

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-116-120
УДК 621.314.222.6

М.Ю. Семёнов, Г.Н. Цицикян , П.В. Бобровников
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

УСТРОЙСТВО МЯГКОГО ПУСКА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

Объект и цель научной работы. Устройства мягкого пуска (УМП) предназначены для автономных электро-энергетических систем с целью предотвращения бросков тока, вызванных насыщением магнитопровода силовых трансформаторов и зарядом конденсаторов преобразователей частоты.

Материалы и методы. Дается графическое описание процесса, сопровождаемого бросками тока при включении, и схематехническое решение, на основе которого осуществляется мягкий пуск для трансформаторов главного распределительного устройства (ГРУ).

Основные результаты. Разработаны принципиальные схемы и конструкторская документация УМП, приведен внутренний вид поставочного устройства.

Заключение. Устройство УМП прошло приемо-сдаточные испытания и готово к поставке для дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: устройство мягкого пуска, броски тока, структурная схема.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-116-120
UDC 621.314.222.6

M.U. Semenov, G.N. Tsitsikyan , P.V. Bobrovnikov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

SOFT START DEVICE FOR ELECTRIC PROPULSION SYSTEM

Object and purpose of research. Soft start devices (SSD) are designed for autonomous electric power systems to prevent in-rush currents caused by saturation of magnetic circuit of power transformers and frequency converters capacitors charge.

Materials and methods. A graphical description of the process is given, accompanied by in-rush currents upon switch-on, and a circuit design, on the basis of which a soft start is carried out for transformers of the main switchgear (MSG).

Main results. Schematic diagrams and design documentation of the SSD have been developed, the internal view of the device in as-delivered configuration is given.

Conclusion. The SSD device has passed acceptance tests and is ready for delivery for further operation.

Keywords: soft start device, in-rush currents, structural diagram.

The authors declare no conflicts of interest.

Включение трансформатора в сеть переменного тока может сопровождаться насыщением его магнитопровода, вследствие чего иногда наблюдаются броски намагничивающего тока с переходным процессом, имеющим ряд особенностей по сравнению с включением ненасыщенного трансформатора. Токи

включения силовых трансформаторов могут быть на порядок больше номинального тока и обычно сравнимы с ударным током короткого замыкания (КЗ). При этом возможны ложные срабатывания защиты и нарушения электродинамической устойчивости электрооборудования.

Для цитирования: Семёнов М.Ю., Цицикян Г.Н., Бобровников П.В. Устройство мягкого пуска для системы электродвижения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 3(401): 116–120.

For citations: Semenov M.U., Tsitsikyan G.N., Bobrovnikov P.V. Soft start device for electric propulsion system. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 3(401): 116–120 (in Russian).

В [1] отмечено, что расчеты, связанные с бросками токов включения для однофазных трансформаторов, могут быть использованы и для трехфазных трансформаторов при соединении обмоток в «звезду» или «треугольник». В [2] приведена библиография по броскам тока включения. В [3] отмечено, что повышение напряжения в сети на 10 % выше номинального значения вызывает увеличение тока холостого хода силовых трансформаторов более чем в два раза, что служит индикатором начинающегося насыщения магнитной системы. Вопросы аналогичного характера рассмотрены в работе [4]. Броски тока также характерны для автономных систем, в частности судовой, для которой и было разработано устройство мягкого пуска (УМП).

Внешний вид устройства показан на рис. 1 с контакторами, выключателями, тиристорным регулятором мощности (ТРМ). На рис. 2 изображен фрагмент структурной схемы электродвижения, где отражено место УМП в общей схеме. С помощью УМП через повышающий трансформатор и выпрямители осуществляется заряд емкостей звеньев по-

