

УДК 621.313

UDC 621.313

**ПРИМЕНЕНИЕ АСИНХРОННОГО  
ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПИТАНИЯ  
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**APPLICATION OF ASYNCHRONOUS  
GENERATOR FOR INDUCTION MOTOR'S  
FEEDING**

Богдан Александр Владимирович  
д.т.н., профессор

Bogdan Alexander Vladimirovich  
Dr.Sci.Tech., professor

Ильченко Яков Андреевич  
к.т.н.

Ichenko Yakov Andreevich  
Cand.Tech.Sci.

Соболь Александр Николаевич  
к.т.н.

Sobol Alexander Nikolaevich  
Cand.Tech.Sci.

Ерохов Максим Вячеславович  
аспирант  
*Кубанский государственный аграрный  
университет, Краснодар, Россия*

Erokhov Maksim Vyacheslavovich  
postgraduate student  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В статье приводится математическая модель, описывающая электромеханические процессы при самовозбуждении и подключении индуктивной нагрузки. Описание построено на основании уравнений равновесия напряжения в электрических контурах генератора, уравнениях токов и уравнении движения ротора

In the article, the following items are represented: mathematical formulation of system including: asynchronous generator with cage rotor, condenser's for excitation, induction load. Electromagnetic and electromechanical processes of induction motor's connecting and feeding are described. Equations of voltage stability, equations of current, equations of rotor are used for describing of electricity circuits of generator

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР,  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Keywords: ASYNCHRONOUS GENERATOR,  
MATHEMATICAL MODEL

В сельскохозяйственном производстве все более широкое применение находят мобильные автономные электроустановки с бензогенераторами в качестве источников питания электроприемников.

По типу используемых генераторов установки можно классифицировать на автономные установки с асинхронными генераторами и установки с синхронными генераторами. Асинхронные генераторы имеют ряд преимуществ по сравнению с синхронными, в прикладном аспекте использования их для питания потребителей малых фермерских хозяйств, таких как малые массогабаритные показатели, простота и надежность конструкции. Для работы такого генератора необходим внешний источник реактивной энергии, что можно отнести к недостаткам.

Исследованию асинхронных генераторов посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых. В данных работах рассматриваются различные режимы работы генератора и различные подходы к объяснению причин возникновения электромагнитных колебаний, но наибольшее внимание в работах по исследованию асинхронных генераторов уделяется в первую очередь явлению самовозбуждения.

При расчетах и исследованиях электрических машин и устройств определяются их характеристики – зависимости напряжений на зажимах обмоток, токов в них, потребляемой мощности, момента на валу. Кроме того, при расчетах неустановившихся режимов определяется изменение токов и напряжений, моментов вращения и электромагнитных сил в зависимости от времени, начального и конечного режимов. Характер электромагнитных процессов, происходящих в электрической машине, зависит от временных изменений (напряжений, потокосцеплений, токов, индукции в воздушном зазоре и т.д.), а также от изменений пространственных (взаимное перемещение обмоток, вращение ротора) [1].

К основным способам изучения машины можно отнести физическое и математическое моделирование. Возможности физического моделирования ограничены вследствие значительных физических и финансовых затрат и используются в специфических целях. Математические методы моделирования работы машины дают более широкие возможности исследования электромагнитных и электромеханических процессов, а также аномальных режимов работы по сравнению с экспериментальными.

При работе асинхронного генератора на индуктивную нагрузку, для исключения риска развозбуждения генератора, реактивная мощность конденсаторов должна быть достаточной для компенсации реактивной мощности подключаемой нагрузки. Авторами, для изучения процесса

подключения индуктивной нагрузки, разработана математическая модель, описывающая электромеханические процессы при самовозбуждении и подключении индуктивной нагрузки, включающая систему уравнений привода, асинхронного генератора, уравнения внешней цепи для конденсаторов и нагрузки.

Так как рассматриваемая система состоит из нескольких объектов, то рассмотрим модели этих объектов в отдельности. За основу приняты математические описания, приведенные в [2, 3, 4]. При построении системы дифференциальных уравнений электрических машин, входящих в привод, принимаются допущения: электрическая машина симметрична и ненасыщена; воздушный зазор равномерный; отсутствуют потери в стали; высшие гармоники пренебрежимо малы; поле в воздушном зазоре плоскопараллельное и распределено синусоидально.

