

Оптимизация на модели одиночного цикла коммутации фазы вентильно-индукторного двигателя

06, июнь 2013

DOI: 10.7463/0613.0579054

Красовский А. Б.

УДК 621. 313. 323

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

krasovsky@bmstu.ru

Введение и постановка задачи

Установление связи между предельными энергетическими возможностями электропривода, параметрами двигателя и управления является важнейшим этапом его рационального проектирования. Для традиционных систем электропривода эти вопросы достаточно проработаны. Наиболее полно эта проблема рассмотрена в [1]. Учитывая, что широкие регулировочные возможности вентильно-индукторных двигателей (ВИД) являются одной из их характерных особенностей, вопросы увязки энергетических и регулировочных показателей для них имеют также большое значение.

Обычно работа ВИД состоит в поочередном подключении его фаз к источнику питания в определенных положениях ротора. Поэтому при малом числе фаз (как правило, их от 3 до 5) оптимизация энергетических показателей ВИД связана с соответствующей организацией каждого цикла коммутации его фаз, т.е. формой фазного тока от момента их включения до отключения [2].

На рисунке 1 в упрощенном виде показано изменение основных величин, характеризующих цикл коммутации фазы ВИД [3]: магнитной проводимости между взаимодействующими полюсами статора и ротора $\lambda(\Theta)$; напряжения на фазе $U_\phi(\Theta)$ и фазного тока $I_\phi(\Theta)$. Минимальное значение проводимости $\lambda_{\text{рас}}$ соответствует рассогласованному положению полюсов, когда начинается или заканчивается их перекрытие в угловых положениях $\Theta_{\text{рас},1}$ и $\Theta_{\text{рас},2}$, соответственно. Максимальное значение проводимости $\lambda_{\text{макс}}$ соответствует согласованному положению полюсов, когда полюс статора находится против полюса ротора. Также для упрощения принято, что

ширина полюсов статора и ротора одинакова, поэтому горизонтальный участок в зависимости $\lambda(\Theta)$ на уровне $\lambda_{\text{макс}}$, на рисунке не показан. Угол $\Theta_{\text{согл}}$ соответствует полному перекрытию полюсов при проводимости $\lambda_{\text{макс}}$.

Включение фазы обычно происходит в положении $\Theta_{\text{вкл}}$ с некоторым упреждением относительно начала перекрытия полюсов в положении $\Theta_{\text{рас,1}}$. Предварительные исследования показали, что наилучшей с точки зрения эффективности преобразования энергии в ВИД является такая организация цикла коммутации фазы, при которой на максимально возможном интервале движения с положительной производной $\frac{d\lambda(\Theta)}{d\Theta}$ в зоне генерации движущего момента в фазе протекает рабочий ток $I_{\text{ф}} = \text{const}$. Это обеспечивает создание полного движущего момента. При этом минимизируется установленная мощность инвертора, коммутирующего фазы, и при прочих равных условиях уменьшаются пульсации момента.

К моменту изменения знака производной $\frac{d\lambda(\Theta)}{d\Theta}$ и переходу ВИД в зону генерации тормозного момента вплоть до окончания цикла коммутации ток $I_{\text{ф}}$ должен иметь минимальное значение, что обеспечивается соответствующим выбором углового положения подачи команды на ее отключение $\Theta_{\text{ком}}$.

