

УДК 629.7.036

Г. Н. УТЛЯКОВ, В. М. КУЛЯПИН

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Приведены результаты исследований систем гармонического компаундирования источников питания первичных и вторичных систем электрооборудования летательных аппаратов. Системы электрооборудования; бесконтактные генераторы; регулирование напряжения; устойчивость процессов регулирования напряжения; математическая модель

ВВЕДЕНИЕ

Известен довольно широкий спектр работ в области фундаментальных и прикладных исследований по разработке систем регулирования напряжения и частоты источников питания, устанавливаемых в первичных и вторичных системах электроснабжения летательных аппаратов. Несмотря на результаты, достигнутые в данных направлениях на сегодняшний день, появление мощных потребителей, работающих в динамических и импульсных режимах, существенно увеличивает массу и габариты источников питания и усложняет системы регулирования.

В авиационных генераторах, работающих на резко изменяющиеся и динамические нагрузки, компенсирующие связи осуществляют на основе применения компаундирующих трансформаторов или специальных обмоток, измеряющих изменение возмущений: тока нагрузки, коэффициента мощности нагрузки, т. е. используется принцип амплитудно-фазового компаундирования.

Недостатком этих схем является необходимость введения в систему автоматического регулирования дополнительных элементов — компаундирующих трансформаторов тока и напряжения, разделительных дросселей, что значительно увеличивает массу источника электропитания.

Имеются отечественные и зарубежные публикации, посвященные проблеме разработки элементов и систем регулирования с использованием высших гармоник магнитного поля — систем гармонического компаундирования (СГК) [1–7].

Исследование, разработка и реализация таких систем возможны лишь при наличии

теории, методов расчета, проектирования и исследований, позволяющих с единой позиции анализировать процессы регулирования напряжения при статических и динамических режимах работы, установить их закономерности с учетом влияния параметров системы регулирования, объекта регулирования и возмущающих воздействий.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Анализ возможности применения тех или иных гармоник магнитного поля (режимных параметров) для построения систем регулирования проведен по результатам расчета магнитного поля полюсов и поля реакции якоря.

На основании аппроксимации конфигурации воздушного зазора аналитическими выражениями и последующих преобразований получены зависимости для определения амплитуд первой и высших гармонических составляющих поля полюсов в зависимости от коэффициента полюсного перекрытия для профилированных полюсов с равномерным воздушным зазором $\delta^* = \delta_C / \delta_0 = 1$, максимумом воздушного зазора под центром $\delta^* > 1$ и краем $\delta^* < 1$ полюсного наконечника. Полученные зависимости для расчета амплитуд высших гармоник поля полюсов и поля реакции якоря представлены в таблице.

Анализ результатов расчетов, проведенных по предлагаемым методикам для различных типов авиационных бесконтактных генераторов (БГ), показывает, что системы автоматического регулирования напряжения с использованием высших гармоник магнитного поля могут быть реализованы:

Таблица

Соотношение зазоров	Поле полюсов	Поле реакции якоря
$\delta^* = 1$	$B_{\nu P} = \frac{4}{\nu\pi} \sin \frac{\nu\alpha\pi}{2}$	$B_{\nu adp} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\alpha\pi/2} \cos \rho \cos \nu\rho d\rho =$ $= \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin \frac{(1-\nu)\alpha\pi}{2}}{1-\nu} + \frac{\sin \frac{(1+\nu)\alpha\pi}{2}}{1+\nu} \right]$
$\delta^* > 1$	$B_{\nu P} = 2K_1 \int_0^{\alpha\pi/2} \frac{\cos \nu\rho d\rho}{2K_2 - \cos 2\rho}$	$B_{\nu adp} = 2K_1 \int_0^{\alpha\pi/2} \frac{\cos \rho \cos \nu\rho}{2K_2 - \cos 2\rho} d\rho$
$\delta^* < 1$	$B_{\nu P} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\alpha\pi/2} \frac{K_3 \cos \rho \cos \nu\rho d\rho}{K_4 + \cos \rho}$	$B_{\nu P} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\alpha\pi/2} \frac{K_3 \cos \rho \cos^2 \nu\rho d\rho}{K_4 + \cos \rho}$
$K_1(\alpha, \delta) = \frac{4 \sin^2 \frac{\alpha\pi}{2}}{\pi \left(\frac{\delta_C}{\delta_0} - 1 \right)}$; $K_2(\alpha, \delta) = \frac{\sin^2 \frac{\alpha\pi}{2}}{\frac{\delta_C}{\delta_0} - 1} + \frac{1}{2}$; $K_3(\alpha, \delta) = \frac{1 - \cos \frac{\alpha\pi}{2}}{1 - \frac{\delta_C}{\delta_0} \cos \frac{\alpha\pi}{2}}$; $K_4(\alpha, \delta) = \frac{\left(\frac{\delta_C}{\delta_0} - 1 \right) \cos \frac{\alpha\pi}{2}}{1 - \frac{\delta_C}{\delta_0} \cos \frac{\alpha\pi}{2}}$		

– в объектах регулирования с электромагнитным возбуждением с $\delta^* = 1$ при коэффициенте полюсной дуги $\alpha > 0,667$, в машинах с $\delta^* > 1,0$ – при $\alpha = 0,667 \div 0,82$, а в машинах с $\delta^* < 1,0$ – при $\alpha = 0,53 \div 0,667$ с использованием в качестве режимного параметра третьей гармоники магнитного поля;

– в объектах регулирования с магнитоэлектрическим возбуждением с равномерным воздушным зазором – при $\alpha > 0,667$ и в машинах с $\delta^* > 1,0$ – при $\alpha = 0,667 \div 0,82$ с использованием в качестве режимного параметра третьей гармоники магнитного поля, а при $\delta^* > 1,0$ и $\alpha = 0,42 \div 0,47$ – с использованием в качестве режимного параметра пятой гармоники магнитного поля; в машинах с $\delta^* < 1,0$ – при любых значениях α с использованием как третьей, так и пятой гармоник магнитного поля.

В бесконтактных генераторах типа «сексин» с полюсными наконечниками коэффициент полюсного перекрытия для каждого полюса по оси машины изменяется от α_{\min} у вершины полюса до α_{\max} у корня полюса. При создании систем гармонического компаундирования для объектов регулирования с переменным коэффициентом полюсного перекрытия авторами предложено определять значения амплитуд основной и высших гармоник на основании теоремы о среднем значении [8]

$$\int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} B_{\nu}(\alpha) d\alpha = B_{\text{mid}} (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}),$$

где B_{mid} – среднее значение индукции на интервале; $B_{\nu}(\alpha)$ – гармоники поля полюсов и поля реакции якоря при различных соотношениях зазоров под центром и краем полюсного наконечника (таблица).

Получены выражения для определения поля полюсов под полюсом при соотношении воздушных зазоров $\delta^* > 1$

$$B_{\nu P} = \int_0^{\alpha} \int_0^{\frac{\alpha\pi}{2}} \frac{2K_1(\alpha, \delta) \cos \nu\rho}{2K_2(\alpha, \delta) - \cos 2\rho} d\rho d\alpha$$

и при соотношении воздушных зазоров $\delta^* < 1$

$$B_{\nu P} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\alpha} \int_0^{\frac{\alpha\pi}{2}} \frac{K_3(\alpha, \delta) \cos \rho \cos \nu\rho}{K_4(\alpha, \delta) + \cos \rho} d\rho d\alpha,$$

где $K_1(\alpha, \delta)$, $K_2(\alpha, \delta)$, $K_3(\alpha, \delta)$ и $K_4(\alpha, \delta)$ – коэффициенты (см. табл.).