Для численного расчета получаемых систем дифференциальных уравнений используется метод Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным или переменным шагом, реализованный в виде стандартных функций математического пакета MathCAD.

В качестве приводного двигателя принят двигатель постоянного тока мощностью 10,5 кВт. Дифференциальные уравнения, которыми описываются электромагнитный и электромеханические процессы ДПТ с независимым возбуждением имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{di_e}{dt} = \frac{u_e}{L_e} - \frac{r_e}{L_e} i_e, \\ \frac{di_y}{dt} = \frac{u_y}{L_y} - \frac{r_y}{L_y} i_y - \frac{k_e \Phi \omega_{dpt}}{L_y}, \\ \frac{d\omega_{dpt}}{dt} = \frac{k_M \Phi i_y}{J_{dpt}} - \frac{M_{ep.d}}{J_{dpt}}. \end{cases} \quad (1)$$

В уравнениях (1) индексом «в» отмечены переменные и параметры, относящиеся к обмотке возбуждения, индексом «я» – переменные и параметры, относящиеся к обмотке якоря.

В системе (1)  $u_{я}$ ,  $u_{в}$  – напряжения питания,  $\Phi_{в}$  – магнитный поток возбуждения,  $i_{я}$  – ток якоря,  $i_{в}$  – ток обмотки возбуждения,  $\omega_{dpt}$  – угловая скорость якоря,  $M_{вр,д}$  – момент приводного двигателя,  $J_{dpt}$  – момент инерции.

Принимая линейную зависимость  $\Phi_{в}$  от тока возбуждения  $i_{в}$   $\Phi_{я} = k_{\phi} i_{в}$  получим систему дифференциальных уравнений, включающую три неизвестных:  $i_{я}$  – ток якоря,  $i_{в}$  – ток возбуждения,  $\omega_{dpt}$  – угловая скорость якоря:

$$\begin{cases} \frac{di_{в}}{dt} = \frac{u_{в}}{L_{в}} - \frac{r_{в}}{L_{в}} i_{в}, \\ \frac{di_{я}}{dt} = \frac{u_{я}}{L_{я}} - \frac{r_{я}}{L_{я}} i_{я} - \frac{k_e k_{\phi} i_{в} \omega_{dpt}}{L_{я}}, \\ \frac{d\omega_{dpt}}{dt} = \frac{k_M k_{\phi} i_{в} i_{я}}{J_{dpt}} - \frac{M_{вр,д}}{J_{dpt}}. \end{cases} \quad (2)$$

Произведение коэффициентов  $k_M k_{\phi}$  определяется из выражения для номинального момента:

$$k_M k_{\phi} = \frac{P_{ном}}{\omega_{дтр.ном} I_{ном.в} I_{ном.я}}. \quad (3)$$

Произведение коэффициентов  $k_e k_{\phi}$  определяется из выражения для ЭДС реакции якоря:

$$k_e k_{\phi} = \frac{U_{ном.я} - r_{я} I_{ном.я}}{\omega_{дтр.ном} I_{ном.в}}. \quad (4)$$

Подробная теория и методика моделирования асинхронного электродвигателя изложена в [2, 3, 4]. Для исследования, проводимого в диссертации, не подходит методика, изложенная в [2], которая основана на использовании относительных единиц. Она полезна, когда моделируется

одна электрическая машина. При моделировании группы машин разной мощности и структуры лучше переходить к именованным единицам.

