



УДК 62-503.5

Б. В. Бруслиновский, А. А. Евтодий
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Снижение шума вентиляльно-индукторного двигателя при широтно-импульсном управлении со случайным изменением параметров

Рассматривается алгоритм широтно-импульсной модуляции (ШИМ) со случайным изменением параметров для уменьшения амплитуд гармонических составляющих спектра напряжения обмотки статора, которое ведет к снижению вибраций и, соответственно, излучаемого акустического шума вентиляльно-индукторным двигателем. Подобная методика используется для снижения уровня акустического шума в асинхронных двигателях. Данный алгоритм ШИМ комбинирует в себе случайное изменение углов включения и выключения фазы двигателя, а также модулирующего сигнала. Для того чтобы подтвердить эффективность предложенного алгоритма, проведен эксперимент посредством компьютерного моделирования.

Вентильно-индукторный двигатель, спектральный состав, широтно-импульсная модуляция, вентиляльно-индукторный привод

Важнейшим с точки зрения энергосбережения преимуществом вентиляльно-индукторного привода (ВИП) является высокое значение коэффициента полезного действия (КПД) двигателя. По сравнению с частотно-регулируемым асинхронным дви-

гателем (АД) вентиляльно-индукторный двигатель (ВИД) имеет более высокий КПД (на 3–5 %) при таких же массогабаритных показателях. Также ВИД обладает высоким быстродействием за счет малой инерционности безобмоточного ротора,

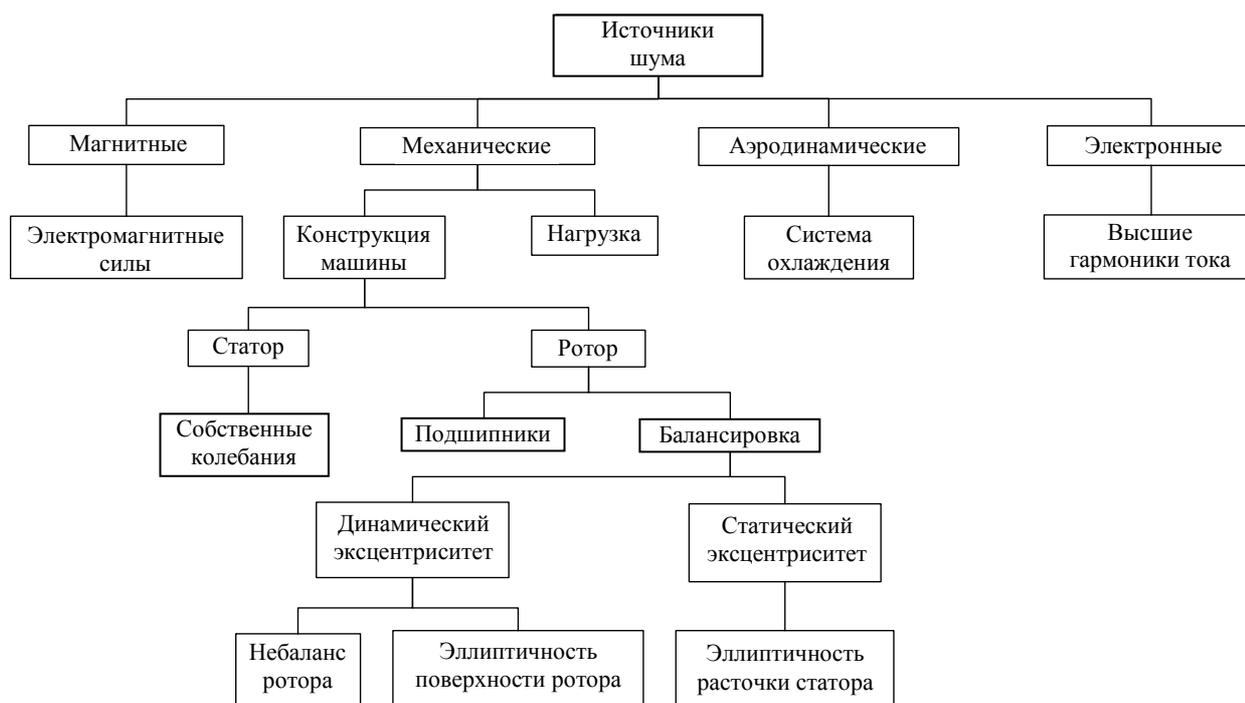


Рис. 1

возможностью плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне. Простота конструкции магнитопровода статора, ротора и катушечных обмоток двигателя обеспечивает повышенную надежность и ремонтпригодность. На роторе ВИД отсутствуют обмотки, в двигателе нет скользящих контактов, фазы независимы друг от друга [2]. При повреждении обмотки ее можно исключить из работы (двигатель остается работоспособен) и завершить работу двигателя в аварийном режиме. Однако ВИД обладает и недостатками: повышенным уровнем излучаемого акустического шума, а также вибраций. Стоит отметить, что недостатки двигателя определяются конкретной конструкцией двигателя, а также алгоритмами управления ВИД. Для снижения шумов и вибраций применяют конструкции, отличающиеся от классической, повышенным количеством фаз, обмоток в фазе и пакетов статора.

