

УДК 622.233.6:-83:68.3

В. С. Хилов, д-р техн. наук,  
К. П. Фофанов, Е. В. Носаненко

### ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАВНОГО ПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СЕТЕВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ГЕНЕРАТОРНОЙ ГРУППЫ ПОСРЕДСТВОМ НИЗКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

**Аннотация.** Предложен способ пуска мощного сетевого двигателя в системе генератор-двигатель. Произведен анализ изменений токов в индуктивно-емкостном преобразователе в момент пуска привода генератора. Установлены закономерности перетекания мощностей. Проанализированы значения резонансных напряжений.

**Ключевые слова:** индуктивно-емкостной преобразователь, пуск, сетевой двигатель, источник тока, генераторная группа

V. Khilov, PhD.,  
K. Fofanov, E. Nosanenko

### SOFT START-UP OF HIGH-VOLTAGE AC MOTOR OF GENERATOR UNIT FORMATING THROUGH BY THE USE OF LOW-VOLTAGE CURRENT SUPPLY

**Abstract.** A method for starting of powerful network engine in the generator-motor is proposed. The analysis of current changes in an inductive-capacitive transducer at the time of start-up drive of the generator is performed. The laws of changing in powers. Values of the resonance voltage are analyzed.

**Keywords:** inductive-capacitive transducer, start-up, network drive, power supply unit, generator group

В. С. Хілов, д-р техн. наук,  
К. П. Фофанов, Є. В. Носаненко

### ФОРМУВАННЯ ПЛАВНОГО ПУСКУ ВИСОКОВОЛЬТНОГО МЕРЕЖОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ГЕНЕРАТОРНОЇ ГРУПИ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ

**Анотація.** Запропоновано спосіб пуску потужного мережевого двигуна в системі генератор-двигун. Зроблено аналіз зміни струмів в індуктивно-емнісному перетворювачі у момент пуску приводу генератора. Встановлені закономірності перетікання потужностей. Проаналізовано значення резонансних напруг.

**Ключові слова:** індуктивно-емнісний перетворювач, пуск, мережевий двигун, джерело струму, генераторна група

**Постановка проблемы и ее связь с прикладными задачами.** Особенности электромагнитной совместимости приводных систем энергоемких механизмов циклического действия и протяженных кабельных линий обуславливают применение в главных приводах многомашинные преобразовательные агрегаты по системе генератор-двигатель [1].

Пуск многомашинного агрегата производится прямым включением сетевой машины переменного тока на напряжение питающей сети. Это приводит к значительным пусковым токам и «провалам» напряжения в питающей сети, что отрицательно сказывается на режимах работы оборудования, подключенного к этой системе электроснабжения вплоть до их выхода из строя [2 – 4]. Значительные пусковые токи приводят к существенным механическим нагрузкам на обмотки сетевой машины переменного тока, что является причиной уменьшения времени наработки на отказ и преждевременного выхода машины переменного тока из строя, поэтому техническими условиями регламентируется число прямых пусков сетевого двигателя – не более трех-четырех в сутки.

**Анализ исследований и публикаций.** Для устранения пусковых токов применяются два технических решения. В первом на период пуска в статор-

ную цепь вводится полупроводниковый высоковольтный преобразователь [5 – 6]; во втором, на период пуска в якорную цепь генератора постоянного тока включается низковольтный полупроводниковый преобразователь [7]. В обоих решениях применяются полупроводниковые преобразователи, которые, как показала практика эксплуатации, при некачественном напряжении кабельных сетей теряют синхронизацию с сетью, что приводит к аварийной остановке всего агрегата.

**Постановка задачи.** В основу исследования поставлено решение задачи безударного пуска электромагнитной совместимости преобразователя с кабельной сетью и якорной цепью генераторной группы.

**Основной материал результатов исследования.** Поставленная задача решается тем, что в многомашинный агрегат, содержащий на одном валу машину переменного тока и генераторы постоянного тока в якорную цепь генератора, в период пуска, включается низковольтный индуктивно-емкостной преобразователь (ИЕП) с трехфазным выпрямителем [8]. Такой преобразователь позволяет согласовывать уровни напряжения на выходе неуправляемого выпрямителя с номинальным напряжением якорной цепи, такой преобразователь полностью сохраняет работоспособность при «провалах» напряжения сети.