В качестве индуктивной нагрузки использован асинхронный двигатель мощностью 250 Вт, с параметрами:  $P_{ном} = 0,25$  кВт,  $\eta = 68\%$ ,  $\cos \varphi = 0,65$ ,  $U_{ном} = 380$  В,  $n_{ном} = 1380$  об/мин,  $f = 50$  Гц,  $p_d = 2$ ,  $M_{max}/M_{ном} = 2,0$ ,  $K_n = I_{пуск}/I_{ном} = 6$ ,  $J_d = 0,00124$  кг·м<sup>2</sup>. Дифференциальные уравнения АД (сопротивление статора  $r_{ds}$ , индуктивность рассеяния обмотки статора  $L_{ds}$ , ток статора  $i_{ds}$ ), включающие выражения для тока и напряжения статора  $i_s$  и  $u_s$ , потокосцепления статора и ротора ( $\psi_{ds}$  и  $\psi_{dr}$ ), движения (угловая скорость ротора  $\omega_d$ ), момент приводного двигателя  $M_{сп.д}$ , и момент инерции  $J_d$ , состоящий из суммы моментов инерции ротора электродвигателя и момента инерции подключенного к валу механизма, а также время  $t$  в неподвижной комплексной системе координат  $(\alpha, \beta)$  имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{ds\alpha}}{dt} = \frac{u_{ds\alpha}}{L_{ds}} - \frac{r_{ds}i_{ds\alpha}}{L_{ds}} + \frac{k_{dr}}{L_{ds}T_{dr}}\Psi_{dr\alpha} + \frac{k_{dr}}{L_{ds}}p_d\omega_d\Psi_{dr\beta}, \\ \frac{di_{ds\beta}}{dt} = \frac{u_{ds\beta}}{L_{ds}} - \frac{r_{ds}i_{ds\beta}}{L_{ds}} + \frac{k_{dr}}{L_{ds}T_{dr}}\Psi_{dr\beta} - \frac{k_{dr}}{L_{ds}}p_d\omega_d\Psi_{dr\alpha}, \\ \frac{d\Psi_{dr\alpha}}{dt} = k_{dr}r_{dr}i_{ds\alpha} - \frac{1}{T_{dr}}\Psi_{dr\alpha} - p_d\omega_d\Psi_{dr\beta}, \\ \frac{d\Psi_{dr\beta}}{dt} = k_{dr}r_{dr}i_{ds\beta} - \frac{1}{T_{dr}}\Psi_{dr\beta} + p_d\omega_d\Psi_{dr\alpha}, \\ \frac{d\omega_d}{dt} = \frac{k_{dr}}{J_d}(\Psi_{dr\alpha}i_{ds\beta} - \Psi_{dr\beta}i_{ds\alpha}) - \frac{M_{сп.д}}{J_d}. \end{array} \right. \quad (5)$$

В уравнениях (5) индексом « $\alpha$ » отмечены переменные и параметры, относящиеся к оси  $\alpha$ , индексом « $\beta$ » – переменные и параметры, относящиеся к оси  $\beta$ .

При моделировании использован асинхронный электродвигатель мощностью 4 кВт с паспортными данными по [5]:  $P_{ном} = 4$  кВт,  $\eta = 84\%$ ,  $\cos \varphi = 0,84$ ,  $U_{ном} = 380$  В,  $n_{ном} = 1430$  об/мин,  $f = 50$  Гц,  $p_d = 2$   $M_{max}/M_{ном} =$