Выделяют шумы и вибрации электромагнитного и механического происхождения, а также аэродинамический шум. На рис. 1 представлены источники шума ВИД.

Исследования были направлены на достижение уменьшения амплитуд гармонических составляющих спектра напряжения обмотки статора и, соответственно, вибровозмущающих сил для снижения вибраций ВИД.

Электромагнитные источники шума в ВИД. Магнитная индукция полюса статора в ВИД, проходя через воздушный зазор между полюсами статора и ротора, как и во многих электрических машинах, порождает силы, действующие на статор и ротор двигателя, которые порождают вибрации, что ведет к излучению акустического шума.

Радиальные, тангенциальные и аксиальные силы в ВИД, как и для любой другой электрической машины, могут быть рассчитаны методом конечных элементов с использованием специализированных САПР. На рис. 2 проиллюстрированы параметры, влияющие на вибровозмущающие силы в ВИД. При выводе сил предполагается, что магнитная система линейна и не имеет насыщения.

Предположим, что сталь обладает бесконечной магнитной проницаемостью и имеет нулевое магнитное сопротивление, и только воздушный зазор обеспечивает магнитное сопротивление в цепи. Магнитная индукция воздушного зазора $B_g(\theta, l_g, i)$ между полюсами статора и ротора зависит от угла перекрытия θ , полюсов статора и ротора, ширины воздушного зазора l_g и тока i в обмотке полюса ротора. Магнитная индукция B и МДС F выражаются формулами

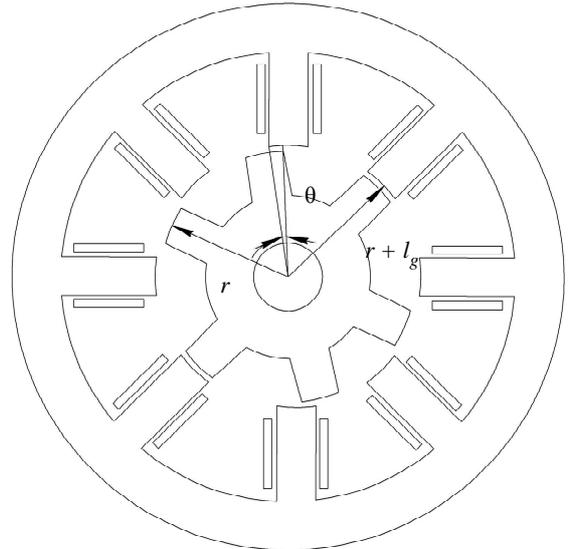


Рис. 2

$$B_g(\theta, l_g, i) = \Phi / Lr\theta = \mu_0 H_g = \mu_0 N_{ph} i / l_g,$$

$$F = N_{ph} i = \frac{l_g}{\mu_0 Lr} \frac{\Phi}{\theta},$$

где r – внешний радиус ротора; L – длина ротора в осевом направлении; N_{ph} – число витков одной обмотки полюса статора; i – ток обмотки фазы; H_g – напряженность магнитного поля; Φ – магнитный поток; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Приращение энергии, поступающей от источника питания в фазу ВИД, за вычетом электрических потерь выражается формулой

$$dW_e = id\lambda = id(N_{ph}\Phi) = N_{ph}id\Phi = \frac{l_g}{\mu_0 Lr} \frac{\Phi}{\theta} d\Phi. \quad (1)$$

Объемная плотность энергии поля в воздушном зазоре представлена выражением

$$w = B_g^2(\theta, l_g, i) / (2\mu_0).$$

Соответственно, энергия однородного магнитного поля в воздушном зазоре выражается формулой

$$W_s = \frac{l_g Lr\theta}{2\mu_0} B_g^2(\theta, l_g, i) = \frac{l_g}{2\mu_0 Lr} \frac{\Phi^2}{\theta}, \quad (2)$$

где $l_g Lr\theta$ – объем воздушного зазора между полюсами статора и ротора.

Длина дуги перекрытия полюсов статора и ротора равна $r\theta$. Уравнение баланса энергий за вычетом электрических потерь выглядит следующим образом:

$$dW_e = dW_s + dW_c, \quad (3)$$

где dW_c – часть энергии магнитного поля, израсходованная на совершение механической работы (ко-энергия); dW_s – часть энергии, полученная от источника питания и израсходованная на приращение магнитного поля (энергия магнитного поля).

