

УДК 621.3

## Фильтрация гармоник частотноуправляемых асинхронных машин двойного питания

Л. Г. Гасанова

*Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-исследовательский институт энергетики, г. Баку, Азербайджан;*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9909-7222>, e-mail: [gasanovalg@mail.ru](mailto:gasanovalg@mail.ru)*

### Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 09.10.2019; получена после доработки 06.12.2019

### Ключевые слова:

машина двойного питания, преобразователь частоты, гармонические составляющие, математическая модель, широтно-импульсная модуляция, режим фильтрации

### Для цитирования

Частотноуправляемые асинхронные машины двойного питания применяются в качестве генераторов в возобновляемых источниках энергии (ветроэлектрических устройствах и установках малых ГЭС); а также активно внедряются в судовые генераторные установки. Одним из основных методов исследования режимов их работы является математическое моделирование. В преобразователях частоты, питающих роторную обмотку машины двойного питания, используются силовые транзисторы или полностью управляемые силовые тиристоры. Современные схемы этих преобразователей, управляемых на базе синусоидальной широтно-импульсной модуляции, не позволяют избавиться от гармонических составляющих, возникающих в кривой выходного напряжения. В процессе исследования режимов работы частотноуправляемых асинхронных машин двойного питания рассмотрено устройство подавления гармонических составляющих в кривой выходного напряжения. Для частотноуправляемой со стороны ротора машины двойного питания разработана математическая модель с учетом гармонического состава выходного напряжения преобразователя частоты и батарей статических конденсаторов в цепи ротора; проведены исследования режимов фильтрации гармонических составляющих выходного напряжения преобразователя частоты при использовании простейшего фильтра – батареи статического конденсатора. Размещение данных батарей на выходе преобразователя частоты позволяет существенно снизить гармонические составляющие в кривых роторных токов, а значит, и во всей машине. Таким образом, разработанная схема моделирования и результаты проведенного исследования продемонстрировали эффективность применения фильтра, состоящего из статических конденсаторов.

Гасанова Л. Г. Фильтрация гармоник частотноуправляемых асинхронных машин двойного питания. Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 508–512. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-508-512.

## Harmonic filtering of frequency controlled asynchronous double fed machines

Lyaman H. Hasanova

*Azerbaijan Scientific-Research & Designed-Prospecting Institute of Energetics, Baku, Azerbaijan;*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9909-7222>, e-mail: [gasanovalg@mail.ru](mailto:gasanovalg@mail.ru)*

### Article info

Received 09.10.2019; received in revised 06.12.2019

### Key words:

double fed machine, frequency converter, harmonic components, mathematical model, pulse-width modulation, filtering mode

### Abstract

Frequency-controlled asynchronous double fed machines are widely used both as motors and as generators. They are especially widely used in renewable energy sources as generators for wind power devices and installations of small hydroelectric power stations. In recent years, they have been actively introduced into marine generator sets. One of the main methods for studying their operation modes is mathematical modeling. Frequency converters supplying the rotor winding of a dual-power machine use power transistors or fully controllable power thyristors. Modern circuits of these converters controlled on the basis of sinusoidal pulse-width modulation do not allow to get rid of the harmonic components arising in the output voltage curve. In the process of studying the operating modes of frequency-controlled asynchronous double fed machines, a device for suppressing harmonic components in the output voltage curve has been considered. A mathematical model has been developed for the frequency-controlled double fed machine from the rotor taking into account the harmonic composition of the output voltage of the frequency converter and the batteries of static capacitors in the rotor circuit; the filtering modes of the harmonic components of the output voltage of the frequency converter have been studied using the simplest filter – a static capacitor battery. Placing these batteries at the output of the frequency converter can significantly reduce the harmonic components in the curves of rotor currents, and hence in the whole machine. Thus, the developed modeling scheme and the results of the study have demonstrated the effectiveness of using a filter consisting of static capacitors.

### For citation

Hasanova, L. H. 2019. Harmonic filtering of frequency controlled asynchronous double fed machines. *Vestnik of MSTU*, 22(4), pp. 508–512. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-508-512.

## Введение

Управляемые со стороны ротора асинхронные машины двойного питания (МДП) находят широкое применение в качестве генераторов возобновляемых источников энергии (Akagi et al., 2002; Chitti et al., 2010; Ekanayake et al., 2003). В настоящее время рассматриваются вопросы их применения в судостроении в качестве валогенераторов (Григорьев и др., 2009; Абдуллаев и др., 2018).