© Хилов В.С., Фофанов К.П., Носаненко Е.В., 2015

Функциональная схема подключения приведена на рис. 1, где обозначено: 1 – система электроснабжения; 2 – сетевая машина переменного тока; 3 – якорь возбужденного генератора постоянного тока; 4 – двухпозиционное переключающее устройство; 5 – ИЕП с трехфазным выпрямителем; 6 – якорь возбужденного двигателя постоянного тока; 7 – трехпозиционное переключающее устройство в цепях постоянного тока индуктивно-емкостного преобразователя, двигателя постоянного тока и генератора постоянного тока.

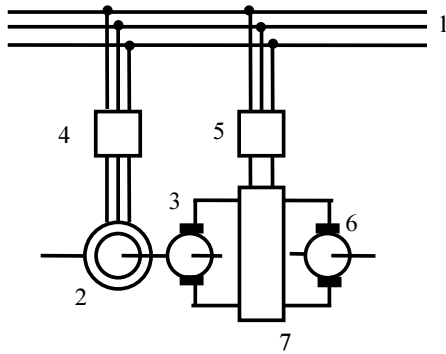


Рис. 1. Функциональная схема подключения низковольтного ИЕП

Применение низковольтного ИЕП позволяет реализовать безударный способ плавного пуска машины переменного тока к сети электроснабжения, повысить безаварийный ресурс машины переменного тока, улучшить энергетические показатели в период разгона генераторной группы и устранить влияние на систему электроснабжения и подключенных к ней нагрузок, что в результате дает возможность оперативно включать сетевой двигатель.

**Баланс напряжений преобразователя.** Проанализируем составляющие напряжений ИЕП, работающего через выпрямитель на противо-ЭДС генератора постоянного тока при следующих допущениях: реактивные элементы схемы идеальные, т.е. не учитываем резистивного сопротивления катушек индуктивностей и токи утечек конденсаторов, в соответствии с принципом компенсации противо-ЭДС заменяем резистивным сопротивлением, трехфазный выпрямитель имеет идеальные вентили. Однофазная схема замещения ИЕП представлена на рис. 2. Она обладает важным свойством – позволяет получить неизменное значение тока в сопротивлении  $R$  вне зависимости от самого значения сопротивления  $R$  [9 – 10].

Относительно сопротивления нагрузки  $R$  вся схема является эквивалентным генератором с внутренним сопротивлением

$$\underline{Z}_r = (jx_1(-jx_3)) / (jx_1 - jx_3),$$

равным бесконечности при выполнении условия  $jx_1 = jx_3$  и выходным напряжением при холостом ходе, стремящимся к бесконечности,

$$\underline{U}_{вых.хх} = -jx_3 \underline{U}_{вх} / (jx_1 - jx_3) \Big|_{x_1=x_3} \rightarrow \infty.$$

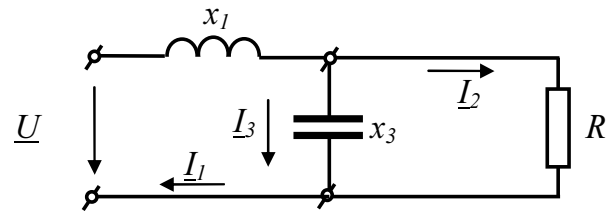


Рис. 2. Однофазная схема замещения индуктивно-емкостного преобразователя

Ток нагрузки пропорционален входному напряжению и ограничивается только сопротивлением индуктивности схемы  $\underline{I}_2 = \underline{U} / jx_1$ .

Таким образом, относительно нагрузочного сопротивления, при выполнении условия  $jx_1 = jx_3$ , схема является идеальным источником тока [2]. Вольт-амперная характеристика представляет прямую линию параллельную оси напряжения. Выходное напряжение источника тока определяется падением напряжения на нагрузочном сопротивлении  $R$ :  $\underline{U}_{вых} = R \cdot \underline{U} / jx_1 = \underline{U}_3$  и приложено к конденсатору с сопротивлением  $\underline{Z}_3 = -jx_3$ . Токи емкости  $\underline{I}_3$  и входной  $\underline{I}_1$

$$\underline{I}_3 = \underline{U}R / x_1^2; \underline{I}_1 = \underline{U}R / x_1^2 - j\underline{U} / x_1.$$

Входной ток имеет две составляющие: 1) реактивную, которая прямо пропорциональна сопротивлению нагрузки  $R$  и равна току емкости и 2) активную, которая равна стабилизированному току источника тока и не зависит от нагрузки.