Получено выражение для определения поля продольной реакции якоря

$$B_{\nu dP} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\alpha} \int_0^{\frac{\alpha\pi}{2}} \frac{K_1(\alpha, \delta) \cos \rho \cos \nu\rho}{2K_2(\alpha, \delta) - \cos 2\rho} d\rho d\alpha.$$

Анализ результатов расчетов, проведенных по предлагаемой методике, показывает, что самовозбуждение генератора типа «сексин» при любой геометрии магнитной системы может быть обеспечено применением систем гармонического и бигармонического компаундирования с использованием третьей

и пятой гармоник магнитного поля. Система регулирования напряжения при изменении нагрузки в генераторах данного типа может быть реализована только в машинах с $\delta^* < 1$ и $\alpha = 0,4 \div 0,7$ с использованием пятой гармоники магнитного потока.

Основная особенность проектирования систем гармонического компаундирования — выделение сигнала режимной координаты из магнитного поля объекта регулирования. Это осуществляется с помощью специальных обмоток (обмоток СГК), определяющих свойства систем управления и регулирования с использованием высших гармоник магнитного поля. Особенности и методика построения схем обмоток СГК изложены в [9].

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

В [10] представлена математическая модель для анализа процессов регулирования напряжения генераторов с системами гармонического компаундирования в статических режимах работы.

В динамических режимах работы БГ с СГК: при самовозбуждении генератора, при включении и отключении мощных нагрузок, при внезапных коротких замыканиях — характер процессов обусловлен особенностями системы гармонического компаундирования и зависит от параметров СГК и генератора.

БГ с системой гармонического компаундирования является объектом регулирования с зависимым возбуждением, так как магнитодвижущая сила возбуждения зависит от характеристик системы гармонического компаундирования, которые в свою очередь определяются режимами работы БГ.

Для создания автономного источника питания необходимо, чтобы в нем было обеспечено надежное самовозбуждение при всех условиях эксплуатации на объекте.

Установлено, что для обеспечения начального возбуждения БГ с системой гармонического компаундирования необходимо, чтобы произведение соотношения обмоточных данных СГК и объекта регулирования K_W и относительного содержания используемой гармоники при холостом ходе $K_{Г0}$ было больше величины, обратно пропорциональной коэффициенту усиления объекта регулирования:

$$K_W K_{Г0} \geq \frac{1}{K_V}$$

Данное условие всегда может быть выполнено соответствующим выбором параметров СГК — K_W и $K_{Г0}$.

Поскольку возбудитель и генератор представляют каскадное соединение двух машин, каждая из которых имеет соответствующий коэффициент усиления, а коэффициент усиления каскада электрических машин равен произведению коэффициентов усиления каждой машины, то повышение величины остаточного напряжения целесообразно проводить за счет повышения остаточной намагниченности возбудителя. Незначительное увеличение потока остаточной намагниченности возбудителя за счет усиления в возбудителе и генераторе приводит к значительному повышению уровня остаточного напряжения обмотки системы гармонического компаундирования генератора.

Разработана математическая модель для определения составляющих напряжения при внезапном подключении нагрузки без и при действии СГК.

В первом случае закон изменения напряжения объекта регулирования определяется его параметрами: индуктивными сопротивлениями по продольной и поперечной осям, постоянной времени обмотки возбуждения и параметрами нагрузки:

$$u_{Г1} = \frac{z_q z_{uq0}}{x_d x_q + r^2} \left[\left(\frac{x_d x_q + r^2}{x_d x_q + r^2} - 1 \right) e^{-t/T'_{ВГ}} + 1 \right]$$

Закономерность нарастания напряжения на обмотке СГК имеет сложный характер, она в значительной степени зависит от конфигурации воздушного зазора объекта регулирования и характера нагрузки. В первом приближении эту закономерность можно представить экспонентой с постоянной времени $T_{СГК}$

$$U_B = U_{B0} + (U_{ВП} - U_{B0}) \left(1 - e^{-t/T_{СГК}} \right),$$

где $U_{ВП}$ — предельное возбуждение, соответствующее напряжению обмотки СГК при нагрузке; U_{B0} — начальное возбуждение, соответствующее напряжению обмотки СГК при холостом ходе.