В преобразователях частоты, питающих роторную обмотку этих машин, применяются силовые IGBT-транзисторы или полностью управляемые силовые тиристоры ГТО, оснащенные гибкими системами управления с синусоидальным широтно-импульсным модулятором (ШИМ).

Схема и математическая модель машины двойного питания, используемой в качестве генератора в возобновляемых источниках энергии, представлены в работе (Мустафаев и др., 2014); исследован гармонический состав выходного напряжения преобразователя частоты (ПЧ), питающего роторную обмотку машины двойного питания, проведено математическое моделирование и получены флюктограммы изменения режимных параметров МДП с учетом гармонических составляющих роторного напряжения. Гармонический состав преобразователя частоты, питающего статорную обмотку синхронного генератора с постоянными магнитами, проанализирован в статье (Мустафаев и др., 2017).

В процессе настоящего исследования рассмотрен режим фильтрации гармоник на выходе преобразователя частоты МДП, осуществляемый с помощью простейшего фильтрующего устройства – батареи статических конденсаторов.

## Материалы и методы

На схеме фильтрации гармоник на выходе преобразователя частоты МДП (рис. 1) показано, что батарея конденсаторов (БК) подключена к роторной обмотке, т. е. параллельно с преобразователем частоты.

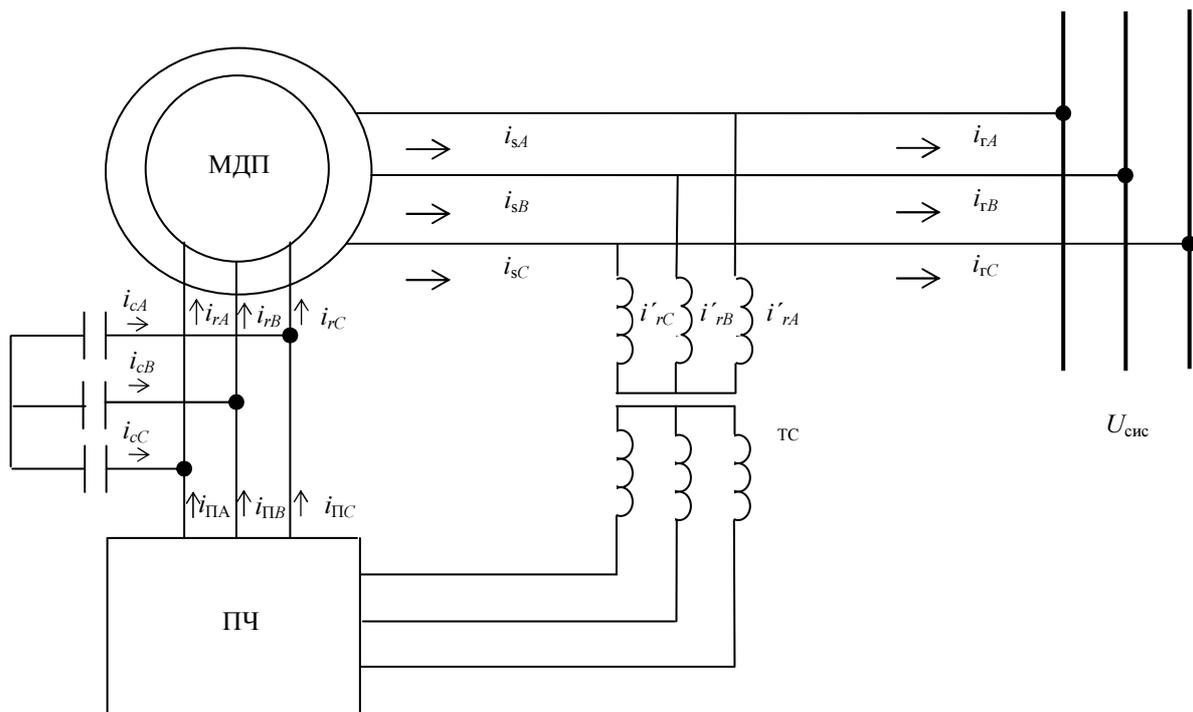


Рис. 1. Подключение МДП к внешней сети с учетом емкостного фильтра  
Fig. 1. Connecting a DFM to an external network taking into account the capacitive filter

В ходе анализа режима фильтрации используем уравнения, представленные в работе (Мустафаев и др., 2014):