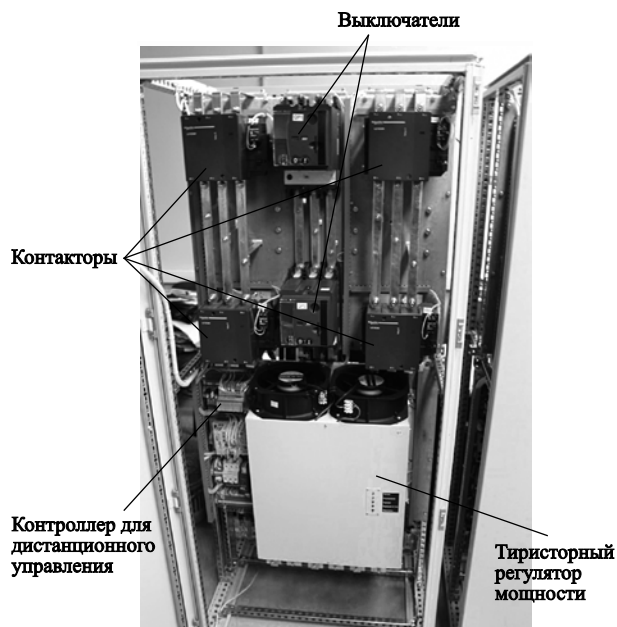
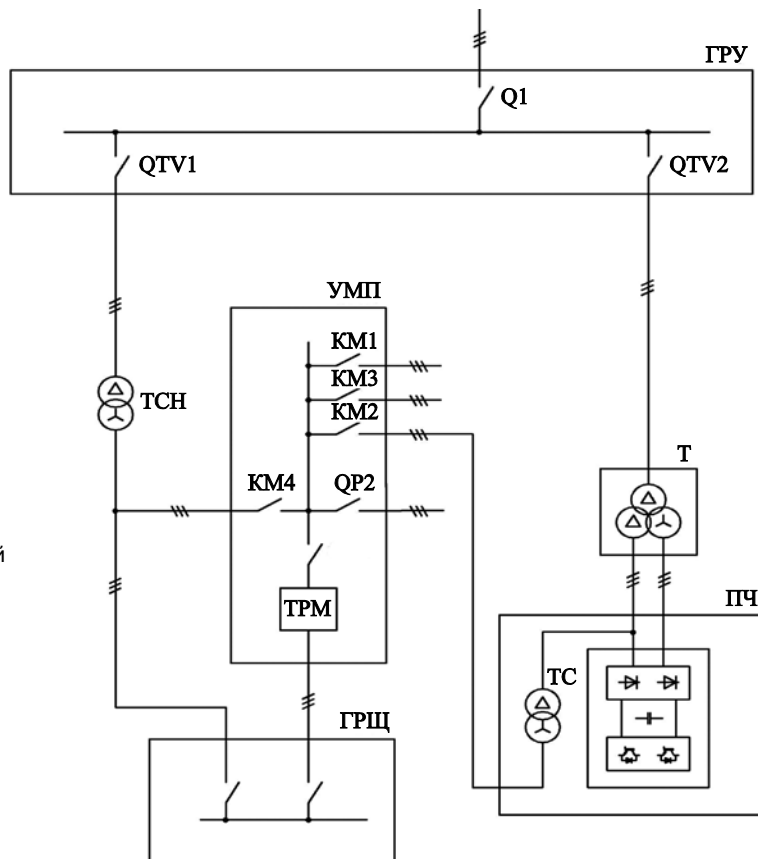


Рис. 1. Внутренний вид устройства мягкого пуска
Fig. 1. Internal view of soft start device

Рис. 2. Фрагмент структурной схемы электродвижения с главным распределительным устройством (ГРУ), трехобмоточным трансформатором (Т) и преобразователем частоты (ПЧ), состоящим из выпрямителей, конденсаторов и инверторов. Здесь ТСН – трансформатор собственных нужд, ГРЩ – главный распределительный щит, QP – автоматические выключатели, KM – контакторы, ТС – согласующий трансформатор

Fig. 2. A fragment of structural diagram of electric propulsion with main switchgear (ГРУ), a three-winding transformer (Т) and a frequency converter (ПЧ) consisting of rectifiers, capacitors and inverters. Here ТСН is an auxiliary normal transformer, ГРЩ is the main switchboard, QP are circuit breakers, KM are contactors, ТС is a matching transformer



стоянного тока для обеспечения работы инверторов преобразователей частоты.

На рис. 2 показан трехобмоточный трансформатор Т с соединениями Δ/Δ и Δ/Y , блок выпрямителей с 12-пульсным выпрямлением, с конденсаторами и инвертором. Блок УМП выполняет две функции: ограничивает броски тока в начальный интервал времени заряда конденсаторов и обеспечивает плавное подмагничивание трансформаторов со стороны вторичных обмоток для исключения бросков тока в первоначальный момент включения трехобмоточного трансформатора к главному расщеплению (ГРУ).