Энергия, израсходованная на совершение механической работы, вычисляется вычитанием приращения энергии магнитного поля из энергии, поступающей от источника питания в фазу. Тангенциальная сила $r\theta$, направленная вдоль дуги полюса ротора, является функцией положения ротора θ . Изменение энергии магнитного поля, основываясь на уравнении (2), выражается формулой

$$dW_s = -\frac{l_g}{2\mu_0 Lr} \frac{\Phi^2}{\theta^2} d\theta + \frac{l_g}{\mu_0 Lr} \frac{\Phi}{\theta} d\Phi. \quad (4)$$

Подставляя выражения (1) и (4) в (3), получаем выражение для приращения энергии магнитного поля, израсходованной на совершение механической энергии:

$$dW_c = \frac{l_g}{2\mu_0 Lr} \frac{\Phi^2}{\theta^2} d\theta. \quad (5)$$

Из выражения (5) получаем тангенциальный момент, или более известный как электромагнитный момент:

$$T_e = \frac{dW_c}{d\theta} = \frac{l_g}{2\mu_0 Lr} \frac{\Phi^2}{\theta^2} = \frac{l_g r L}{2\mu_0} B_g^2(\theta, l_g, i).$$

Тангенциальная сила получается из тангенциального момента, деленного на внешний радиус ротора:

$$F_t = T_e / r = l_g L B_g^2(\theta, l_g, i) / (2\mu_0).$$

Радиальная сила получается из приращения энергии магнитного поля при малом изменении ширины воздушного зазора:

$$dW_c = -\frac{1}{2\mu_0 Lr} \frac{\Phi^2}{\theta} dl_g.$$

Радиальная сила выражается формулой

$$F_n = \frac{dW_c}{dl_g} = -\frac{1}{2\mu_0 Lr} \frac{\Phi^2}{\theta} = -\frac{rL\theta}{2\mu_0} B_g^2(\theta, l_g, i).$$

Подобным образом выражаются аксиальные силы, направленные вдоль оси ротора:

$$F_y = \frac{l_g r \theta}{2\mu_0} B_g^2(\theta, l_g, i).$$

Из формул аксиальных и тангенциальных сил видно, что их амплитуда значительно меньше амплитуды радиальных сил. Отношение между радиальной и тангенциальной силами представлено выражением

$$F_n / F_t = -r\theta / l_g.$$

Рассмотрим двигатель конфигурации 8/6 (восемь полюсов статора и шесть полюсов ротора), у которого отношение радиуса ротора к воздушному зазору равно 100, а максимальный угол перекрытия полюсов выражается формулой

$$\theta = 4\pi / P_s P_r,$$

где P_s и P_r – числа полюсов статора и ротора.

Для рассматриваемого двигателя отношение между радиальной и тангенциальной силами составляет 26.19. Отношение сил показывает, что радиальная сила значительно больше тангенциальной, что можно сказать и про другие типы машин. Вибрации, вызываемые радиальными силами, относятся к главным источникам шума [2].

Механические источники шума. К главным механическим источникам шума относится статор. Статор машины имеет собственные частоты колебаний. Когда одна из частот вибровозмущающих сил совпадает с собственной частотой статора, происходит механический резонанс, который сопровождается возрастанием амплитуды деформации статора по данной гармонике, и, следовательно, уровня шума, излучаемого двигателем. Необходимо точно рассчитать собственные частоты двигателя, для того чтобы избежать резонанса. Существует множество методов расчета собственных частот статора. Собственные частоты статора ВИД, как и вибровозмущающие силы, могут быть рассчитаны методом конечных элементов с использованием специализированных САПР или с помощью аналитических выражений.

Исследования показывают, что наиболее важны первые три резонансные частоты. Для снижения уровня шумов и вибраций следует проектировать ВИД таким образом, чтобы резонансные частоты сердечника статора принимали как можно большие значения. При этом резко снижается вероятность того, что первые гармоники вибровозмущающих сил будут иметь частоты, совпадающие с резонансными.

ШИМ со случайным изменением параметров. Рассмотрим систему управления ВИД, структура которой представлена на рис. 3.