2,2,  $K_n = I_{н\text{уск}}/I_{н\text{ом}} = 6$ ,  $J_d = 0,0113 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Дифференциальные уравнения асинхронного генератора с емкостным самовозбуждением, выполненного на базе трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (соединение фаз машины и нагрузки – звезда, конденсаторов – треугольник) с учетом внешней емкости  $C$  и предварительно подключенной нагрузки (сопротивление  $r_n$ , ток  $i_n$ ), включающие уравнения тока и напряжения статора  $i_s$  и  $u_s$ , потокосцепления статора и ротора ( $\psi_s$  и  $\psi_r$ ), движения (угловая скорость ротора  $\omega$ ) момент приводного двигателя  $M_{вр.пр}$ , момент инерции  $J_{AG}$ , а также время  $t$  в неподвижной комплексной системе координат  $(\alpha, \beta)$  приведены в системе 6.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_s}{dt} = \frac{u_s}{L_s} - \frac{r_s}{L_s} i_s, \\ \frac{di_r}{dt} = \frac{u_r}{L_r} - \frac{(r_r + R_{сему})}{L_r} i_r - \frac{k_e k_\phi i_s \omega_{dpt}}{L_r}, \\ \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{u_{s\alpha}}{L_s} - \frac{r_s i_{s\alpha}}{L_s} + \frac{k_r}{L_s T_r} \Psi_{r\alpha} + \frac{k_r}{L_s} p \omega \Psi_{r\beta}, \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{u_{s\beta}}{L_s} - \frac{r_s i_{s\beta}}{L_s} + \frac{k_r}{L_s T_r} \Psi_{r\beta} - \frac{k_r}{L_s} p \omega \Psi_{r\alpha}, \\ \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = k_r r_r i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \Psi_{r\alpha} - p \omega \Psi_{r\beta}, \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = k_r r_r i_{s\beta} - \frac{1}{T_r} \Psi_{r\beta} + p \omega \Psi_{r\alpha}, \\ \frac{du_{s\alpha}}{dt} = \frac{i_{c\alpha} - r_n i_{s\alpha}}{C}, \\ \frac{du_{s\beta}}{dt} = \frac{i_{c\beta} - r_n i_{s\beta}}{C}, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{k_r}{J_{AG} + J_{dpt}} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - \frac{k_M k_\phi i_s i_r}{J_{AG} + J_{dpt}}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Параметры, входящие в (6), определяются расчетом с использованием паспортных данных асинхронного электродвигателя.

Анализируемый комплекс состоит из генератора, выполненного на основе асинхронного двигателя мощностью 4 кВт с приводом от двигателя постоянного тока мощностью 10,5 кВт с независимым возбуждением (рисунок 1). После пуска и самовозбуждения генератора с предварительно подключенной активной нагрузкой, к нему подключается асинхронный двигатель мощностью 0,25 кВт. Разработанная математическая модель позволяет проводить анализ динамики пусковых режимов, определять соотношения мощностей асинхронного генератора и подключаемой двигательной нагрузки.

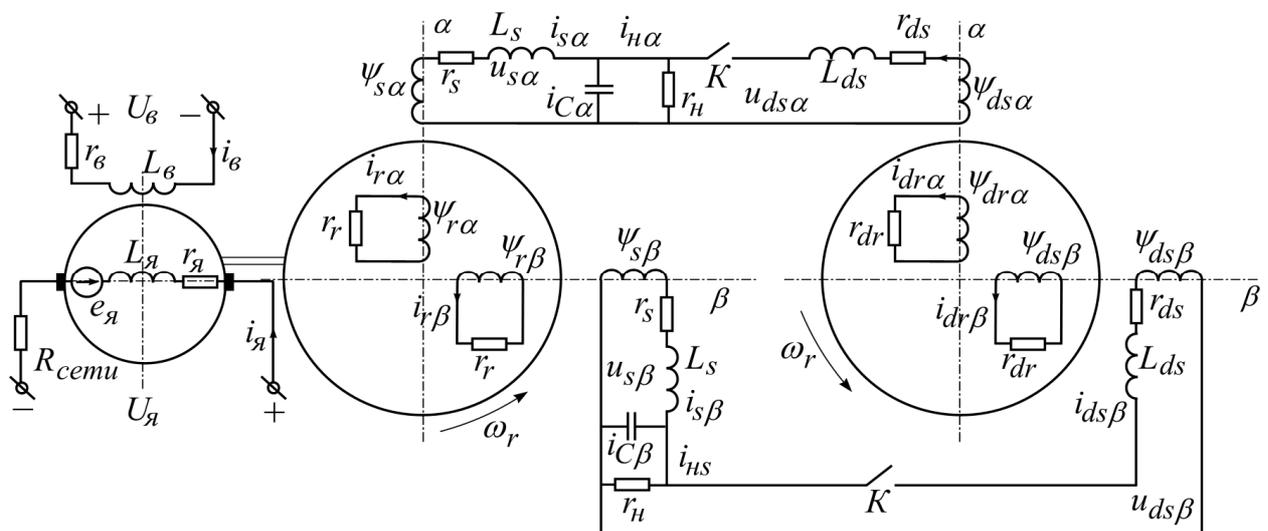


Рисунок 1 – Расчетная пространственная модель комплекса из асинхронного генератора, привода и подключаемого асинхронного двигателя.

