



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности математического моделирования автоматизированного электропривода при анализе качества преобразования электрической энергии

Байков А. И., канд. техн. наук

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Математическое моделирование является эффективным инструментом анализа качества преобразования энергии в автоматизированном электроприводе. Современные регулируемые электроприводы используют в качестве преобразователей параметров электроэнергии устройства на силовых электронных вентилях с управлением на аналого-цифровых элементах. Процессы в таких системах воспроизводятся с необходимой детализацией на основе решения дифференциальных уравнений, составляемых для схем замещения элементов силовой части, и отображении функционирования логических и микропроцессорных устройств в цепях обратных связей. Применение матрично-топологического анализа специальных резистивных схем с источниками ЭДС и тока для расщепления мгновенных перераспределений напряжений и токов при переключениях ключевых элементов позволяет воспроизводить процессы с любой заранее неизвестной последовательностью работы вентиля в сложных многоконтурных схемах.

Анализ показателей качества энергии, отдаваемой электродвигателю, осложнен существенно нелинейной формой кривых токов и напряжений, особенно при широтно-импульсном способе управления. Предложено для достижения определенности рассчитывать мощность искажений не по сумме гармонических составляющих, а как среднеквадратичный остаток от полной мощности за вычетом активной и реактивной мощностей и возможной (обычно сравнительно небольшой) мощности несимметрии. Отмечена необходимость проведения моделирования с малым шагом, обеспечивающим достаточное для гармонического анализа число точек в кривых токов и напряжений.

Сопоставляются расчетный и экспериментальный спектры гармонического состава тока статора для характерного примера анализа энергетических показателей электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Ключевые слова: математическая модель, переключения, аналого-цифровое управление, синхронный двигатель с постоянными магнитами, энергетические показатели, спектр гармоник.

Анализ качества преобразования электрической энергии является важным этапом при разработке и применении автоматизированных электроприводов. Он предполагает воспроизведение с помощью математического моделирования происходящих в них характерных процессов, разложение кривых потребляемых и отдаваемых вентильными преобразовательными устройствами токов и напряжений в ряд Фурье, расчет полной мощности и ее составляющих [1]. Для обеспечения достоверности результатов большое значение имеет возможность отображения с необходимой степенью детализации процессов переключений ключевых элементов, функционирования аналого-цифровых блоков схем управления и электромеханического преобразователя.

В случае использования типовых схем преобразователей, алгоритмов управления и электрических машин задача моделирования может быть решена на основе применения готовых моделей Matlab-Simulink, которые, однако, при рассмотрении новых технических решений по структуре и элементам систем оказываются неработоспособными. Например, в макромоделях силовых преобразовательных схем обычно игнорируются дополнительные переключения, вызываемые в некоторых ситуациях прерываниями токов ключевых элементов при отсутствии переключений импульсов управления. Методы интегрирования, применяемые в добавляемых моделях дискретных элементов силовой схемы, могут не согласовываться с методами, используемыми

в макромоделях, касающихся электрических машин и звеньев систем управления. Из-за частой смены структур и коэффициентов дифференциальных уравнений дискретной вентильной схемы замещения происходит замедление и даже заикливание процесса расчета всей системы. Это особенно характерно при анализе современных электроприводов переменного тока с векторными принципами управления, когда даже в статических режимах требуется учитывать замкнутые обратные связи, преобразование физических переменных с разнообразными вариантами микропроцессорной реализации. В данной статье предлагается широко распространенные методы воспроизведения квазиустановившихся процессов в системе автоматизированного электропривода по интервалам проводимости вентилей дополнить алгоритмами определения заранее неизвестных переключений. В совокупности с методами детального воспроизведения процессов в системах управления и электрических машинах это обеспечивает высокую достоверность анализа качества преобразования электрической энергии в системах электропривода, хотя и требует определенных затрат на программирование.