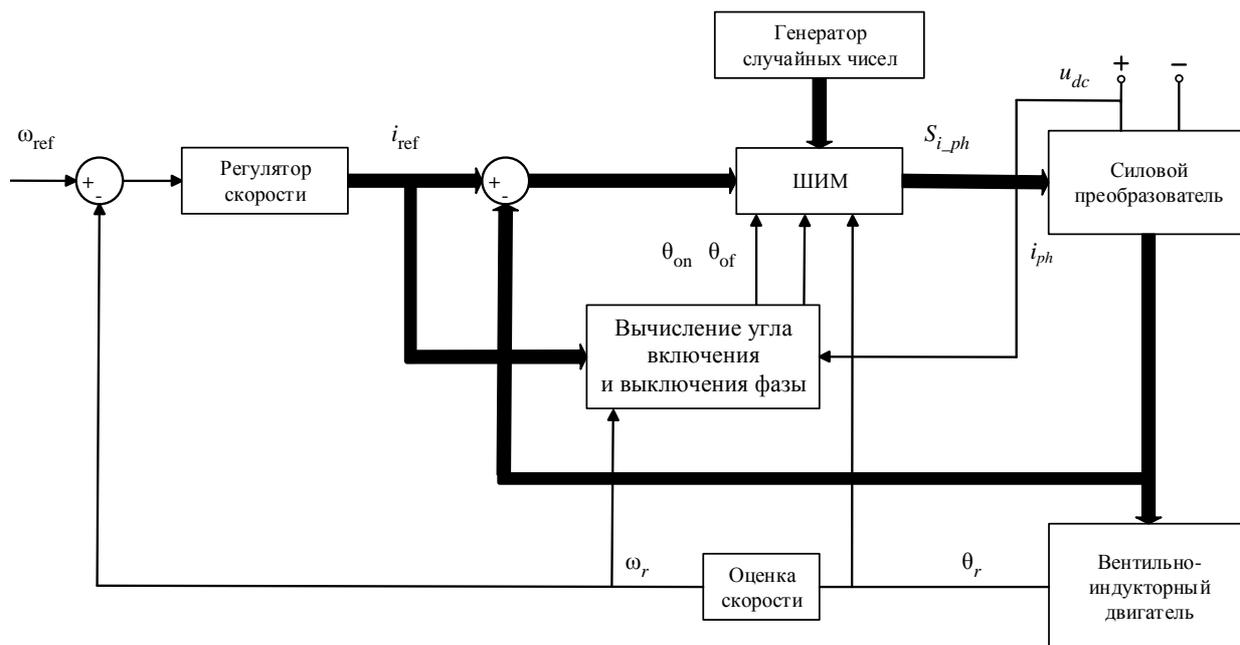


Рис. 3

Система управления ВИД имеет контуры тока и скорости вращения ротора. Задание тока фазы формируется на выходе регулятора скорости. Угол включения фазы ВИД θ_{on} выбирается с учетом угла, необходимого для нарастания тока фазы ВИД θ_{rise} до заданного значения i_{ref} , таким образом, что ток достигает своего заданного значения к тому моменту, когда индуктивность фазы начинает возрастать и начинает создаваться положительный вращающий момент на валу двигателя. Таким образом, повышается коэффициент полезного действия ВИД. Угол, необходимый для нарастания тока, выражается следующей формулой:

$$\theta_{rise} = \frac{L_u i_{ref} \omega_r}{u_{dc}}, \quad (6)$$

где L_u – индуктивность фазы в рассогласованном положении полюсов ротора и статора; ω_r – скорость вращения ротора; u_{dc} – напряжение звена постоянного тока.

Блок ШИМ реализуется с помощью компаратора, на один вход которого подается опорный пилообразный периодический сигнал, а на другой – модулирующий сигнал (ошибка регулирования по току). Модулирующий сигнал изменяется на случайную величину, значение которой в данном случае лежит в диапазоне от -10 до 10 . На выходе компаратора образуются периодические прямоугольные импульсы с переменной

шириной, скважность которых изменяется в зависимости от модулирующего сигнала, а частота равна частоте пилообразного сигнала и постоянна. Значение модулирующего сигнала обнуляется вне интервала коммутации фазы, т. е. при угле рассогласования полюсов статора и ротора θ , меньшем, чем угол включения θ_{on} , и большем, чем угол выключения θ_{of} фазы из работы.

Одним из вариантов реализации блока ШИМ является реализация, в которой опорный сигнал имеет постоянную частоту, угол включения θ_{on} фазы двигателя определяется по формуле (6), угол выключения θ_{of} фазы двигателя имеет постоянное значение. В данном алгоритме может использоваться режим «мягких» переключений, когда к фазе прикладывается либо положительное, либо нулевое напряжение. Также может использоваться режим «жестких» переключений, когда к фазе прикладывается либо положительное, либо отрицательное напряжение. В данном случае рассматривается режим «мягких» переключений с прикладыванием отрицательного напряжения после достижения ротором двигателя угла отключения θ_{of} фазы двигателя. На рис. 4, а представлена индуктивность фазы, а на рис. 4, б – напряжение, прикладываемое к фазе двигателя при использовании данного алгоритма ШИМ. Углы θ_{01} и θ_{02} обозначают углы, при которых