Система уравнений привода, включающую уравнения статора, ротора, уравнение движения и уравнения внешней цепи для конденсаторов и нагрузки в неподвижной комплексной системе координат  $(\alpha, \beta)$ , до момента подключения двигательной нагрузки, записывается в виде системы (7).

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{di_{\epsilon}}{dt} &= \frac{u_{\epsilon}}{L_{\epsilon}} - \frac{r_{\epsilon}}{L_{\epsilon}} i_{\epsilon}, \\
 \frac{di_{\text{я}}}{dt} &= \frac{u_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} - \frac{(r_{\text{я}} + R_{\text{сему}})}{L_{\text{я}}} i_{\text{я}} - \frac{k_e k_{\phi} i_{\epsilon} \omega_{\text{dpt}}}{L_{\text{я}}}, \\
 \frac{di_{s\alpha}}{dt} &= \frac{u_{s\alpha}}{L_s} - \frac{r_s i_{s\alpha}}{L_s} + \frac{k_r}{L_s T_r} \Psi_{r\alpha} + \frac{k_r}{L_s} p \omega \Psi_{r\beta}, \\
 \frac{di_{s\beta}}{dt} &= \frac{u_{s\beta}}{L_s} - \frac{r_s i_{s\beta}}{L_s} + \frac{k_r}{L_s T_r} \Psi_{r\beta} - \frac{k_r}{L_s} p \omega \Psi_{r\alpha}, \\
 \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} &= k_r r_r i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \Psi_{r\alpha} - p \omega \Psi_{r\beta}, \\
 \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} &= k_r r_r i_{s\beta} - \frac{1}{T_r} \Psi_{r\beta} + p \omega \Psi_{r\alpha}, \\
 \frac{du_{s\alpha}}{dt} &= \frac{i_{c\alpha} - r_{\text{н}} i_{s\alpha}}{C}, \\
 \frac{du_{s\beta}}{dt} &= \frac{i_{c\beta} - r_{\text{н}} i_{s\beta}}{C}, \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{k_r}{J_{\text{AG}} + J_{\text{dpt}}} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - \frac{k_M k_{\phi} i_{\epsilon} i_{\text{я}}}{J_{\text{AG}} + J_{\text{dpt}}}, \\
 \frac{di_{ds\alpha}}{dt} &= \frac{u_{ds\alpha}}{L_{ds}} - \frac{r_{ds} i_{ds\alpha}}{L_{ds}} + \frac{k_{dr}}{L_{ds} T_{dr}} \Psi_{dr\alpha} + \frac{k_{dr}}{L_{ds}} p_d \omega_d \Psi_{dr\beta}, \\
 \frac{di_{ds\beta}}{dt} &= \frac{u_{ds\beta}}{L_{ds}} - \frac{r_{ds} i_{ds\beta}}{L_{ds}} + \frac{k_{dr}}{L_{ds} T_{dr}} \Psi_{dr\beta} - \frac{k_{dr}}{L_{ds}} p_d \omega_d \Psi_{dr\alpha}, \\
 \frac{d\Psi_{dr\alpha}}{dt} &= k_{dr} r_{dr} i_{ds\alpha} - \frac{1}{T_{dr}} \Psi_{dr\alpha} - p_d \omega_d \Psi_{dr\beta}, \\
 \frac{d\Psi_{dr\beta}}{dt} &= k_{dr} r_{dr} i_{ds\beta} - \frac{1}{T_{dr}} \Psi_{dr\beta} + p_d \omega_d \Psi_{dr\alpha}, \\
 \frac{d\omega_d}{dt} &= \frac{k_{dr}}{J_d} (\Psi_{dr\alpha} i_{ds\beta} - \Psi_{dr\beta} i_{ds\alpha}) - \frac{M_{\text{ep.}\dot{d}}}{J_d}.
 \end{aligned} \right. \tag{7}$$

Задачей моделирования является изучение динамики процессов, происходящих при подключении асинхронного электродвигателя к предварительно возбужденному автономному асинхронному генератору с емкостным самовозбуждением.