Статический режим работы силового полупроводникового устройства воспроизводится путем расчета некоторого циклического набора переходных процессов по интервалам проводимости вентилей. Для каждого интервала формируется своя схема замещения, у которой токи независимых контуров с индуктивностями и независимых напряжений емкостей составляют вектор независимых переменных уравнения состояния силовой электронной схемы. К этому уравнению добавляются уравнения состояния электромеханического преобразователя и системы управления:

$$\frac{d}{dt}Y_e = V_e(Y_e, Y_m, Y_x);$$

$$\frac{d}{dt}Y_m = V_m(Y_e, Y_m, Y_x);$$

$$\frac{d}{dt}Y_x = V_x(Y_e, Y_m, Y_x).$$

Здесь представлены векторы переменных состояния Y_e , Y_m , Y_x электрической схемы замещения, электромеханического преобразователя и инерциальных звеньев системы управления. Начальными условиями системы уравнений являются значения переменных

состояния в момент начала рассчитываемого интервала.

Условие закрывания любого из вентилей — диода, тиристора или транзистора — переход его тока через нуль. Открытие тиристор и транзисторов происходит при положительном напряжении в прямом направлении и наличии открывающего импульса. Для открывания диода достаточно появления положительного напряжения “анод-катод”. Транзисторы мгновенно закрываются при снятии сигналов управления. Если цепь протекания тока через транзистор содержала индуктивность, то разрываемый ток перетекает в обратный диод противоположного плеча схемы преобразователя, т.е. при такого рода переключениях происходит мгновенное перераспределение токов в безындуктивных ветвях вентильной схемы. В безъёмкостных цепях имеют место мгновенные изменения напряжений при переключениях вентилей. Характерным примером такого перераспределения служит приложение обратного напряжения к отработавшему вентилю.

Интегрирование системы уравнений состояния происходит с начальным шагом Δt , который определяет число мгновенных значений в кривых воспроизведенных токов и напряжений. Значение этого шага должно быть настолько малым, чтобы число расчетных точек в кривых токов и напряжений на периоде высшей гармонической составляющей получаемого ряда было достаточным для расчета коэффициентов разложения Фурье. Опыт показывает, что достоверное определение наивысшей гармоники происходит при шаге dt , меньшем по крайней мере в 20 раз периода данной гармоники. Начальные шаги дробятся при отработке переключений, но значения физических переменных на этих шагах не участвуют в процедуре гармонического анализа.

Схема замещения преобразовательного устройства, составленная в предположении, что все вентили открыты, может быть названа полной схемой замещения, которой соответствует полный граф. На интервале с определенным сочетанием открытых и закрытых вентилей конфигурация работающей схемы представляется графом состояния. Сравнительно несложные логические действия, описанные, например, в [2], позволяют преобразовать топологические матрицы полного графа к виду графа состояния и получить в итоге уравнение состояния силовой схемы по ме-

туду контурных токов или узловых напряжений.

Закрытые вентили представляют собой разрывы электрической цепи, и напряжения на них складываются как результат перераспределения напряжений на работающих вентилях, обтекаемых токами, либо вступающих в работу с нулевыми токами. Для расчета этого распределения предлагается использовать особую резистивную RE -схему замещения, которая формируется следующим образом. Ветви, обтекаемые токами, и ветви с нулевыми токами, но не являющиеся разрывами, замещаются источниками ЭДС, значения которых определены по закону Ома для участка цепи. Ветви, представляющие собой разрывы, замещаются некоторыми большими активными сопротивлениями r_{RE} . Расчет RE -схемы методом контурных токов предусматривает применение матрицы независимых контуров H_{RE} . С использованием σ -функций, отражающих состояние n_V вентилях, осуществляется следующий переход от исходных уравнений напряжений ветвей U_{RE} к напряжениям на ветвях-разрывах U_{RE} :

$$U_{RE} = R_{RE} I_{RE} - E_{RE},$$

где $R_{RE} = r_{RE} \text{diag}(1 - \sigma_k)$; $k = 1, 2, \dots, n_V$; σ_k — сигма-функция вентиля (0 — закрыт, 1 — открыт).