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{ds} &= -U_s \sin \theta + \psi_{qs} (1-s) - r_s i_{ds}, \\ p\Psi_{qs} &= U_s \cos \theta - \psi_{ds} (1-s) - r_s i_{qs}, \\ p\Psi_{dr} &= -U_s k_{ur} \sin(k_{fr} \tau) - r_r i_{dr}, \\ p\Psi_{qr} &= U_s k_{ur} \cos(k_{fr} \tau) - r_r i_{qr}, \\ pS &= -\frac{1}{T_j} m_{\text{нн}} - \frac{1}{T_j} m_{\text{эм}}, \\ p\theta &= s, \\ m_{\text{эм}} &= \Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}, \\ i_{ds} &= k_s \Psi_{ds} - k_m \Psi_{dr}, \\ i_{qs} &= k_s \Psi_{qs} - k_m \Psi_{qr}, \\ i_{dr} &= k_r \Psi_{dr} - k_m \Psi_{ds}, \\ i_{qr} &= k_r \Psi_{qr} - k_m \Psi_{qs}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В соответствии со схемой, указанной на рис. 1, токи роторного контура определим по выражениям

$$\left. \begin{aligned} i_{dr} &= i_{d\text{rn}} - i_{drc}, \\ i_{qr} &= i_{q\text{rn}} - i_{qrc}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $i_{d\text{rn}}, i_{q\text{rn}}$  – проекции выходного тока преобразователя частоты по осям  $d, q$ , вращающегося со скоростью ротора МДП  $\omega = 1-s$ ;  $i_{drc}, i_{qrc}$  – проекции тока батареи конденсаторов по осям  $d, q$ .

Токи на входе преобразователя частоты равны (в осях  $d, q$ ):

$$\left. \begin{aligned} i_{d\text{rn}}^* &= k_n i_{d\text{rn}}, \\ i_{q\text{rn}}^* &= k_n i_{q\text{rn}}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Величины составляющих токов на входе согласующего трансформатора (ТС) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} i_{dr} &= k_t i_{d\text{rn}}^*, \\ i_{qr} &= k_t i_{q\text{rn}}^*. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Таким образом, с учетом формул (3) и (2) выражение (4) запишем так:

$$\left. \begin{aligned} i_{dr} &= k_n k_t (i_{dr} + i_{drc}) = k_u (i_{dr} + i_{drc}), \\ i_{qr} &= k_n k_t (i_{qr} + i_{qrc}) = k_u (i_{qr} + i_{qrc}), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $k_u = k_n k_t$ .

Используя амплитуды и частоты гармонических составляющих, представленные в работе (Мустафаев и др., 2014), определим составляющие роторного напряжения:

$$\left. \begin{aligned} U_{dr}^o &= -U_s k_{ur} (0,9 \sin(k_{fr} \tau) - 0,035 \sin(8k_{fr} \tau) + 0,15 \sin(10k_{fr} \tau) - 0,125 \sin(11k_{fr} \tau) + \\ &+ 0,125 \sin(13k_{fr} \tau) - 0,15 \sin(14k_{fr} \tau) + 0,035 \sin(16k_{fr} \tau)), \\ U_{qr}^o &= U_s k_{ur} (0,9 \cos(k_{fr} \tau) - 0,035 \cos(8k_{fr} \tau) + 0,15 \cos(10k_{fr} \tau) - 0,125 \cos(11k_{fr} \tau) + \\ &+ 0,125 \cos(13k_{fr} \tau) - 0,15 \cos(14k_{fr} \tau) + 0,035 \cos(16k_{fr} \tau)). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Следует отметить, что при чисто синусоидальном характере изменения роторного напряжения

$$\left. \begin{aligned} U_{dr} &= -U_s k_{ur} \sin(k_{fr} \tau), \\ U_{qr} &= U_s k_{ur} \cos(k_{fr} \tau). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Таким образом, необходимо определить токи в БК  $i_{drc}$  и  $i_{qrc}$ , используя выражение (5), и сложить их с токами  $i_{dr}$  и  $i_{qr}$ .

Токи в конденсаторах рассчитываются традиционно по следующим соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} i_{drc} &= c \frac{dU_{dr}^o}{d\tau}, \\ i_{qrc} &= c \frac{dU_{qr}^o}{d\tau}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $c$  – емкость конденсаторной батареи.