Падение напряжения на катушке  $x_1$  составляет значение  $\underline{U}_1 = \underline{U} + j\underline{U}R / x_3$ . Причем активная составляющая является входным напряжением  $\underline{U} = \underline{U}_{вх}$ , а реактивная уравнивает напряжение на емкости, обеспечивая резонанс напряжений.

Совмещенная векторная диаграмма токов и напряжений схемы, показанной на рис. 2, приведена на рис. 3. Напряжение на катушке содержит две составляющие активную  $\underline{U}_{вх}$  и реактивную  $\underline{U}_{rL}$ , уравнивающую напряжение на емкости  $\underline{U}_C = \underline{U}_R$ . С увеличением нагрузки  $R$  пропорционально возрастает реактивная составляющая напряжения  $\underline{U}_{rL} = -j\underline{U}R / x_C$  и конец вектора  $\underline{U}_1$  перемещается по вертикали.

Входной ток  $\underline{I}_{вх}$  также имеет две составляющие: реактивную емкостного тока  $\underline{I}_C$  и активную нагрузочного сопротивления  $\underline{I}_R$ . Увеличение сопротивления нагрузки приводит к увеличению реактивного емкостного тока  $\underline{I}_C$  и перемещение конца входного тока  $\underline{I}_{вх}$  вдоль горизонтальной линии.

Ток входной  $\underline{I}_{вх} = \underline{I}_1$  отстает по фазе от напряжения источника питания  $\underline{U}_{вх}$ . Поэтому схема в целом носит резистивно-индуктивный характер. Причем, чем больше сопротивление нагрузки  $R$ , тем меньше угол отставания.

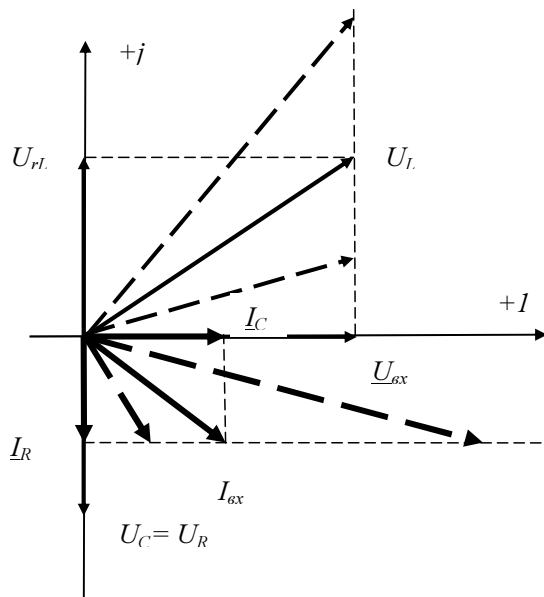


Рис. 3. Совмещенная векторная диаграмма токов и напряжений ИЕП

**Баланс мощности преобразователя.** Полная входная мощность

$$\underline{S}_{вх} = U^2(R/x_1 + j)/x_1, \text{ ВА.}$$

Реактивные мощности катушки и конденсатора

$$Q_1 = j(U^2 R^2 / x_1^3 + U^2 / x_1), \text{ вар;}$$

$$Q_3 = -jU^2 R^2 / x_1^3, \text{ вар.}$$

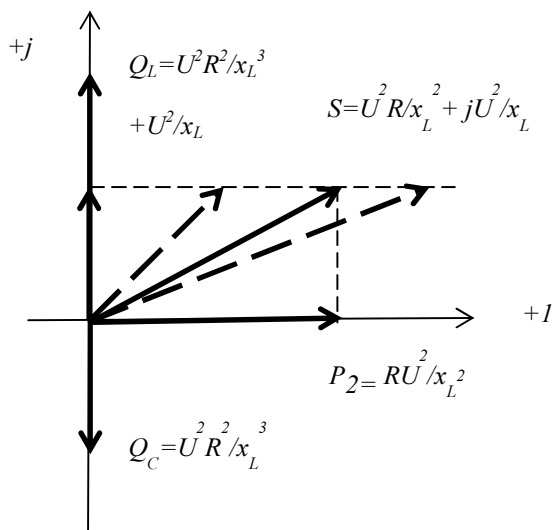


Рис. 4. Векторная диаграмма мощностей индуктивно-емкостного преобразователя

Реактивная мощность катушки (рис. 4) имеет постоянную и переменную составляющие, а реактивная мощность конденсатора – только переменную составляющую, причем переменные реактивные мощности, прямо пропорциональные квадрату сопротивления нагрузки, равны по величине и противоположны по знаку, то есть взаимно компенсируются. Некомпенсированная составляющая реактивной мощности катушки является входной реактивной мощно-

стью. Активная входная мощность изменяется прямо пропорционально сопротивлению нагрузки и равна активной мощности, выделяемой на сопротивлении  $R$ ,  $P_2 = U^2 R/x_L^2$ .