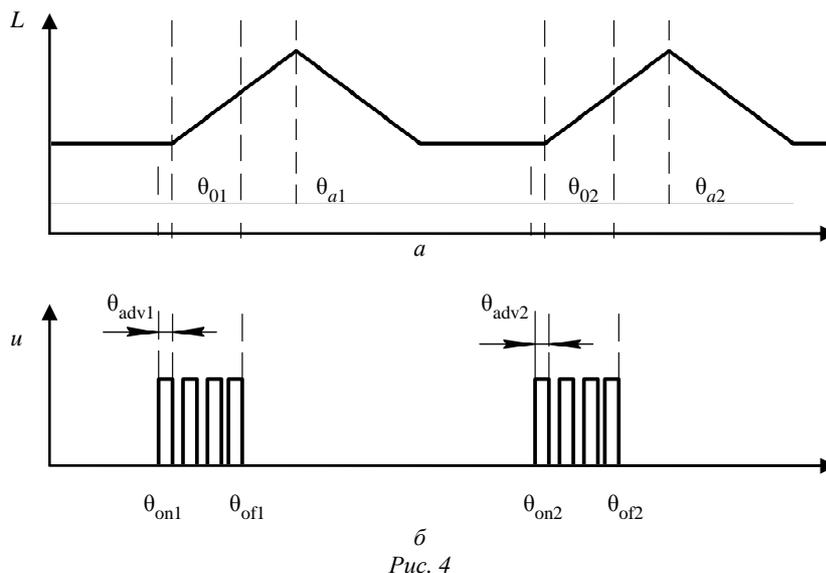


Рис. 4

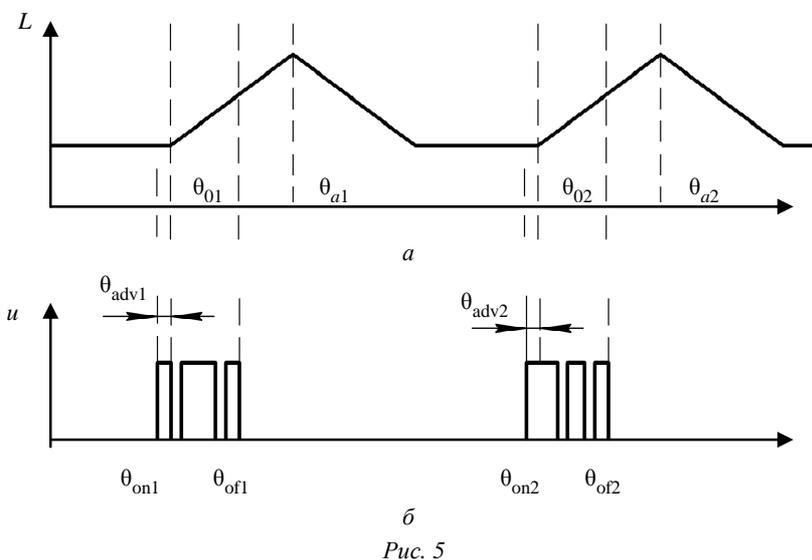


Рис. 5

полюс ротора начинает перекрывать полюс статора для фаз *A* и *B* соответственно; θ_{a1} и θ_{a2} – углы, при которых полюсы ротора и статора находятся в согласованном положении для фаз *A* и *B* соответственно (полюс ротора полностью перекрывает полюс статора); θ_{adv1} и θ_{adv2} – углы опережения для фаз *A* и *B* соответственно; θ_{on1} и θ_{on2} – углы включения для фазы *A* и *B* соответственно; θ_{of1} и θ_{of2} – углы выключения для фаз *A* и *B* соответственно.

Случайному изменению в рассматриваемом алгоритме могут подвергаться частота опорного сигнала, модулирующий сигнал, углы включения θ_{on} и выключения θ_{of} фазы двигателя. Переменные параметры изменяются в заданном диа-

пазоне. Модификации алгоритма формирования ШИМ, в которых случайному изменению подвергается частота опорного сигнала, в данной статье не рассматриваются. Предлагается использовать модификацию алгоритма формирования ШИМ, в которой случайному изменению подвергаются модулирующий сигнал и углы включения θ_{on} и выключения θ_{of} фазы двигателя. Случайное изменение сразу нескольких параметров в алгоритме формирования ШИМ позволяет избежать резонансных частот конструкции двигателя и снизить уровень излучаемого акустического шума ВИД.

Одна из модификаций алгоритма ШИМ, представлена на рис. 5. В данной модификации случайному изменению подвергается модулирующий сигнал.