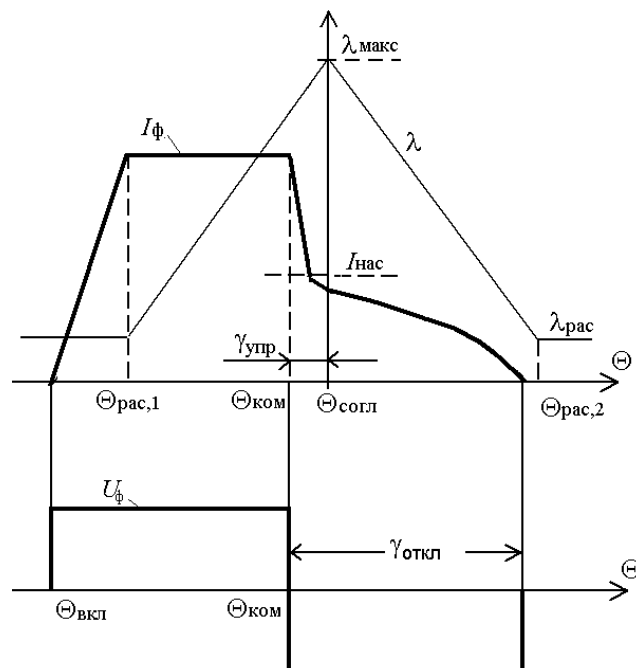


Рисунок 1 Характер изменения тока в цикле коммутации фазы двигателя.

При недостаточном упреждении начала отключения относительно положения $\Theta_{\text{согл}}$ ток в фазе I_{ϕ} не успевает существенно снизиться до перехода ВИД в зону торможения и фаза в конце цикла коммутации развивает значительный тормозной момент. Более ранняя коммутация приводит, с одной стороны, к снижению движущего момента, но с другой стороны, способствует большему снижению тока I_{ϕ} к моменту перехода ВИД в зону торможения и, как следствие, к снижению тормозного момента. Это изменяет соотношение между средними за цикл движущим и тормозным моментами, причем в общем случае темпы их изменения будут разными. При некоторых параметрах коммутации средний за цикл момент, развиваемый фазой, достигает максимального значения. Поэтому определение рациональных условий отключения фазы ВИД является важным этапом проектирования алгоритма управления приводом [4].

Для того, чтобы обеспечить форму фазного тока I_{ϕ} , как показано на рисунке 1, в условиях изменения скорости необходимо соответствующим образом изменять угловое положение включения фазы $\Theta_{\text{вкл}}$, т.е. подачи на нее положительного импульса напряжения, положения отключения фазы $\Theta_{\text{ком}}$, т.е. изменения полярности прикладываемого к ней напряжения и амплитуды этих импульсов.

Принципиальная особенность ВИД такова, что конкурентоспособные по сравнению с традиционными электрическими машинами массогабаритные и энергетические показатели достижимы только при полезном использовании насыщения магнитной системы. Поэтому в этих машинах конструктивные параметры и электромагнитные нагрузки выбирают так, что в зоне перекрытия полюсов статора и ротора имеет место сильное локальное насыщение, которое при определенных условиях переходит к общему насыщению магнитной системы. Вызванная этим нелинейная зависимость электромагнитных параметров ВИД как от взаимного положения статора и ротора, так и от фазного тока, а также дискретность в управлении в значительной степени усложняют анализ энергетических процессов в нем.

Как показано в [3], для простейшего случая кусочно-линейной аппроксимации магнитных характеристик для обеспечения $I_{\phi} = \text{const}$ в зоне перекрытия полюсов необходимо использовать следующие законы согласованного изменения положения включения фазы и подаваемого на неё напряжения:

- при токе фазы меньшем тока насыщения $I_{\phi} < I_{\text{нас}}$ угловой интервал упреждения включения $\gamma_{\text{вкл}} = (\Theta_{\text{вкл}} - \Theta_{\text{откл}})$, значение установившегося тока $I_{\phi} = I_{\text{уст}} = \text{const}$

прямо пропорционально отношению фазного напряжения к скорости вращения ротора U_{ϕ}/ω ;

- при $I_{\phi} \geq I_{\text{нас}}$ напряжение U_{ϕ} должно быть постоянно, значение установившегося тока $I_{\text{уст}}$ прямо пропорционально угловому интервалу упреждения включения $\gamma_{\text{вкл}}$ и обратно пропорционально скорости ω .