В соответствии с выражением (8) токи определяются производными напряжения, равными

$$\left. \begin{aligned} U_{drnp}^o &= -U_s k_{ur} k_{fr} (0,9 \cos(k_{fr} \tau) - 0,28 \cos(8k_{fr} \tau) + 1,5 \cos(10k_{fr} \tau) - 1,375 \cos(11k_{fr} \tau) + \\ &+ 1,625 \cos(13k_{fr} \tau) - 2,1 \cos(14k_{fr} \tau) + 0,56 \cos(16k_{fr} \tau)), \\ U_{qrnp}^o &= U_s k_{ur} k_{fr} (0,9 \sin(k_{fr} \tau) - 0,28 \sin(8k_{fr} \tau) + 1,5 \sin(10k_{fr} \tau) - 1,375 \sin(11k_{fr} \tau) + \\ &+ 1,625 \sin(13k_{fr} \tau) - 2,1 \sin(14k_{fr} \tau) + 0,56 \sin(16k_{fr} \tau)). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Так как напряжения  $U_{dr}^o$  и  $U_{qr}^o$  и, следовательно, их производные  $U_{drnp}^o$  и  $U_{qrnp}^o$  выражены в системе относительных единиц, то емкостное сопротивление БК  $x_c = \frac{1}{\omega C}$  при  $\omega = 314$  и  $C = 1\,000$  Ф (емкость конденсаторов) равно  $x_c = 3,2$  Ом; с учетом базового значения сопротивления МДП  $Z_{баз} \approx 6,4$  Ом в относительных единицах имеем  $x_c^o \approx 0,5$ . Окончательно получим значения  $i_{drc}$  и  $i_{qrc}$  (в относительных единицах):

$$\left. \begin{aligned} i_{drc} &= \frac{U_{drnp}^o}{x_c^o}, \\ i_{qrc} &= \frac{U_{qrnp}^o}{x_c^o}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Величины составляющих токов в конденсаторах, рассчитанные по выражениям (10), необходимо сложить со значениями токов ротора без компенсации гармоник  $i_{dr}$  и  $i_{qr}$ .

## Результаты и обсуждение

Моделирование вышеприведенных теоретических положений осуществлено с учетом параметров МДП, состава гармонических составляющих, представленных в работе (Мустафаев и др., 2014).

Изменения тока ротора МДП при подключении (в соответствии со схемой, указанной на рис. 1), батареи статических конденсаторов (800 рад) отражены на флюктограммах (рис. 2).

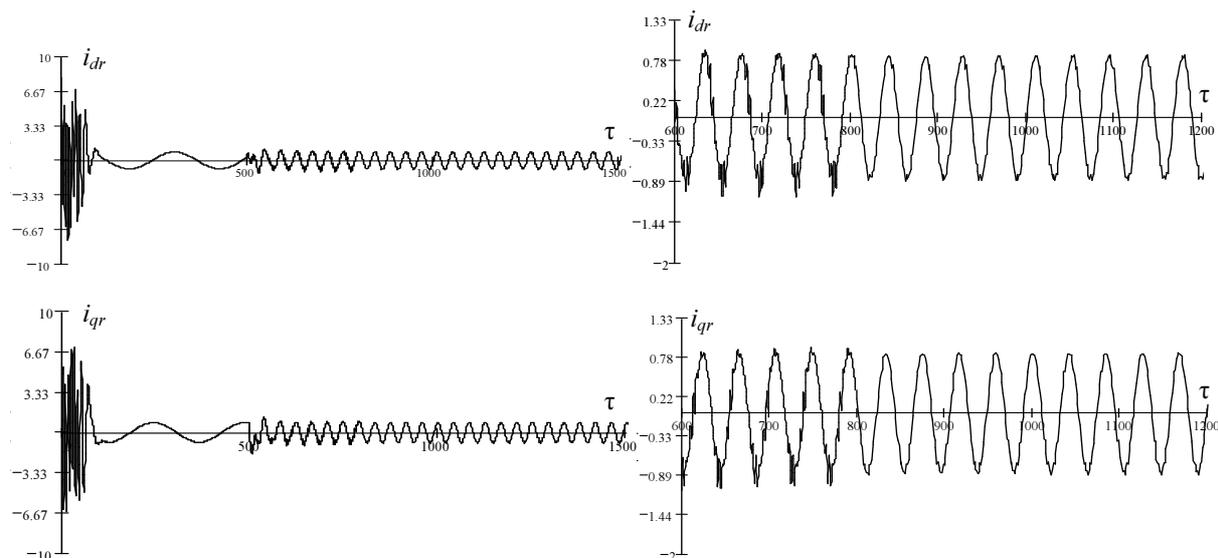


Рис. 2. Флюктограммы изменения тока ротора МДП до (от 0 до 800 рад) и после (800 рад >) включения фильтра

Fig. 2. Fluctograms of changing the DFM rotor current before the filter is turned on (from 0 to 800 rad) and after the filter is turned on (800 rad >)

Как видно из флюктограммы, составляющие тока по осям  $d$ ,  $q$   $i_{rd}$  и  $i_{rq}$  максимально приблизились к синусоидальным кривым, что свидетельствует об эффективной фильтрации гармонических составляющих посредством размещения только БК.