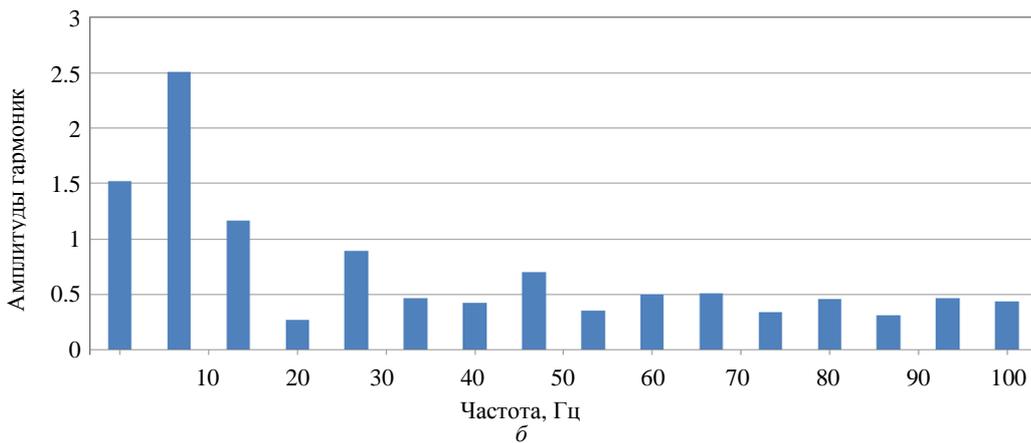
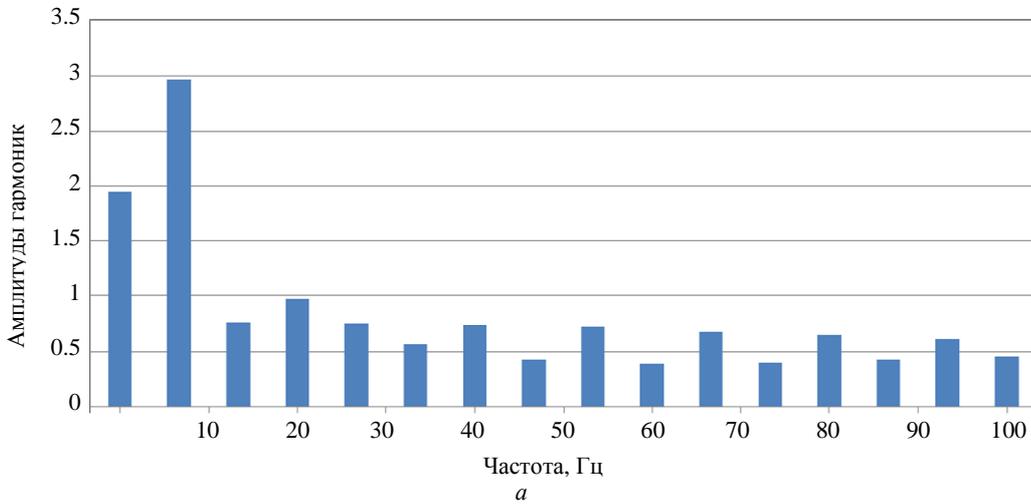
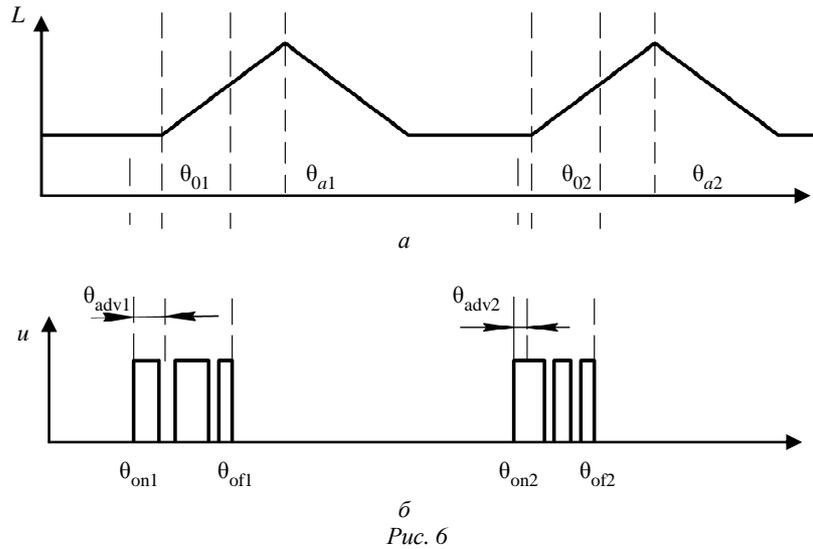


Рис. 7

Предлагается использовать алгоритм, который комбинирует ШИМ с переменным значением модулирующего сигнала и переменными углами включения θ_{on} и выключения θ_{of} фазы двигателя. Угол включения θ_{on} варьируется от $\theta_0 - \Delta\theta_r$

до $\theta_0 + \Delta\theta_r$, в то время как интервал коммутации $\Delta\theta_i \{i = 1, 2, 3, 4\}$ сохраняется постоянным. $\Delta\theta_r$ – значение на которое изменяются углы включения θ_{on} и выключения θ_{of} фазы двигателя. В данном