Как известно, идеализация объекта при сохранении наиболее существенных свойств и отбрасывании второстепенных, позволяет выявить его основные закономерности в наиболее простом и явном виде. В частности, описанный выше алгоритм, полученный при таком подходе, интуитивно понятен и достаточно прост в реализации. Однако кусочно-линейная аппроксимация только в первом приближении описывает реальный характер изменения кривых намагничивания ВИД и поэтому, как показывает опыт, при управлении по данному алгоритму возникают существенные отклонения действительного значения фазного тока и момента от заданных значений. Поэтому необходимо скорректировать предлагаемый в [3] алгоритм, по возможности более точно учитывая нелинейный характер магнитных характеристик двигателя. Кроме того, для оценки рациональных условий отключения ВИД необходимо рассмотреть весь цикл коммутации его фазы.

Результаты моделирования цикла коммутации фазы ВИД

Учитывая сложность рассматриваемых процессов, а также то, что для получения количественных оценок целесообразно рассмотреть весь цикл коммутации, разработана имитационная модель одиночного цикла коммутации ВИД с привлечением программы визуального моделирования MATLAB – SIMULINK. Принимаемые при построении модели допущения и её подробное описание изложены в [5, 6].

За оценку эффективности преобразования энергии в ВИД взято два показателя: силовой – средний момент, развиваемый фазой за цикл коммутации $M_{\text{ф.ср}}$, и энергетический – коэффициент электромеханического преобразования энергии $K_{\text{ЭМП}}$, определяемый как

$$K_{\text{ЭМП}} = \frac{W_{\text{мех}}}{W_{\text{эл}}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{мех}}$ – механическая энергия, преобразованная фазой за цикл коммутации; $W_{\text{эл}}$ – электрическая энергия, потребляемой фазой из источника питания за цикл коммутации.

В качестве примера на рисунке 2 показана зависимость $M_{\phi, \text{cp}}^* = M_{\phi, \text{cp}} / M_1$ от $\gamma_{\text{упр}}^* = \gamma_{\text{упр}} / (\Theta_{\text{согл}} - \Theta_{\text{рас}, 1})$ при различных значениях коэффициента локального насыщения полюсов $K_{\text{нас}}$, а на рисунке 3 зависимость $K_{\text{эмп}}$ от $\gamma_{\text{упр}}^*$ для $K_{\lambda} = 7$, где $K_{\text{нас}} = \frac{I_{\phi}}{I_{\text{нас}}}$; $I_{\text{нас}}$ – ток насыщения фазы; $M_1 = M_{\text{баз}}$ – амплитудное значение момента при $K_{\text{нас}} = 1$; $K_{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{макс}}}{\lambda_{\text{рас}}}$.

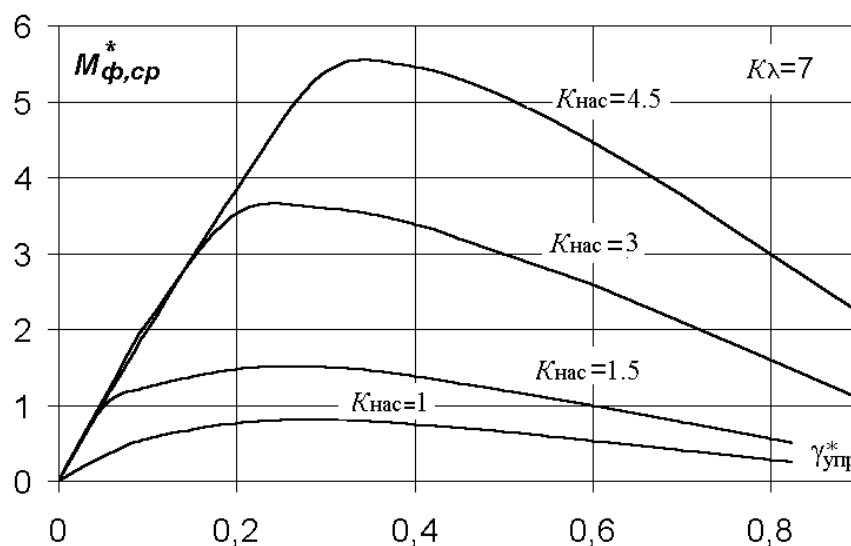


Рисунок 2. Зависимость среднего момента фазы от угла упреждения отключения фазы и коэффициента насыщения.

