исходя из недостатков описанных способов определения момента, а также выбранного испытательного воздействия, в качестве оценки динамического момента двигателя предложено использовать ускорение ротора:

$$M_D = \varepsilon J_P + M_C, \quad (4)$$

где ε – ускорение двигателя; J_P – момент инерции ротора; M_C – момент сопротивления.

Ускорение ротора может быть достаточно просто получено посредством вычисления второй конечной разности от измерителя положения ротора.

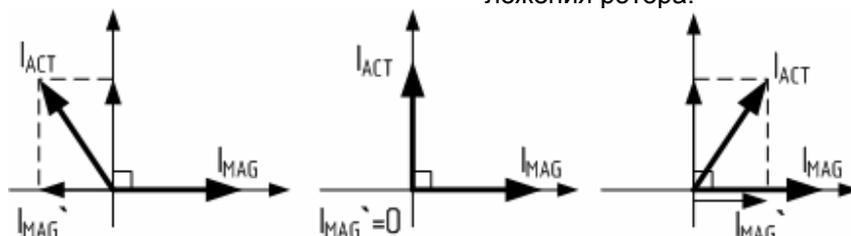


Рис. 3. Векторные диаграммы ориентации фактических составляющих тока статора

Таким образом, основным критерием качества настройки наблюдателя потока ротора можно считать постоянство ускорения, независимое от времени и задания на активный ток, при разгоне электропривода на холостом ходу.

Как показали испытания, настройку наблюдателя целесообразно выполнять в несколько этапов. На первом этапе осуществляется грубая настройка, в результате которой определяется приблизительная оценка постоянной времени ротора для номинального тока намагничивания. На втором этапе выполняется точная настройка, позволяющая достичь заданного критерия качества. При необходимости управления магнитным потоком выполняется третий этап, где производится расчет коррекции настройки наблюдателя в зависимости от величины тока намагничивания.

Перед началом настройки ток намагничивания необходимо установить равным току холостого хода двигателя, что позволит двигателю работать в режиме, близком к номинальному. Величина тока холостого хода может быть измерена при прямом включении АД в трехфазную сеть. Альтернативным способом определения тока холостого хода может быть его вычисление на основании информации о номинальном действующем значении тока статора. Для большинства двигателей значение тока холостого хода равно 30–40 % от указанной величины.

На первом этапе грубой настройки производятся эксперименты по разгону двигателя с постоянным заданием на активный ток, равным 80–120 % от установленного тока намагничивания. Начальное значение T_r выбирается большим, порядка 10–15 секунд. Если привод после подачи задания на активный ток начинает вращение и останавливается или вращается с по-

стоянной скоростью, то постоянную времени T_r нужно уменьшить. Настройку на данном этапе можно считать завершенной, когда привод устойчиво разгоняется до наступления ограничения по напряжению.

На этапе точной настройки для полученного значения постоянной времени T_r производится серия экспериментов по разгону электропривода с разными значениями задания на активный ток. В реальных условиях достаточно выбрать 4–5 дискретных уровня активного тока, перекрывающих весь рабочий диапазон. В идеале зависимость ускорения электропривода от времени должна быть линейной, до наступления ограничения по напряжению статора. На практике характер процесса в зависимости от задания на активный ток может значительно изменяться вследствие действия перекрестных связей. В результате оценки характера процесса разгона может потребоваться скорректировать T_r либо в сторону увеличения, если ускорение с ростом скорости увеличивается, либо в сторону уменьшения, если ускорение с ростом скорости снижается. Процесс настройки прекращается при обеспечении постоянства ускорения, независимо от времени и задания на активный ток.

Разработанная методика настройки постоянной времени была проверена экспериментально на опытном образце электропривода IntDrive-Auto с общепромышленным АД АИР100L4 мощностью 4 кВт [4]. Графики результатов приведены на рис. 4–6. Сигнал задания на активный ток двигателя изменялся в диапазоне от 0,31 до 6,2 А с шагом 0,31 А при токе намагничивания 4,65 А.