Принятое экспоненциальное изменение напряжения в обмотке СГК и напряжения на обмотке возбуждения возбудителя учитывает как изменение величины напряжения обмотки СГК, так и скорость его нарастания. Оба эти параметра зависят как от величины, так

и от вида нагрузки основной обмотки объекта регулирования.

Получено выражение для определения изменения напряжения под действием СГК

$$U_{Г2} = \frac{z_q z z_{qB} z_B (U_{ВП} - U_{В0}) K_{ВU}}{(x_d x_q + r^2)(x_{dB} x_{qB} + r_B^2)} \times \left(1 - \frac{T_{ВГ}^{\prime 2} e^{-t/T_{ВГ}^{\prime}}}{(T_{ВГ}^{\prime} - T_{ВВ}^{\prime})(T_{ВГ}^{\prime} - T_{СГК})} - \frac{T_{ВВ}^{\prime 2} e^{-t/T_{ВВ}^{\prime}}}{(T_{ВВ}^{\prime} - T_{ВГ}^{\prime})(T_{ВВ}^{\prime} - T_{СГК})} - \frac{T_{СГК}^2 e^{-t/T_{СГК}}}{(T_{СГК} - T_{ВГ}^{\prime})(T_{СГК} - T_{ВВ}^{\prime})} \right),$$

где $T_{ВГ}^{\prime}$ и $T_{ВВ}^{\prime}$ — постоянные времени обмоток возбуждения объекта регулирования при замкнутых рабочих обмотках; $T_{СГК}$ — постоянная времени СГК; $x_d, x_q, x_{dB}, x_{qB}, r, r_B$ — индуктивные и активные сопротивления объекта регулирования с учетом внешних сопротивлений.

Результирующее напряжение БГ с системой гармонического компаундирования после подключения нагрузки будет определяться выражением

$$U_{Г} = U_{Г1} + U_{Г2} = K_1 U_{q0} \left[(K_2 - 1) e^{-t/T_{п1}} \right] + K_1 K_3 (U_{ВП} - U_{В0}) K_{ВU} F(t),$$

где

$$F(t) = 1 - \frac{T_{ВГ}^{\prime 2} e^{-t/T_{ВГ}^{\prime}}}{(T_{ВГ}^{\prime} - T_{ВВ}^{\prime})(T_{ВГ}^{\prime} - T_{СГК})} - \frac{T_{ВВ}^{\prime 2} e^{-t/T_{ВВ}^{\prime}}}{(T_{ВВ}^{\prime} - T_{ВГ}^{\prime})(T_{ВВ}^{\prime} - T_{СГК})} - \frac{T_{СГК}^2 e^{-t/T_{СГК}}}{(T_{СГК} - T_{ВГ}^{\prime})(T_{СГК} - T_{ВВ}^{\prime})};$$

$$K_1 = \frac{z_q z}{x_d x_q + r^2}; \quad K_2 = \frac{x_d x_q + r^2}{x_d' x_q + r^2}.$$

Используя полученную математическую модель для исследования динамических режимов работы БГ с системой гармонического компаундирования, в среде математической системы MathCad 7.0 Professional проведено исследование процессов регулирования напряжения при внезапном подключении

нагрузки на зажимы основной обмотки бесконтактного генератора с системой гармонического компаундирования.

ГОСТ [11] накладывает довольно жесткие требования к системам регулирования напряжения по обеспечению минимальных провалов и выбросов напряжения при внезапных подключениях и отключениях нагрузок, а также к времени входа напряжения в пределы, устанавливаемые ГОСТом.

Анализ результатов исследований позволил установить, что система гармонического компаундирования без специального регулятора напряжения обеспечивает высокое быстродействие регулирования напряжения при внезапно изменяющихся нагрузках.

3. УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ ГАРМОНИЧЕСКОГО КОМПАУНДИРОВАНИЯ

При синтезе систем автоматического регулирования, когда требуется определить влияние параметров системы регулирования и объекта регулирования на устойчивость, представляет интерес не только факт существования устойчивости или неустойчивости, но и определение пределов изменения одного или нескольких параметров в области, внутри которой система сохраняет устойчивость.

Для СГК без специальной регулирующей аппаратуры (корректора напряжения — КН) представляет интерес определение области устойчивости в плоскости двух параметров — K_W и $T_{ВВ}$, так как значение $T_{ВВ}$ определяется не только параметрами объекта регулирования, но и параметрами СГК.

Получены выражения, которые являются условиями устойчивости для системы гармонического компаундирования без корректора напряжения

$$T_{ВВ} \geq -\frac{T_B T_{Г}}{T_B + T_{Г}};$$

$$K_W \leq \frac{T_{ВВ} + T_B + T_{Г}}{T_{Г} K_{ВU} K_{ВВ} K_B K_{Г0}};$$

$$K_W \leq \frac{1}{K_{ВU} K_{ВВ} K_B K_{Г}};$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} \geq 0.$$

Для случая работы БГ с СГК и корректором напряжения условиями устойчивости бу-

дуг следующие выражения:

$$K_{KH} \leq \frac{T_{BB} + T_B + T_{\Gamma}(1 - K_{BU}K_{BB}K_BK_{\Gamma_0}K_W)}{T_{\Gamma}K_{BB}K_BK_E};$$

$$K_{KH} \leq \frac{1 - K_{BU}K_{BB}K_BK_{\Gamma_0}K_W}{K_{BB}K_BK_E};$$

$$K_{KH} \leq \frac{a_1(T_{BB} + T_B + T_{\Gamma} - T_{\Gamma}K_{BU}K_{BB}K_BK_WK_{\Gamma_0})}{K_{BB}K_BK_E(a_1T_{\Gamma} - a_0)} - \frac{a_0(1 - K_{BU}K_{BB}K_BK_WK_{\Gamma_0})}{K_{BB}K_BK_E(a_1T_{\Gamma} - a_0)}.$$

Полученные выражения позволяют проводить исследования устойчивости процессов регулирования напряжения в бесконтактных генераторах с вращающимися выпрямителями, являющимися основными источниками питания систем электрооборудования ЛА.

Для проверки результатов теоретических исследований и положений, а также для оценки поведения системы гармонического компаундирования при различных режимах работы проведены экспериментальные исследования СГК авиационных бесконтактных синхронных генераторов различного конструктивного исполнения в статических и динамических режимах работы.

Исследования систем гармонического компаундирования проводились на макетах бесконтактных генераторов с вращающимися выпрямителями, изготовленных на базе серийных бесконтактных синхронных генераторов ГТ40ПЧ8 и ГТ40ПЧ6, а также на образцах бесконтактных генераторов вторичных источников электропитания мощностью от 200 до 1500 ВА:

– магнитоэлектрических с ротором типа «звездочка» и с ротором с полюсными наконечниками;

– с внутризамкнутым магнитопроводом типа «сексин».

Результаты экспериментальных исследований БГ с СГК при внезапных коротких замыканиях позволили использовать генераторы мощностью 40 и 60 кВА с системой гармонического компаундирования в качестве источников питания стендов для исследования предельной отключающей способности биметаллических автоматов защиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье приведены некоторые результаты фундаментальных и прикладных исследований авторов в области исследования систем регулирования источников питания систем электрооборудования с использованием высших гармоник магнитного поля в воздушном зазоре машины.