Как видно, отключение фазной обмотки при $\gamma_{\text{упр}}^* = 0$ (т. е. полностью на участке спада проводимости) дает $M_{\phi, \text{cp}}^* = 0$ при любом значении $K_{\text{нас}}$. С ростом $\gamma_{\text{упр}}^*$ средний момент $M_{\phi, \text{cp}}^*$ растет тем быстрее, чем больше значение $K_{\text{нас}}$, достигая максимума при некоторой величине $\gamma_{\text{упр}}^* = \gamma_{\text{м}}^*$, а затем относительно медленно спадает.

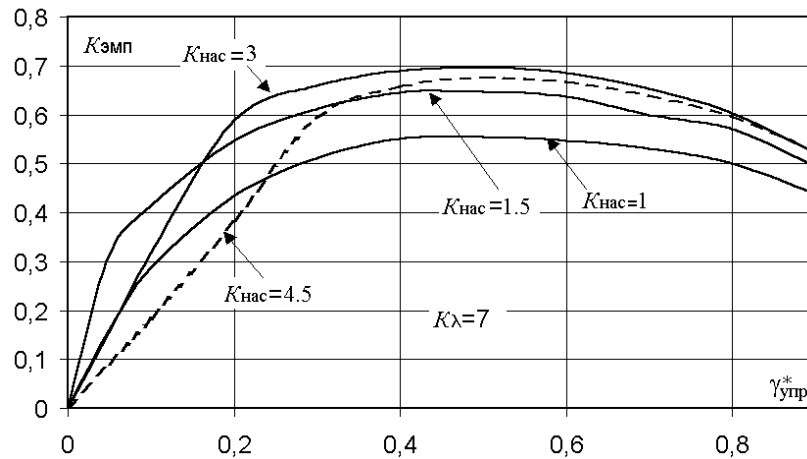


Рисунок 3. Зависимость коэффициента электромеханического преобразования энергии от угла упреждения отключения фазы и коэффициента насыщения.

Установлено, что величина γ_m^* зависит от K_λ . Эти зависимости показаны на рисунке 4. Коэффициент $K_{\text{эмп}}$ с увеличением $\gamma_{\text{упр}}^*$ также растет, но медленнее, достигая максимума при некотором значении $\gamma_k^* > \gamma_m^*$, которое близко к 0.5 и несколько уменьшается, приближаясь к 0.4 при увеличении $K_{\text{нас}}$ и K_λ . Оценивая значение $K_{\text{эмп}}$, при котором $M_{\text{ф,ср}}^*(\gamma_{\text{упр}}^*)$ достигает максимума при различных значениях K_λ и $K_{\text{нас}}$, находим, что при этом $K_{\text{эмп}}$ составляет примерно (90 – 94)% от своего максимального значения при тех же значениях K_λ и $K_{\text{нас}}$.

С другой стороны, максимум $K_{\text{эмп}}$ имеет место при большем снижении среднего момента $M_{\text{ф,ср}}^*$ по отношению к своему максимальному значению при тех же K_λ и $K_{\text{нас}}$. Это снижение составляет (78 – 85)%, причем снижение возрастает с уменьшением $K_{\text{нас}}$. Эта тенденция сохраняется при изменении K_λ от 7 до 14. Таким образом, наилучшие показатели по эффективности преобразования энергии и среднему моменту дает отключение обмотки при $\gamma_{\text{упр}}^* = \gamma_m^*$.