Отсюда формула для расчета напряжений на закрытых вентилях

$$U_{RE} = R_{RE} H'_{RE} (H_{RE} R_{RE} H'_{RE})^{-1} H_{RE} E_{RE}$$

выводится как

$$U_{RE} = R_{RE} I_{RE} = R_{RE} H'_{RE} I_{RE_h},$$

где $I_{RE_h} = (H_{RE} R_{RE} H'_{RE})^{-1} H_{RE} E_{RE}$.

Следует отметить, что условное значение сопротивлений RE -схемы не отражается на распределении напряжений, потому что происходит умножение прямой матрицы сопротивлений на обратную, при котором общий множитель r_{RE} сокращается.

Закрывание вентилях вызывает также мгновенное перераспределение токов в безындуктивных цепях, что может вызвать вторичные переключения. Для отображения этого процесса предлагается применять дополнительный матрично-топологический анализ с использованием искусственной RJ -схемы замещения, которая получается исходя из принципов, аналогичных принципам формирования RE -схемы. В качестве источников тока выбирают

ся ветви с индуктивностями, токи которых согласно законам коммутации не могут изменяться скачком. Токи же остальных работающих ветвей могут изменяться мгновенно, и потому эти ветви замещаются резисторами с условно малыми сопротивлениями r_{RJ} . Анализ мгновенного перераспределения токов требуется только для определения фактов переключений вентилях, при этом не предусматривается точное определение токов. Сопротивления диодов RJ -схемы принимаются безотносительно к их состоянию (открыты или закрыты), т. е. диоды замещаются R -цепочками без учета предшествующего состояния, поскольку оно может измениться мгновенно в любой момент. Сопротивление цепочки замещения тиристора или транзистора рассчитывается с учетом наличия или отсутствия на нем импульса управления X_k :

$$R_{Tk} = 1 + 1000(1 - X_k).$$

Конфигурация RJ -схемы такая же, как у общей схемы замещения. Чтобы избежать топологического вырождения, связанного с соединением в звезду идеальных источников тока, можно искусственно добавлять к таким узлам ветви с большими сопротивлениями. Исходными для топологического анализа являются матрицы независимых контуров H_{RJ} и соединений A_{RJ} .

Приведенные топологические матрицы виртуально с помощью списков разделяются на подматрицы, соответствующие резистивной R -подсхеме и J -подсхеме источников тока:

$$H_{RJ} = [H_R H_J]; \quad A_{RJ} = [A_R A_J].$$

Анализ RJ -схемы позволяет получить формулы для вычисления узловых напряжений, контурных токов и напряжений, а также токов ветвей RJ -схемы:

$$U_Y = -(A_R R_R^{-1} A'_R)^{-1} A_J I_J;$$

$$I_{RJh} = (H_R R_R H'_R)^{-1} H_R A'_R U_Y;$$

$$\begin{bmatrix} U_R \\ U_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_R \\ A'_J \end{bmatrix} U_Y; \quad I_{RJ} = H'_{RJ} I_{RJh}.$$

Таким образом, процедура отработки переключений реализуется по алгоритму последовательного анализа RE - и RJ -схем до получения устойчивого состояния, когда при очередной итерации не обнаруживается новых переключений (рис. 1).

Представленное математическое описание процессов в вентильных схемах позволяет с высокой степенью достоверности анализировать сложные схемы с большим числом силовых ключей. При воспроизведении различных режимов вентильных схем с технически обоснованным сочетанием параметров элементов силовой части и системы управления обычно не возникает неопределенных ситуаций и не происходит закливание алгоритмов.

Анализ процессов в управляемых электроприводах переменного тока осложнен применением прямых и обратных координатных преобразований. Например, система управления электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами [3] содержит замкнутые контуры регулирования преобразованных токов статора по осям d и q , что предусматривает преобразование сигналов датчиков фазных токов. Для обеспечения адекватности отображения процессов функционирования электропривода имеет значение учет особенностей аппаратной реализации этих преобразований, включая функции аналого-цифровых и цифроаналоговых переходов. Обоснованная детализация алгоритмов воспроизведения подобных особенностей обеспечивает точность и достоверность моделирования. Так, в указанном примере в качестве задания реактивной составляющей i_d используется нулевое значение, а активной i_q — значение, определяемое отклонением частоты вращения ротора от заданной. Пропорционально-интегральные или пропорционально-интегральные регуляторы с дифференциальной составляющей реализуются в аналоговом или цифровом виде, что с допустимой идеализацией может учитываться при составлении модели. По выходным сигналам регуляторов вычисляются требуемые значения реактивной и активной составляющих и U_q вектора напряжения статора, которые определяют длину и направление вектора напряжения. На статоре формируется система трехфазных напряжений с частотой и фазами, соответствующими частоте вращения и углу поворота ротора.