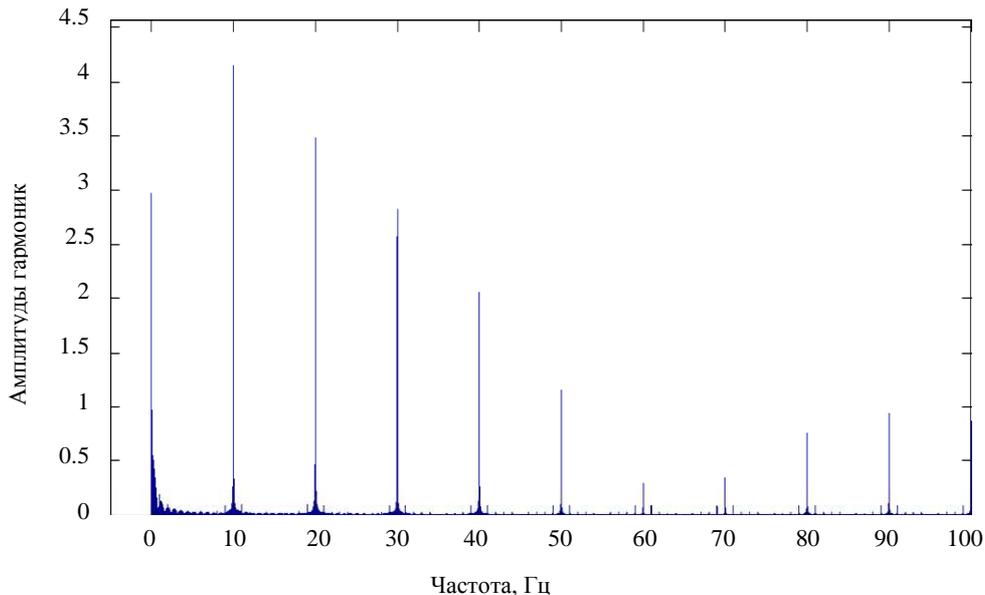


Рис. 8

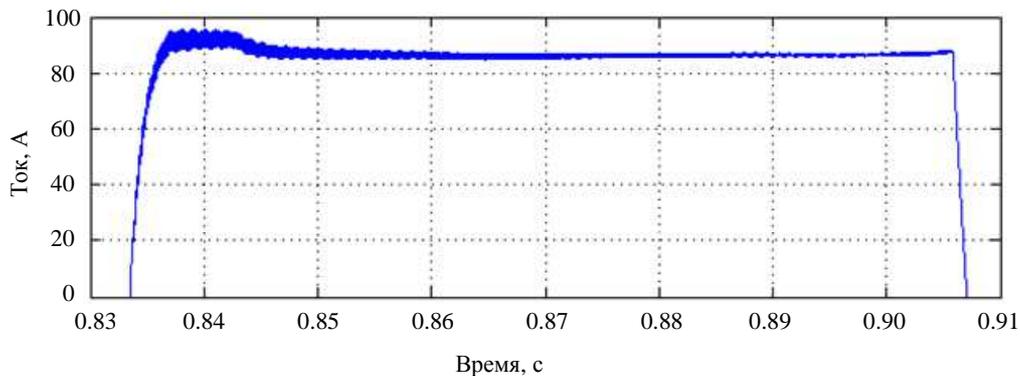


Рис. 9

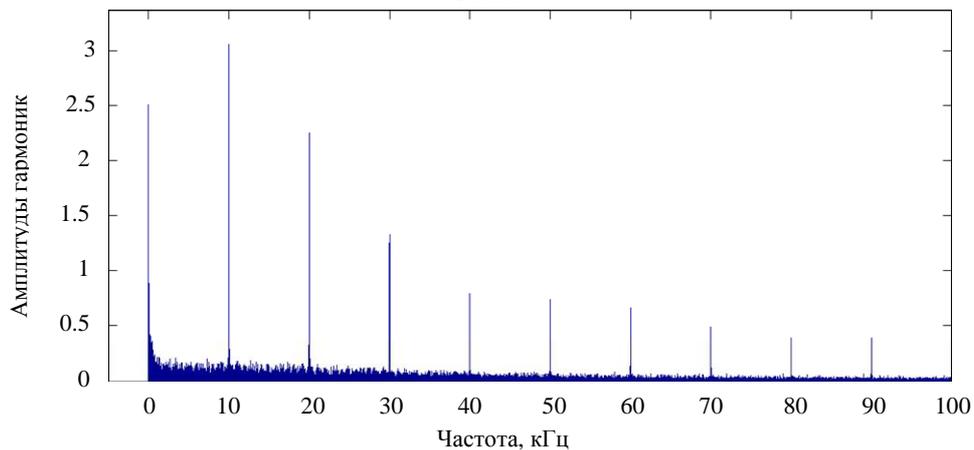


Рис. 10

случае $\Delta\theta_r$ изменяется от 0 до 2° . Данный алгоритм проиллюстрирован на рис. 6.

Индуктивность и напряжение фазы для модификации алгоритма формирования ШИМ с переменным значением модулирующего сигнала и переменным углом включения $\theta_{он}$ и выключения $\theta_{оф}$ фазы.

Результаты моделирования. Моделирование математической модели электропривода проводилось в среде MATLAB. Мощность ВИД, входящего в состав модели электропривода, составляет 100 кВт, а его номинальная скорость 320 об/мин. Частота ШИМ составляет 10 кГц. Как показывают результаты моделирования (рис. 7, а – для ал-