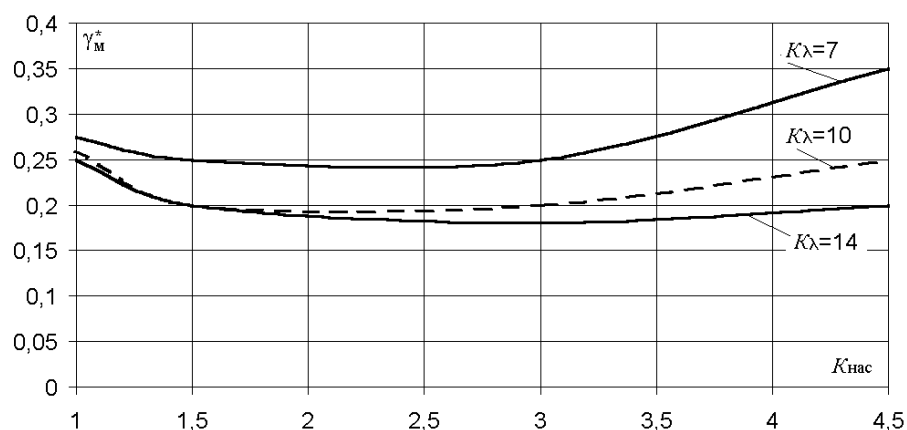


Рисунок 4. Изменение положения максимума среднего момента в функции коэффициента насыщения и отношения проводимостей.

Поскольку принятая выше аппроксимация лишь в первом приближении отражает реальный вид магнитных характеристик ВИД, произведена оценка её влияния на форму фазного тока и определена коррекция управляющих воздействий в цикле коммутации фазы.

На рисунке 5 показаны в относительных единицах кривые фазного тока I_ϕ^* и момента M_ϕ^* рассчитанные на уточненной модели с учетом реальных магнитных характеристик ВИД. Там же представлены кривые фазного тока и момента, полученные по упрощенному алгоритму коммутации фазы двигателя, которые можно рассматривать как желаемые или заданные законы их изменения. За базовое значения тока $I_{баз}$ принято его значение $I_{нас}$ соответствующие началу локального насыщения полюсов. Угловая координата Θ измеряется в долях интервала перекрытия полюсов $\Theta^* = \Theta / (\Theta_{согл} - \Theta_{рас,1})$. Как видно, значения фазного тока I_ϕ^* и момента M_ϕ^* не только существенно отклоняется от заданных значений, но и в зоне перекрытия полюсов не остаются постоянными. Дополнительные эксперименты на модели показали, что для приближения формы фазного тока к расчетной форме необходимо соответствующим образом изменять как фазное напряжение, так и интервал включения фазы.

На рисунке 6 представлена зависимость напряжения в относительных единицах $U_\phi^* = U_\phi / U_{баз}$ от тока $I_{уст}^* = I_{уст} / I_{нас}$, построенная с использованием экспериментальных магнитных характеристик ВИД с типовыми параметрами (сплошная линия) и при её

кусочно-линейной аппроксимации (штриховая линия); здесь $U_{\text{баз}} = I_{\text{нас}} \omega \frac{dL(\Theta)}{d\Theta}$. Видим, что в режиме без насыщения характеристики совпадают, а при локальном насыщении зависимость становится нелинейной.