Для экспериментальной проверки и подтверждения практической значимости предложенных методов детального моделирования рассматривается вариант анализа качества энергии в замкнутой системе электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами, автономным инвертором напряжения и аналого-цифровой системой управления, имеющей отмеченные особенности. Двигатель 6DBM215S35E02 мощностью 21 кВт

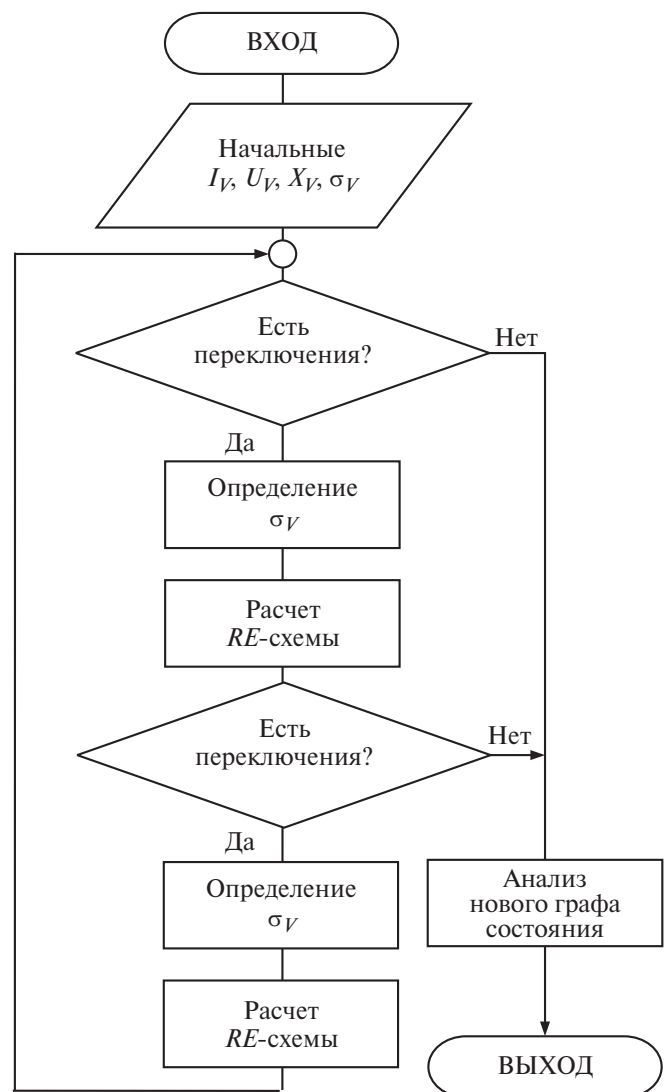


Рис. 1. Блок-схема алгоритма анализа и фиксации переключений вентиляей

с моментом нагрузки $23 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и частотой вращения ротора 66 с^{-1} имеет 6 полюсов; частота широтно-импульсной модуляции — 3 кГц; для формирования результирующего вектора напряжения статора нужных длины и направления период модуляции разделен на 8 частей.

На рис. 2 представлены расчетная диаграмма и кривая первой гармоники фазного тока. При числе шагов 9117 рассчитано 455 гармонических составляющих.

На рис. 3 сопоставлены расчетный и экспериментальный спектры амплитуд гармоник фазного тока. Очевидно полное качественное совпадение всплесков значений амплитуд гармоник в областях, кратных частоте модуляции. Можно отметить приемлемое количественное соответствие расчетных гармонических составляющих экспериментальным.