На рисунке 2 приведен пример расчетных осциллограмм, показывающих динамику процессов, происходящих при подключении двигательной нагрузки к генератору. Из осциллограмм видно, что при  $t = 3\text{с}$  после включения генератора он находится в возбужденном состоянии. При подключении индуктивной нагрузки ток в фазе генератора резко увеличивается (на 2-3 периода), а затем падает и постепенно растет до установившегося. Установившийся ток фазы генератора больше, чем до подключения индуктивной нагрузки.

В момент включения уменьшается и угловая скорость генератора. У двигателя первый толчок тока на уровне пускового, затем возникает процесс сначала уменьшения его тока, а в дальнейшем нарастания до установившегося.

Таким образом, полученная система дифференциальных уравнений в форме Коши, позволяет в пакете MathCAD проводить расчеты динамических процессов, возникающих при подключении двигательной нагрузки к асинхронному генератору с емкостным самовозбуждением и позволяет определить соотношение мощности асинхронного генератора и подключаемой нагрузки.

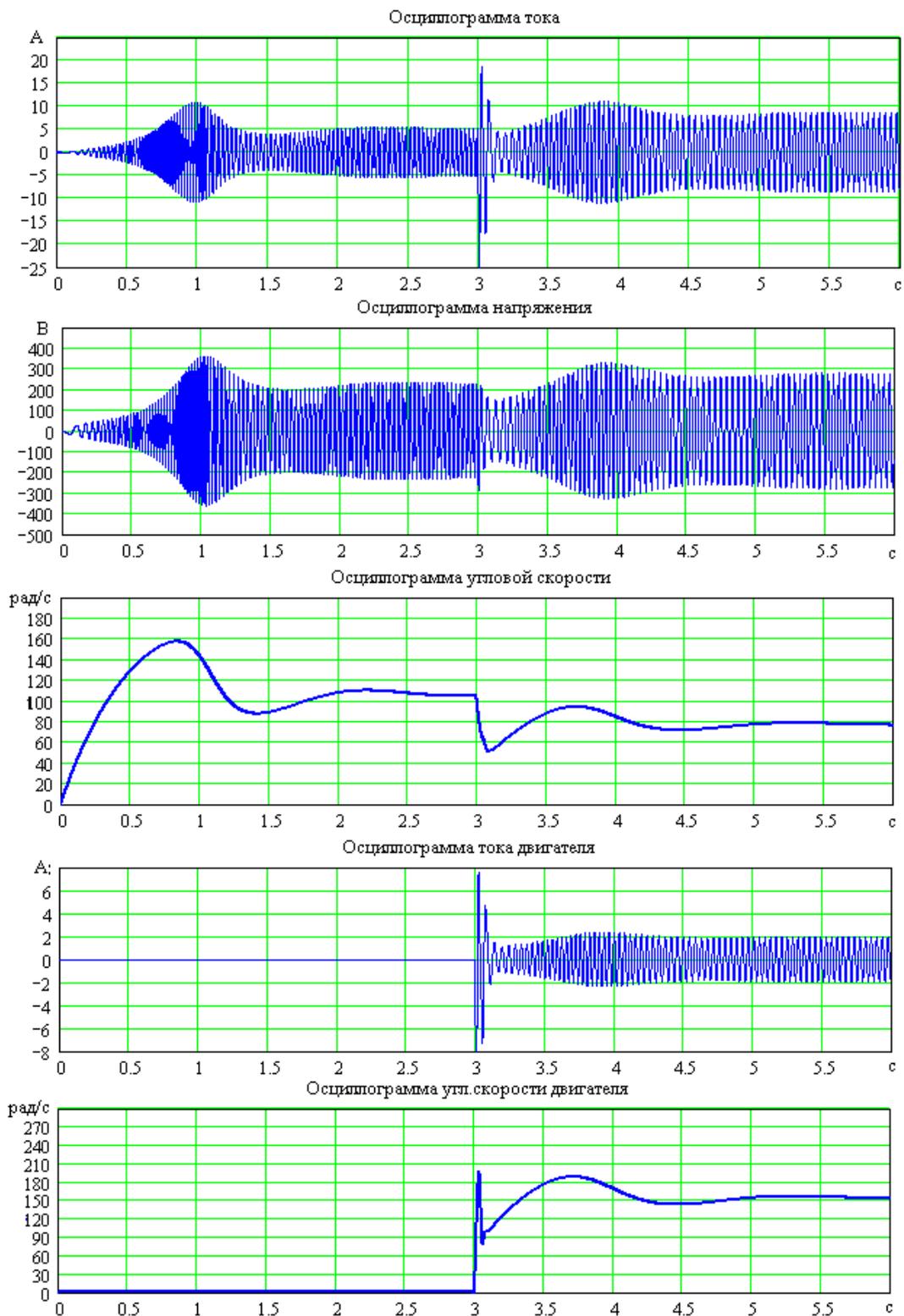


Рисунок 2 – Расчетные осциллограммы процесса подключения к асинхронному генератору двигателя мощностью 250 Вт

### Литература

1. Кицис С.А. Асинхронные самовозбуждающиеся генераторы.-М.: Энергоатомиздат, 2003. - 328 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие.- СПб.: КОРОНА принт, 2001. - 320 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. - М.: Высш. шк., 2001.-327 с.
4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов по спец. «Электрические машины».- М.: Высш.шк., 1987. - 248 с.
5. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: Учеб.пособие для вузов. - 2-е изд., доп. - М.: Высш.шк., 2000. - 255 с., ил.
6. Стрижков И. Г. Математическое описание асинхронного генератора с разветвленной статорной обмоткой / В. Н. Ванурин, И. Г. Стрижков, Я. А. Ильченко // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2011. – № 71(07). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/07/pdf/29.pdf>
8. Оськин С.В. Повышение надежности электроприводов в сельском хозяйстве / С.В. Оськин, И.А. Переверзев, А.Ф. Кроневальд // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – №1. – С. 20-21.