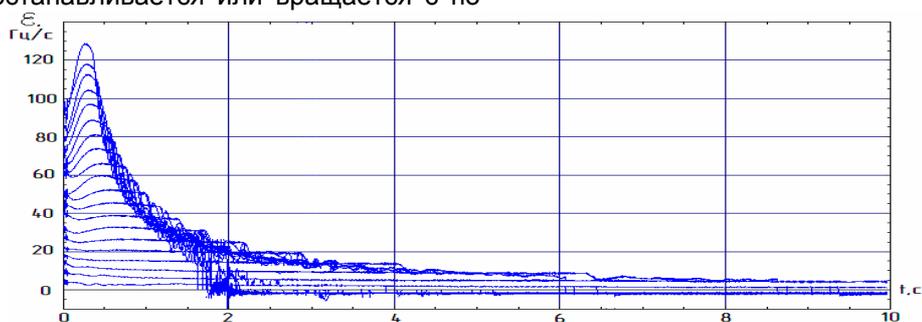


Рис. 4. Переходной процесс по ускорению при заниженной оценке T_r

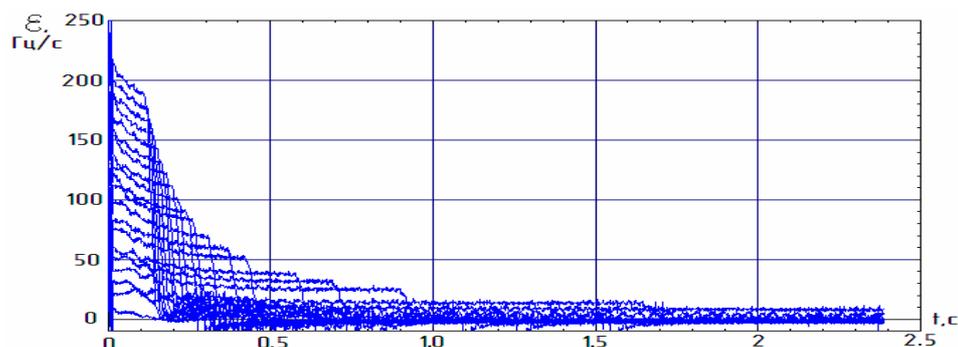


Рис. 5. Переходной процесс по ускорению при завышенной оценке T_r

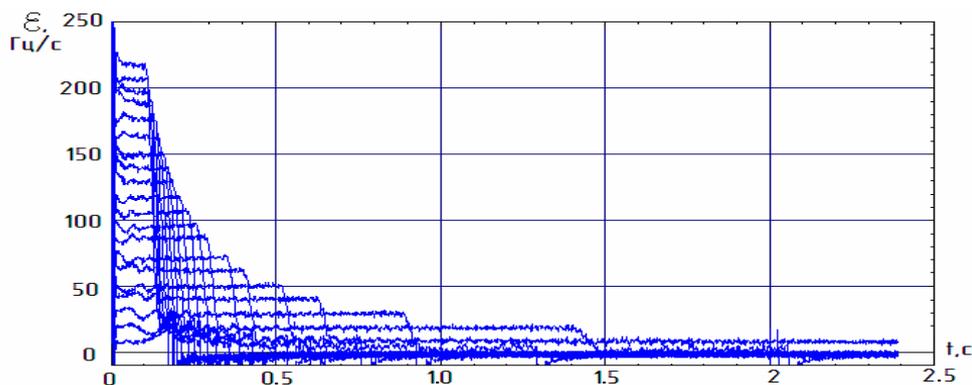


Рис. 6. Переходной процесс по ускорению при оптимальной оценке T_r

В том случае, если привод должен работать с постоянным магнитным потоком, настройку наблюдателя можно считать законченной. Если же предполагается управление током намагничивания, то необходимо выполнить третий этап настройки.

Испытательное воздействие и критерий качества настройки, применяемые на третьем этапе, остаются неизменными. Отличие состоит в том, что в данном случае вариации подвергается задание на ток намагничивания, а задание на активный ток для всех экспериментов устанавливается постоянным.

Выполнять настройку постоянной времени для каждого значения тока намагничивания в соответствии с подходом, представленным выше, не рационально, так как это требует проведения большого числа экспериментов. Поэтому оптимальное значение постоянной времени T_r в зависимости от тока намагничивания предлагается определять численным путем. Расчеты проводятся на основании данных, полученных из серии экспериментов, выполненных с постоянной настройкой наблюдателя потока ротора (рис. 7) с учетом системы уравнений

$$\begin{cases} T_r = \frac{L_p}{R_p} = \frac{L_2 + L_{12}}{R_p} \approx \frac{L_{12}}{R_p} = \frac{L_{12}(I_{MAG})}{constant} \\ M_D = J \cdot \varepsilon = C_1 \cdot I_{MAG} \cdot I_{ACT} \cdot L_{12}(I_{MAG}) \end{cases} \quad (6)$$

где L_p, R_p – приведенные индуктивность и активное сопротивление фазы ротора; L_2 – собствен-

ная индуктивность рассеяния фазы ротора; C_1 – коэффициент пропорциональности.