С увеличением сопротивления  $R$  увеличивается активная составляющая полной мощности и конец вектора  $\underline{S}_{вх}$  перемещается по горизонтальной прямой, рис. 3.

**Выводы.** Применение индуктивно-емкостного преобразователя в якорной цепи генератора постоянного тока позволило решить проблему безударного пуска генераторной группы скальных экскаваторов, что в условиях эксплуатации на Центральном горно-обогатительном комбинате (г. Кривой Рог, Украина) позволило осуществить оперативное управление пуском сетевого синхронного двигателя и устранить потребление электроэнергии на холостом ходу восьми кубовых экскаваторов, а также экскаваторов-драглайнов.

К настоящему времени внедрен двадцать один комплект индуктивно-емкостных преобразователей.

#### Список использованной литературы

1. Белов М. П. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов [Текст] / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов, А. А. Сушников. // *Электротехника*. – 2003. – № 5. – С. 12 – 16.
2. Ткачук А. А. Тиристорный преобразователь для плавного пуска высоковольтных асинхронных двигателей [Текст] / А. А.Ткачук, И. К. Кривовяз, В. С. Копырин // *Силовая электроника*. – 2007. – № 1. – С. 18 – 22.
3. Ткачук А. А. Высоковольтный тиристорный преобразователь напряжения для плавного пуска электродвигателя переменного тока [Текст] / А. А. Ткачук, В. К. Кривовяз, В. Н. Яковлев, В. С. Копырин / Сб. научных трудов международной 14 НТК «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург : УГТУ-УПИ. – 2007. – С. 74 – 79.
4. Ткачук А. А. Формирование плавного пуска высоковольтной системы «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» [Текст] / А. А. Ткачук, И. К. Кривовяз, В. С. Копырин, Ю. А. Силуков // Сб трудов международной 3 НТК «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». – Екатеринбург : УГТУ-УПИ. – 2007. – С. 46 – 51.
5. Преобразователи частоты производства ОАО «Электровыпрямитель» для высоковольтного асинхронного электропривода переменного тока. [Текст] / В. Чибиркин, Г. Шестоперев, Г. Минаев, Н. Артаев, Г. Мустафа, Ю. Сенов, С. Демчук / *Силовая электроника*. – 2005. – № 1. – С. 36 – 42.
6. Иванов А. В. Экспериментальное исследование переходных процессов при пуске двигателя в 6,3 МВт от тиристорного пускового устройства на газоперерабатывающем заводе [Текст] / А. В. Иванов, В. В. Фоменко // *Электрo*. – 2008. – № 2. – С. 26 – 33.

7. Гапон Д. А. Особенности режима питающей сети во время плавного пуска мощных синхронных двигателей [Текст] / Д. А. Гапон, Я. С. Бедерак // Промышленная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 11 – 18.

8. Ропало В. М. Спосіб пуску двигуна змінного струму генераторної групи. [Текст] / В. М. Ропало, В. С. Хілов // Патент 73248 України – Опубл. 10.09.2012. Бюл. №17, 2012.

9. Волков И. В. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях [Текст] / И. В. Волков, В. Н. Исаков. – М. : Радио и связь – 1991. – 216 с.

10. Ильинский Н. Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом [Текст] / Н. Ф. Ильинский. – М. : Энергоиздат – 1981. – 144 с.

Получено 15.05.2015

#### References

1. Belov M.P., Novikov V.A., Rsudov L.N., and Suchnikov A.A. Avtomatizirovaniy electroprivod – sovremennaya osnova avtomatizatsii tehnologicheskikh prosesov [Automatic Electric Drive is a Modern Base of Process of Automation ],(2003), Moscow, Russian Federation, *Eletrotechnica*, No. 5, pp. 12 – 16 (In Russian).