9. Богатырев Н.И. Асинхронные генераторы для систем автономного электроснабжения. Часть 2. Базовая теория формирования статорных обмоток асинхронных генераторов и методы расчета обмоток / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, А.С. Креймер, П.П. Екименко // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2010. – №06(060). С. 305 – 335. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/06/pdf/23.pdf>

### References

1. Kicis S.A. Asinhronnye samovozbuzhdajushhiesja generatory.-M.: Jenergoatomizdat, 2003. - 328 s (In Russian).
2. German-Galkin S.G. Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyyh sistem v MATLAB 6.0: Uchebnoe posobie.- SPb.: KORONA print, 2001. - 320 s (In Russian).
3. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskikh ma-shin. - M.: Vyssh. shk., 2001.-327 s (In Russian).
4. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskikh ma-shin: Ucheb. dlja vuzov po spec. «Jelektricheskie mashiny».- M.: Vyssh.shk., 1987. - 248 s (In Russian).
5. Aliev I.I. Spravochnik po jelektrotehnike i jelektrooborudovaniju: Ucheb.posobie dlja vuzov. - 2-e izd., dop. - M.: Vyssh.shk., 2000. - 255 s., il. (In Russian)
6. Strizhkov I. G. Matematicheskoe opisanie asinhronnogo generatora s razvetvlennoj statornoj obmotkoj / V. N. Vanurin, I. G. Strizhkov, Ja. A. Il'chenko // Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2011. – № 71(07). – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2011/07/pdf/29.pdf> (In Russian)
8. Os'kin S.V. Povyshenie nadezhnosti jelektroprivodov v sel'skom hozjajstve / S.V. Os'kin, I.A. Pereverzev, A.F. Kroneval'd // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 2008. – №1. – S. 20-21 (In Russian).
9. Bogatyrev N.I. Asinhronnye generatory dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija. Chast' 2. Bazovaja teorija formirovanija statornyh obmotok asinhronnyh generatorov i metody rascheta obmotok / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, A.S. Krejmer, P.P. Ekimenko // Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2010. – №06(060). S. 305 – 335. Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2010/06/pdf/23.pdf> (In Russian)