При условии обеспечения оптимальной настройки хотя бы для одного значения тока намагничивания, используя соотношения системы (6), информацию о текущем значении тока намагничивания I_i и о начальном ускорении ε_i при данном токе, получаемую из анализа графиков (рис. 6), можно составить соотношения для пересчета постоянной времени под конкретный ток намагничивания.

Для тока намагничивания, отличного от номинального значения, уравнение пересчета примет вид

$$\hat{T}_r = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{OPT}} \frac{I_{OPT}}{I_i} T_{rOPT}, \quad (7)$$

где \hat{T}_r – расчетная постоянная времени; T_{rOPT} – оптимальное значение постоянной времени; ε_{OPT} – ускорение, соответствующее оптимальной постоянной времени; I_{OPT} – ток намагничивания, для которого проводилась настройка наблюдателя на втором этапе.

Разработанная методика коррекции по току намагничивания была проверена экспериментально на опытном образце электропривода. Сначала были проведены эксперименты с неизменной настройкой наблюдателя. Полученные кривые приведены на рис. 7.

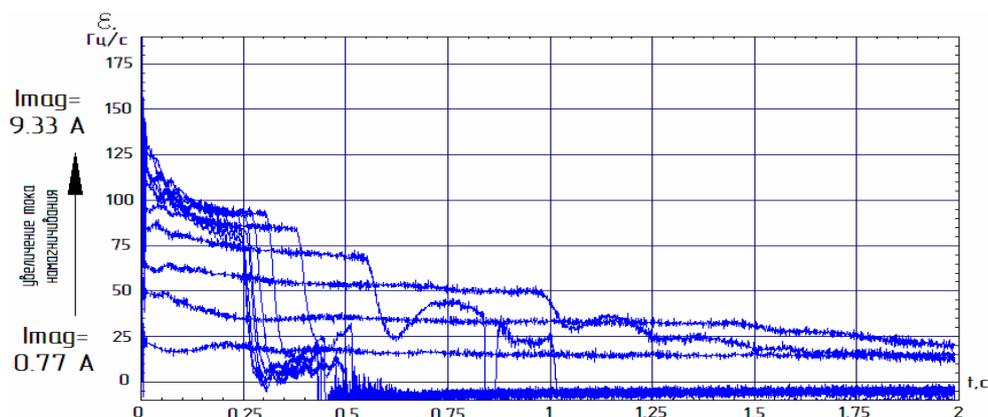


Рис. 7. Переходные процессы по ускорению при неизменной настройке наблюдателя

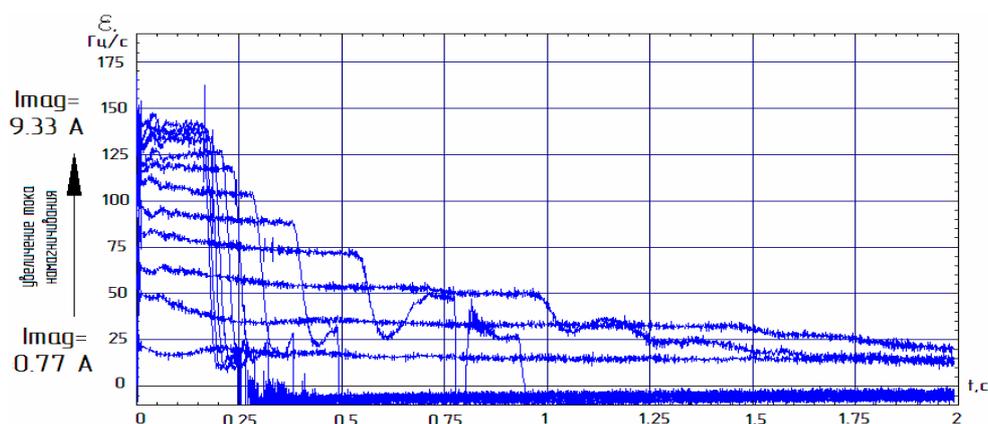


Рис. 8. Переходные процессы по ускорению при коррекции настройки наблюдателя

Анализ полученных графиков показывает, что при увеличении тока намагничивания настройка наблюдателя потока ротора все более отличается от оптимальной. Полученный результат согласуется с системой (6) и объясняется зависимостью постоянной времени ротора от изменения взаимной индуктивности при движении рабочей точки по кривой намагничивания.