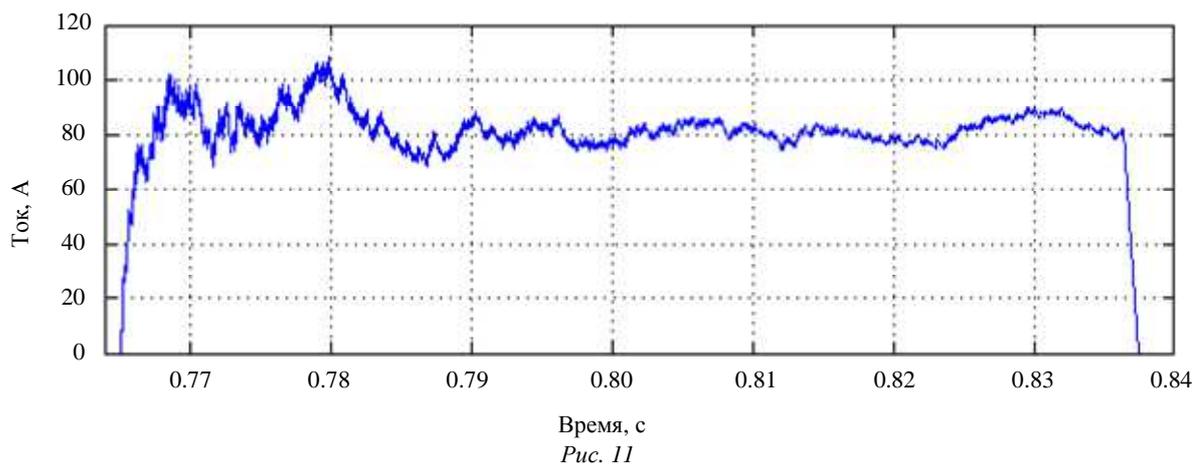


Рис. 11

горитма формирования ШИМ с постоянными параметрами и δ – для модификации алгоритма ШИМ с переменным значением модулирующего сигнала и переменными значениями углов θ_{on} , θ_{of}), в данном случае гармонический состав напряжения, прикладываемого к фазе двигателя, изменился. Амплитуда нечетных (1, 3, 5) гармоник уменьшилась, в то время как амплитуда четных (2, 4) гармоник увеличилась. Данная тенденция наблюдается только до пятой гармоники включительно. После пятой гармоники амплитуда как четных, так и нечетных гармоник может как увеличиваться, так и уменьшаться, что говорит о неоднозначности эффективности применения этого метода для снижения уровня акустического шума.

Численное сравнение результатов моделирования представлено в таблице.

Номер гармоники	Амплитуда гармоники	
	ШИМ с постоянными параметрами	ШИМ с переменными параметрами
0	1.95	1.52
1	2.97	2.51
2	0.77	1.17
3	0.97	0.27
4	0.76	0.89
5	0.57	0.47
6	0.74	0.42
7	0.43	0.7
8	0.72	0.35
9	0.39	0.5
10	0.68	0.51
11	0.4	0.34
12	0.65	0.46
13	0.43	0.31
14	0.61	0.47
15	0.45	0.44

Гармонический состав напряжения, прикладываемого к фазе двигателя в диапазоне частот от 0 до 100 кГц, и форма тока фазы для алгоритма формирования ШИМ с постоянными параметрами представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

Гармонический состав напряжения, прикладываемого к фазе двигателя в диапазоне частот от 0 до 100 кГц, и форма тока фазы для алгоритма формирования ШИМ с переменными параметрами представлены на рис. 10 и 11 соответственно.

Спектральный состав напряжения и вибро-возмущающих сил в результате применения алгоритма ШИМ со случайным изменением параметров становится более похожим на спектральный состав белого шума по сравнению со спектральным составом при использовании алгоритма с постоянными параметрами.

Результаты моделирования показывают, что несмотря на неоднозначность снижения амплитуд низших гармоник наблюдается снижение амплитуд высших гармоник на частотах, кратных частоте модуляции напряжения (10 кГц), т. е. применение данного алгоритма позволяет снизить вибрации на частоте, равной частоте ШИМ.

Для снижения уровня излучаемого акустического шума в ВИД возможно применение алгоритмов со случайным изменением параметров. Благодаря применению алгоритмов ШИМ со случайным изменением параметров достигается уменьшение амплитуд гармонических составляющих спектра напряжения обмотки статора и, соответственно, вибровозмущающих сил. При этом расширяется спектральный состав напряжения и вибровозмущающих сил.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В. А., Кузьмичев В. А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 93 с.
2. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. New York: CRC Press LLC, 2001. 432 p.
3. Miller T. J. E. Switched Reluctance Motors and Their Control. New York: Oxford, 1993.
4. Гуляев И. В., Тутаев Г. М. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. 200 с.
5. Reduction of audible switching noise in induction motor drives using random position PWM / Y. G. Jung, S. H. Na, Y. C. Lim, S. H. Yang // IEE Proc. Electr. Power Appl., May 2002. Vol. 2. P. 195–202.
6. Blaabjerg F., Pedersen J. K. Digital implemented random modulation strategies for AC and switched reluctance drives // IEEE IECON Conf. 1993. Vol. 2. P. 676–682.

B. V. Bruslinovskiy, A. A. Evtodiy
Krylov State Research Center

ACOUSTIC NOISE REDUCTION IN THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR USING THE PULSE-WIDTH MODULATION WITH THE RANDOM SWITCHING STRATEGY

Considers algorithm of pulse-width modulation PWM with a random switching strategy to reduce the harmonics spectra of the phase voltage, to reduce the vibration and acoustic noise for switched reluctance motor (SRM). Similar technique is useful for induction motors to reduce acoustic noise. The proposed method combines random turn-on, turn-off angle technique and random pulse-width modulation technique. In order to confirm the effectiveness of the algorithm an experiment (computer simulation) was conducted.

Switched reluctance motor, spectral composition, pulse-width modulation, switched reluctance drive