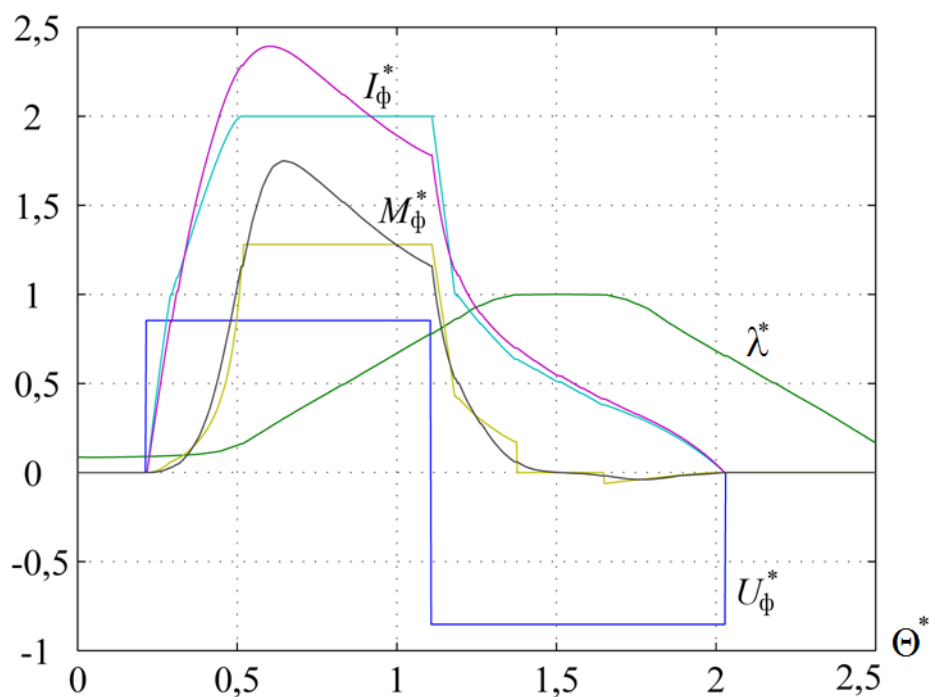


Рисунок 5. Кривые фазного тока и момента, полученные на упрощенной и уточненной модели ВИД.

Уточненная модель: — ток, — момент; упрощенная модель: — ток, — момент)

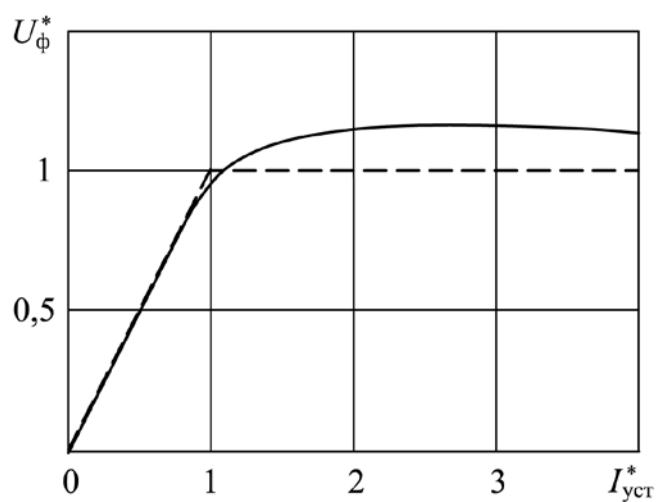


Рисунок 6. Зависимость U_{ϕ} от установившегося значения тока I_{ϕ}

Аналогичные зависимости для углового интервала включения фазы $\gamma_{\text{вкл}}^*$ показаны на рисунке 7

Как видно при токе I_{ϕ} меньшем тока насыщения $I_{\text{нас}}$ характеристики совпадают, в области локального насыщения уточненная зависимость имеет небольшую вогнутость. При $I_{\phi} > I_{\text{нас}}$ уточненная кривая лежит ниже характеристики определенной в [3].

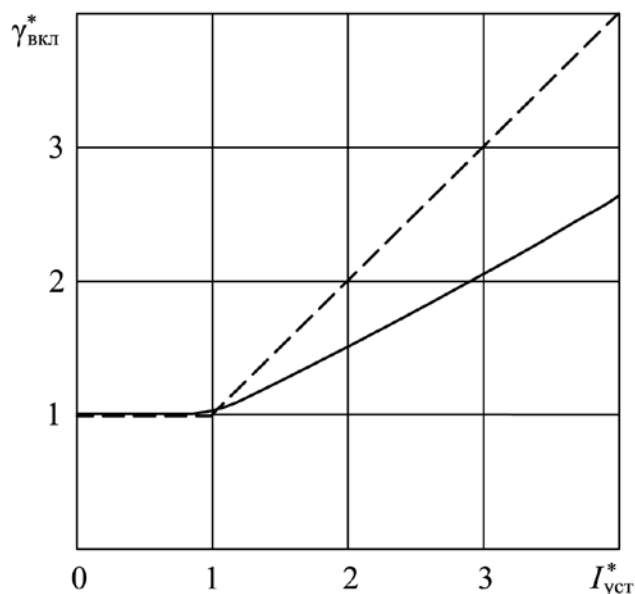


Рисунок 7. Зависимость $\gamma_{\text{вкл}}$ от амплитуды фазного тока в зоне перекрытия полюсов ВИД

Используя зависимости, представленные на рисунке 6 и рисунке 7 можно найти законы изменения управляющих воздействий для ВИД любой конфигурации. Дополнительные исследования показали, что с учетом описанной выше коррекции управляющих воздействий в цикле коммутации фазы отклонения фазного тока и электромагнитного момента от реальных значений не превышают 10%.