Основные результаты работы состоят в следующем:

– определены условия реализации принципа гармонического компаундирования в системах регулирования напряжения бесконтактных генераторов переменного тока различного исполнения, в основу которого положено использование высших гармоник магнитного поля в воздушном зазоре машины;

– разработана совокупность математических моделей, позволяющих проводить исследования процессов регулирования напряжения в бесконтактных генераторах с системами регулирования напряжения, использующими высшие гармоники магнитного поля, в штатных и аварийных ситуациях при статических и динамических режимах работы;

– построены структурные схемы источников электропитания с системами гармонического компаундирования с учетом корректора напряжения и без него, позволяющие проводить анализ и синтез систем регулирования напряжения с использованием высших гармоник магнитного поля. Установлена взаимосвязь параметров системы гармонического компаундирования и параметров бесконтактного генератора с вращающимися выпрямителями, определяющая границы устойчивости работы СГК;

– разработаны, практически реализованы и исследованы системы гармонического компаундирования авиационных бесконтактных синхронных генераторов с вращающимися выпрямителями мощностью 40 и 60 кВА, а также генераторов вторичных источников электропитания различного исполнения мощностью от 200 до 1500 ВА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куляпин В. М., Утляков Г. Н.** Комбинированные системы регулирования: Учебное пособие. Уфа, 1983. 80 с.
2. **Утляков Г. Н.** Автономные источники питания с системой гармонического компаундирования // Proc. of the Fourth Int. Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems (UEES-99). St. Petersburg, Szczecin, 1999. P. 1237–1242.
3. **Bunzel E., Gellrich D., Muller G.** Nutzung von Oberwellen des Luftspaltfeldes von Synchronmaschinen zur Bereitstellung der Erregerleistung // 37. Inf. Wiss. Kolloq. Ilmenau (Thuringen): Techn. Univ. Ilmenau, 1992. P. 384–389.
4. **Inoue K., Yamashita H., Nakamae E., Fujikama T.** A brushless self-exciting three-phase synchronous generator utilizing the 5th space harmonic component of magneto motive force through armature currents // IEEE Trans. Energy Convers. 1992. No 3. P. 517–523.
5. **Tadashi F., Takahiro K., Toshio M.** Denki gakkai ronbunshi // D. Sangyo yoy bumonshi – Trans. Inst. Elec. Eng. Jap. D. 1995. V. 115, No 9. P. 1179–1185.
6. **Utlyakov G. N., Bovtrikova E. V.** Autonomous supply sources with compound harmonic control systems // The Third Int. Conf. on New Energy Systems and Conversions. Kazan, September, 1997. P. 169–172.
7. **Утляков Г. Н., Куляпин В. М., Бовтрикова Е. В.** Комбинированные системы регулирования напряжения синхронных генераторов: Науч. изд.-е. М.: Изд-во МАИ, 1998. 224 с.
8. **Исследование комбинированных систем регулирования синхронных генераторов: Отчет о НИР / В. М. Куляпин, Г. Н. Утляков, Е. В. Бовтрикова** Инв. № 02980001526. М., 1997. 58 с.
9. **Утляков Г. Н.** Гармонические датчики тока в системах регулирования и защиты // Измерительные преобразователи и информационные технологии: Межвуз. науч. сб. Уфа, 1998. С. 86–91.
10. **Утляков Г. Н.** Системы регулирования и защиты автономных источников электропитания с использованием высших гармоник магнитного поля // Вестник УГАТУ. 2000. № 2. С. 183–188.
11. **ГОСТ 19705-89.** Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. М.: Изд-во стандартов, 1989. 38 с.

ОБ АВТОРАХ

Утляков Геннадий Николаевич, проф. каф. электрооборудования ЛА и наземного транспорта УГАТУ. Дипл. инженер по электрическим машинам и аппаратам (УАИ, 1971). Д-р техн. наук по элементам и устройствам вычислительной техники и систем управления (УГАТУ, 2000). Исследования в области систем электрооборудования ЛА.



Куляпин Владислав Максимилианович, доцент той же кафедры. Дипл. инженер по электрическим машинам и аппаратам (НЭТИ, 1959). Канд техн. наук по технической кибернетике (НЭТИ, 1970). Докт. дис. в области систем электрооборудования ЛА (УГАТУ, 2002).