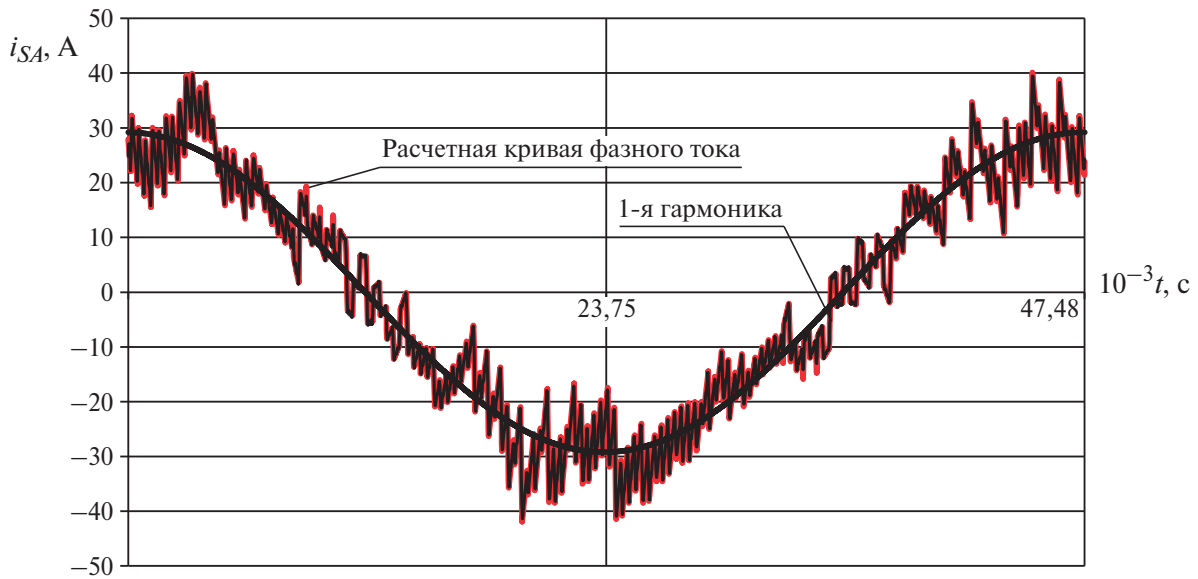


Рис. 2. Расчетная диаграмма фазного тока статора и его первая гармоника

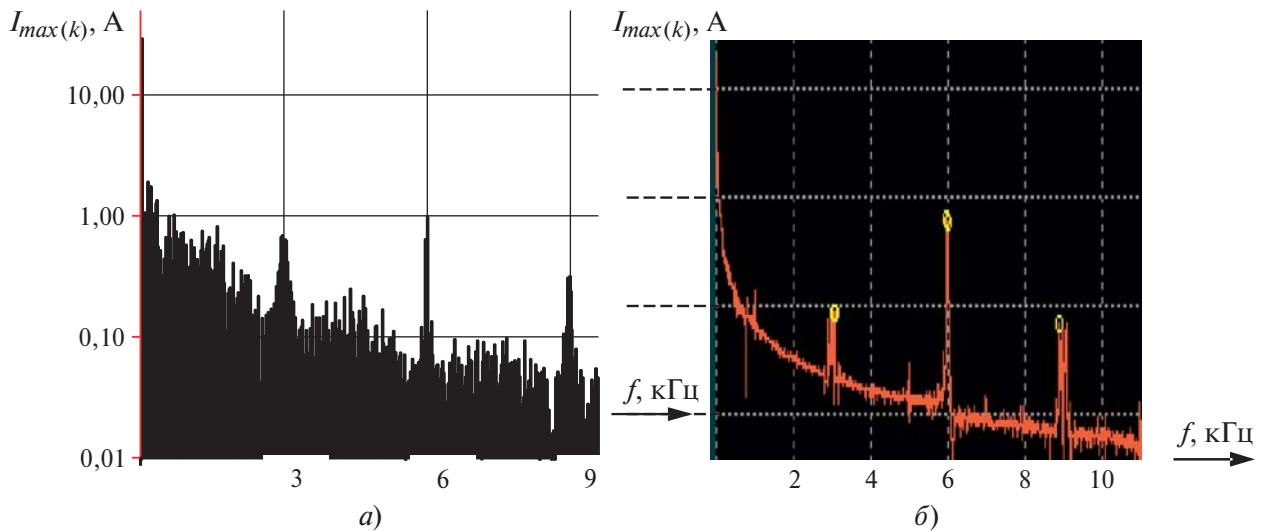


Рис. 3. Расчетный (а) и экспериментальный (б) спектры гармоник

Согласно методике [1] для анализа качества энергии, подаваемой на статор двигателя, вычисляют действующие значения тока $I_{eff.j}$ и напряжения $U_{eff.j}$ как среднеквадратичные мгновенных значений для числа шагов на периоде перемещения ротора в пределах межполюсного расстояния. По этим значениям находят полную электрическую мощность, потребляемую или отдаваемую статором двигателя, по формуле

$$S = \sum_{j=1}^3 I_{eff.j} U_{eff.j}.$$

Активную и реактивную мощности, потребляемые или отдаваемые j -й фазой статора, определяют по первым гармоническим

составляющим токов и напряжений из следующих выражений:

$$P_1 = \frac{1}{2} \sum_{j=1,2,3} I_{maxS.j(1)} U_{maxS.j(1)} \times \cos(\varphi_{U.j(1)} - \varphi_{I.j(1)});$$

$$Q_1 = \frac{1}{2} \sum_{j=1,2,3} I_{maxS.j(1)} U_{maxS.j(1)} \times \sin(\varphi_{U.j(1)} - \varphi_{I.j(1)}).$$

Мощность несимметрии намного меньше мощности искажений и проявляется в сравнительно редких случаях рассогласования параметров схемы замещения или алгоритма управления. Потому допустимо упрощение,

сводящееся к симметрии фазных напряжений, при котором применима следующая формула для расчета этой составляющей мощности:

$$Q_{\text{нсм}} = U_{\text{eff.1}} \left(2 \sum_{j=1,2,3} I_{S(1).j}^2 - \sum_{\substack{g,q=1,2,3 \\ g \neq q}} I_{S(1).g} I_{S(1).q} \cos(\varphi_{S(1).g} - \varphi_{S(1).q}) \right)^{1/2}.$$