Выводы

1. При определении параметров коммутации фазы ВИД на основе его упрощенной модели с использованием кусочно-линейной аппроксимации магнитных характеристик возможны значительные отклонения фазного тока двигателя от расчетных значений.
2. Наилучшие показатели по развиваемому среднему моменту и коэффициенту электромеханического преобразования энергии дает коммутация ВИД при

$\gamma_1^* = \gamma_m^*$, что соответствует примерно (25 – 35)% упреждению отключения фазы относительно согласованного положения взаимодействующих полюсов статора и ротора.

3. Для снижения отклонения фазного тока ВИД от расчетных значений при локальном насыщении полюсов интервал упреждения включения фазы необходимо корректировать в сторону уменьшения, а амплитуду фазного напряжения, наоборот, в сторону увеличения по отношению к из значениям, определяемым по упрощенным соотношениям на основе кусочно-линейной аппроксимации магнитных характеристик.

Список литературы

1. Каган В.Г. Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений. М.: Энергия, 1975. 240 с.
2. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. CRC Press LLC, 2001.
3. Бычков М.Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода : автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., МЭИ, 1999. 38 с.
4. Miller T. J. E., McGilp M. Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design // Proc. Inst. Elect. Eng. B. Nov. 1990. Vol. 137, no. 6. P. 337-347.
5. Красовский А.Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного электропривода // Электричество. 2003. № 3. С. 35-45.
6. Красовский А.Б. Имитационные модели тягового вентильно-индукторного электропривода для решения типовых задач проектирования // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2012. № 12. С. 26-33.

Optimization in the model of the individual cycle of phase switching of gated inductor motor

06, June 2013

DOI: 10.7463/0613.0579054

Krasovskii A.B.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

krasovsky@bmstu.ru

Features of architecture of an individual cycle of switching in a gated inductor motor were considered in this article. Existent control algorithms for the motor obtained on the basis of a simplified piecewise linear representation of its real magnetic characteristics were estimated. Simulation results of a cycle of phase switching of the motor with the use of its experimental nonlinear magnetic characteristics were presented; these results were used to formulate optimum, in terms of force and power indexes, conditions of turning on/off. Character of voltage variation on the drive's phase with standard parameters for maintaining the presence of a current in the zone of overlap of interacting poles was determined.

Publications with keywords: [simulation modeling](#), [switched reluctance motor](#), [cycle of switching of a phase](#), [local saturation](#)

Publications with words: [simulation modeling](#), [switched reluctance motor](#), [cycle of switching of a phase](#), [local saturation](#)

References

1. Kagan V.G. *Elektroprivody s predel'nyy bystrodeystviem dlya sistem vosproizvedeniya dvizheniy* [Electric drives with the utmost speed for playback systems of movements]. Moscow, Energiya. 1975. 240 p.
2. Krishnan R. *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. CRC Press LLC, 2001.
3. Bychkov M.G. *Osnovy teorii, upravlenie i proektirovanie ventil'no-induktornogo elektroprivoda. Avtoreferat dokt. diss.* [Fundamentals of the theory, control and design of switched-reluctance electric drive. Abstract of dr. diss.]. Moscow, MEI, 1999. 38 p.
4. Miller T. J. E., McGilp M. Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design. *Proc. Inst. Elect. Eng. B*, Nov. 1990, vol. 137, no. 6, pp. 337-347.

5. Krasovskiy A.B. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya dlya issledovaniya ventil'no-induktornogo elektroprivoda [The use of simulation to investigate a switched-reluctance electric drive]. *Elektrichestvo*, 2003, no. 3, pp. 35-45.
6. Krasovskiy A.B. Imitatsionnye modeli tyagovogo ventil'no-induktornogo elektroprivoda dlya resheniya tipovykh zadach proektirovaniya [Simulation models of the traction switched-reluctance electric drive for solutions typical design problems]. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 12, pp. 26-33.