### Заключение

В процессе исследования разработан метод моделирования машины двойного питания с учетом подключенной к его роторной обмотке батареи статических конденсаторов. Подключение данных конденсаторов параллельно с выходом преобразователя частоты существенно фильтрует составляющие роторных токов МДП. Этот факт вполне объясним, так как в составе роторного напряжения после преобразователя частоты преобладают гармонические высших порядков (10–16-я), которые эффективно фильтруются конденсаторами, т. е. отпадает необходимость применения сложных фильтрующих устройств, тем более активных фильтров.

### Библиографический список

- Абдуллаев Я. Р., Мехтиев Г. А., Исмаилов С. С. Исследование динамических режимов асинхронизированного синхронного валогенератора судна с винтом регулируемого шага // Судостроение. 2018. № 2. С. 28–34.
- Григорьев А. В., Петухов В. А. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки : монография. СПб. : Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. 175 с.
- Мустафаев Р. И., Гасанова Л. Г. Влияние высших гармонических составляющих напряжений на режимные параметры частотноуправляемой асинхронной машины двойного питания ВЭУ // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 5. С. 23–28.
- Мустафаев Р. И., Гасанова Л. Г. Методика исследования влияния высших гармонических напряжения на режимные параметры синхронного генератора с постоянными магнитами // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 4. С. 705–713. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-4-705-713>.
- Akagi H., Sato H. Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system // IEEE Transactions on Power Electronics. 2002. Vol. 17, Iss. 1. P. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.988676>.
- Chitti Babu B., Mohanty K. B. Doubly-fed induction generator for variable speed wind energy conversion systems-modeling & simulation // International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2010. Vol. 2, N 1. P. 1793–8163. DOI: <https://doi.org/10.7763/ijcee.2010.v2.127>.
- Ekanayake J. B., Holdsworth L., XueGuang Wu, Jenkins N. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines // IEEE Transactions on Power Systems. 2003. V. 18, Iss. 2. P. 803–809. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2003.811178>.

### References

- Abdullaev, Ya. R., Mekhtiev, G. A., Ismailov, S. S. 2018. Surveys on dynamic operation modes of asynchronous synchronous shaftdriven generator with controlled pitch propeller. *Sudostroenie*, 2, pp. 28–34. (In Russ.)
- Grigoriev, A. V., Petukhov, V. A. 2009. Modern and perspective ship shaft-generating units. Monograph. Saint Petersburg. Publishing House of Makarov State Marine Academy. (In Russ.)
- Mustafayev, R. I., Hasanova, L. H. 2017. Methodology for studying the influence of higher harmonic voltages on the operating parameters of a permanent magnet synchronous generator. *Vestnik of MSTU*, 20(4), pp. 705–713. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-4-705-713>. (In Russ.)
- Akagi, H., Sato, H. 2002. Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(1), pp. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.988676>.
- Chitti, Babu B., Mohanty, K. B. 2010. Doubly-fed induction generator for variable speed wind energy conversion systems-modeling & simulation. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2(1), pp. 1793–8163. DOI: <https://doi.org/10.7763/ijcee.2010.v2.127>.
- Ekanayake, J. B., Holdsworth, L., XueGuang, Wu, Jenkins, N. 2003. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(2), pp. 803–809. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2003.811178>.

### Сведения об авторах

**Гасанова Ляман Гасан гызы** – пр. Зардаби, 94, г. Баку, Азербайджан, Az 1012; Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики, канд. техн. наук, доцент; e-mail: [gasanovalg@mail.ru](mailto:gasanovalg@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9909-7222>

**Lyaman H. Hasanova** – 94 Zardabi Ave., Baku, Azerbaijan, Az 1012; Azerbaijan Scientific-Research & Designed-Prospecting Institute of Energetics, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: [gasanovalg@mail.ru](mailto:gasanovalg@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9909-7222>