Тогда мощность искажений, потребляемую или отдаваемую двигателем, находят как квадратичный остаток от полной мощности

$$Q_{\text{иск}} = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2 - Q_{\text{нсм}}^2}.$$

Получены следующие значения полной мощности и ее составляющих: $S = 4545 \text{ В} \cdot \text{А}$, $P_1 = 2365 \text{ Вт}$, $Q_1 = 124 \text{ В} \cdot \text{А}$, $Q_{\text{иск}} = 1013 \text{ В} \cdot \text{А}$, $Q_{\text{нсм}} = 100 \text{ В} \cdot \text{А}$, которые соответствуют экспериментальным в пределах точности определения параметров силовой схемы и системы

управления. Наличие мощности несимметрии обусловлено различием значений фазных индуктивностей статора (0,65, 0,9 и 0,95 мГн).

Таким образом, моделирование процесса функционирования электропривода с детализацией аналого-цифровых цепей обратных связей и учетом возможных, не предусмотренных алгоритмом управления переключений вентилях, позволяет получить достоверные кривые изменения токов и напряжений, что обеспечивает анализ показателей качества преобразования энергии, потребляемой двигателем.

Список литературы

1. **Маевский О. А.** Энергетические показатели вентилях преобразователей. — М.: Энергия, 1978.
2. **Байков А. И.** Математическое моделирование элементов и систем автоматизированного электропривода: Учеб. пособие. — Нижегородский гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2008.
3. **Иванов-Смоленский А. В.** Электрические машины: Учеб. для вузов. Т. 2. 2-е изд., перераб и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2004.

baikov-a-i@yandex.ru