2. Tkachyk A.A., Kriviviaz I.K., and Kopirin V.S. Niristorni preobrazovatel dla plynogo puskа visokovoltnih asinhronih dvigatelei [Thyristor Converter for Soft Starting High Voltage Induction Motors], (2007), Moscow, Russian Federation, *Silovaia Electronica*, No. 1, pp. 18 – 22 (In Russian).

3. Tkachyk A.A., Kriviviaz I.K., Iakovlev V.N., Silukov U.A., and Kopirin V.S. Visokovoltni tiristorni preobrazovatel napriazhenia dla plynogo puskа electrodvigatelei peremennogo toka [The High-Voltage Thyristor Converter for Soft Start AC Motor], (2007), *Sb. Nauchnih Trudiv 14 NTK “Electroprivodi Peremennogo Toka”*. Yekaterinburg, Russian Federation, *UGTU-UPI*, pp.74 –79 (In Russian).

4. Tkachyk A.A., Kriviviaz I.K., Kopirin V.S., and Silukov U.A. Formirovanie plynogo puskа visokovoltnoi sistemi “tiristorni preobrazovatel napriazhenia – asinhroni dvigatel” [Formation of high-voltage Soft Start System “Thyristor Voltage Converter – induction Motor”], (2007), *Sb. Trudov Mezhdunarodnoi 3 NTK “Electromechanicheskie i Electromagnitnie Preobrazovateli Energii i Upravliemie Electromechanicheskie Sistemi”*. Yekaterinburg, Russian Federation, *UGTU-UPI*, pp. 46 – 51 (In Russian).

5. Chibirkin V., Shestoporov G., Minaev G., Artaev N., Mustafa G., Senov U., and Demchuc S. Preobrazovateli chastoti proizvodstva OAO “Electrovipriamitel” dla visokovoltjnogo asinhronogo electroprivoda peremennogo toka [Variable Speed of Production of JSC “Electrovipriamitel” for High-voltage Alternating Current Induction Motor], (2005), Moscow, Russian Federation, *Silovaia Electronica*, No. 1, pp. 36 – 42.

6. Ivanov A.V., and Fomenko V.V. Eksperimentalnoe isledovanie perehodnih procesov pri puske dvigatelei

v 6,3 MW ot tiristornogo puskovogo ustroistva na Orenburg gzo pererabativemom zavode [Experimental Study of Transients when Starting the Engine of 6.3 MW of Thruster Trigger on the Orenburg Gas Processing Plant], (2008), Moscow, Russian Federation, *Electro*, No. 2, pp. 26 – 33 (In Russian).

7. Gapon D.A., and Bederac I.S. Osobenosti rezima pitauyctie sety vo vremia puska mochnich sinhronih dvigatelei [Special Aspects of Supply During the Smooth Start-up of High-power Synchronous Motors], (2014), Moscow, Russian Federation, *Promichlenaia Energetika*, No. 2, pp. 11 – 18.

8. Ropalo V.N., and Hilov V.S. Sposib pusku dviguna zminogo strumu generatornoi grupi [The Method of Starting the AC Motor of Generator Unit], (2012), Patent 73248 Ukraine – Opubl. 10.09.2012. Bul. No. 17 (In Ukrainian).

9. Volkov I.V., and Isakov V.N. Electroprivodi so stabilizirovanim tokom v silovih cepiah [Electric Drives with Constant Current in Power Circuits], (1991), Moscow, Russian Federation, *Radio i Sviatz*, 216 p. (In Russian)

10. Ilinski N.F. Electroprivodi postosanogo toka s upravliaimim momentum [DC Drives with Controlled Torque], (1981), Moscow, Russian Federation, *Energoizdat*, 144 p. (In Russian).

Хилов

Виктор Сергеевич, д-р техн. наук, проф. каф. метрологии и информационно-измерительных технологий Государственного Нац. горного ун-та. Днепропетровск, пр. К.Маркса, 19, т.(056)3730746. E-mail: khilov53@ukr.net.



Фофанов

Константин Петрович, магистр, инженер 374 отдела, Государственного предприятия Спец. КБ «Южное». Днепропетровск, ул. Криворожская, 3, т.(050)5277065. E-mail: indigo.kf@ukr.net



Носаненко

Евгений Викторович, магистр, ведущий инженер-конструктор 374 отдела Государственного предприятия Спец. КБ «Южное». Днепропетровск, ул. Криворожская, 3, т.(098)1051520. E-mail: Nosanenko78ukr.net