Далее на основании данных о начальных значениях ускорения и текущем значении тока намагничивания при помощи соотношения (7) был проведен расчет скорректированных значений постоянной времени. После этого для рассчитанных значений постоянной времени была проведена еще одна серия экспериментов. Результаты представлены на рис. 8.

Анализ полученных результатов показывает, что предлагаемый алгоритм коррекции постоянной времени ротора позволяет обеспечить выполнение предложенного критерия оптимальности (постоянство значения ускорения в процессе разгона на холостом ходу) за одну серию экспериментов. При этом разработанный подход достаточно прост и не требует применения специального лабораторного оборудования.

Таким образом, для обеспечения максимального использования АД по моменту и скорости необходимо выполнять точную настройку наблюдателя магнитного потока ротора. Основными преимуществами предложенной методики настройки наблюдателя, использующей в качестве критерия постоянство ускорения при постоянной величине активной и намагничивающей составляющих тока статора, являются отсутствие необходимости в дополнительных средствах измерения и априорных данных о параметрах двигателя. Выбранный критерий качества настройки является универсальным и не зависит

от структуры и конкретной реализации наблюдателя магнитного потока ротора.

Список литературы

1. **Burkov A., Krasilnikyants E., Smirnov A.** The Model of Nonstationary Rotor Magnetic Field Observer in the Induction Motor // Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering. – 2011. – 4/29. – P. 137–142.
2. **Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н.** Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. – 2003. – № 7.
3. **Application of Genetic Algorithms to Motor Parameter Determination for Transient Torque Calculations** // Pragasen Pillay, Senior Member, IEEE, Ray Nolan, and Towhidul Haque. IEEE Transactions on Industry Applications. – Sept./Oct. 1997. – Vol. 33. – No. 5.
4. **Исследования электропривода подачи для станков с ЧПУ** / Бурков А.П., Красильникьянц Е.В., Смирнов А.А., Салахутдинов Н.В. // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 2. – С. 71–77.
5. **Induction Motor Test (No-Load Test, Blocked Rotor Test):** http://www.ece.msstate.edu/~donohoe/ece3414induction_machines_II.pdf

References

1. Burkov, A., Krasilnikyants, E., Smirnov, A. The Model of Nonstationary Rotor Magnetic Field Observer in the Induction Motor», in Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering, 2011, 4/29, pp. 137–142.
2. Vinogradov, A.B., Chistoserdov, V.L., Sibirtsev, A.N. Adaptivnaya sistema vektornogo upravleniya asinkhronnym elektropriivodom [Self-organizing System of Vectorial Control of Asynchronous Electric Drive], in *Elektrotehnika*, 2003, no. 7.
3. Application of Genetic Algorithms to Motor Parameter Determination for Transient Torque Calculations. Pragasen Pillay, Senior Member, IEEE, Ray Nolan, and Towhidul Haque. IEEE Transactions on Industry Applications, Sept./Oct. 1997, vol. 33, no. 5.
4. Burkov, A.P. Krasil'nik"yants, E.V., Smirnov, A.A., Salakhutdinov, N.V. *Vestnik IGJeU*, 2011, issue 2, pp. 71–77.
5. Induction Motor Test (No-Load Test, Blocked Rotor Test): http://www.ece.msstate.edu/~donohoe/ece3414induction_machines_II.pdf

Работа выполнена по Госконтракту № 13.G25.31.0057 с Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологического производства.

Бурков Александр Павлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры ЭИМС,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, А-122а,
телефон (4932) 26-97-52,
e-mail: burkov@eims.ispu.ru

Красильникъянц Евгений Валерьевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры ЭИМС,
телефон (4932) 26-97-52,
e-mail: krev@eims.ispu.ru

Смирнов Александр Андреевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры ЭИМС,
телефон (4932) 26-97-52,
e-mail: smirnov@eims.ispu.ru

Булдукян Георгий Арутюнович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры ЭИМС,
телефон (4932) 26-97-52,
e-mail: zhuf@bk.ru