Возникновение бросков тока при намагничивании трансформатора можно показать на примере подключения однофазного трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Запишем напряжение $u(t)$ и поток $\Phi(t)$ в виде $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, а поток Φ – в виде $\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_\Phi)$, где ψ_u и ψ_Φ – начальные фазы для мгновенных значений напряжения и потока при установившемся синусоидальном процессе.

При переходном процессе включения имеем:

$$iR + w \frac{d\Phi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (1)$$

где i – ток в обмотке, равный нулю в момент включения, w – число витков обмотки, R – активное сопротивление, $U_m / \sqrt{2} = U$ – действующее значение напряжения.

Тогда исходное уравнение с учетом того, что $i = w\Phi/L$, где L – индуктивность обмотки, преобразовывается к виду:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{R\omega\Phi(t)}{X_L} = \frac{U_m}{w} \sin(\omega t + \psi_u), \quad (2)$$

где ω – круговая частота.

Для нахождения установившегося потока подставим $\Phi(t)$ в уравнение (2). Тогда можно записать для уравнения (2):

$$\begin{aligned} \omega\Phi_m \cos(\omega t + \psi_\Phi) + \frac{\omega\Phi_m \sin(\omega t + \psi_\Phi)}{\operatorname{tg}\varphi} = \\ = \frac{U_m}{w} \sin(\omega t + \psi_u), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{где } \operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R}.$$

В свою очередь, уравнение (3) нетрудно представить в виде:

$$\begin{aligned} \omega\Phi_m \sin(\omega t + \psi_\Phi + \varphi) &= \frac{U_m}{w} \sin\varphi \sin(\omega t + \psi_u) = \\ &= \omega\Phi_m [\sin\omega t \cos(\psi_\Phi + \varphi) + \cos\omega t \sin(\psi_\Phi + \varphi)] = \\ &= \frac{U_m}{w} \sin\varphi [\sin\omega t \cos\psi_u + \cos\omega t \sin\psi_u]. \end{aligned}$$

Отсюда, приравнявая выражения при $\sin\omega t$ и $\cos\omega t$, найдем:

$$\left. \begin{aligned} \omega\Phi_m \cos(\psi_\Phi + \varphi) &= \frac{U_m}{w} \sin\varphi \cos\psi_u \\ \omega\Phi_m \sin(\psi_\Phi + \varphi) &= \frac{U_m}{w} \sin\varphi \sin\psi_u \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Из системы уравнений (4) вытекает:

$$\omega\Phi_m = \frac{U_m}{w} \sin\varphi, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}(\psi_\Phi + \varphi) = \operatorname{tg}\psi_u. \quad (6)$$

Из (6) находим, что $\psi_\Phi + \varphi = \psi_u + k\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$). Таким образом, для неизвестных Φ_m и ψ_Φ имеем:

$$\Phi_m = \frac{U_m}{w\omega} \sin\varphi, \quad (7)$$

$$\psi_\Phi = \psi_u - \varphi + k\pi. \quad (8)$$

Полагая, что $k = 0$ и учитывая, что φ при $\omega L \gg R$ стремится к $\pi/2$, приходим к выводу: $\psi_\Phi = \psi_u - \pi/2$. Теперь запишем общее выражение для мгновенного значения потока $\Phi(t)$ согласно уравнению (2) в виде:

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) + \Phi_{\text{св}} e^{-\frac{\omega t}{\operatorname{tg}\varphi}}, \quad (9)$$

где $\frac{\omega}{\operatorname{tg}\varphi} = \frac{R}{L}$ является корнем уравнения (2) без правой части.

Учитывая, что в трансформаторе может иметь место остаточный поток $\Phi_{\text{ост}}$ при $t = 0$, получим из уравнения (9)

$$\pm\Phi_{\text{ост}} = \Phi_m \sin(\psi_u - \varphi) + \Phi_{\text{св}}. \quad (10)$$

Отсюда

$$\Phi_{\text{св}} = \pm\Phi_{\text{ост}} - \Phi_m \sin(\psi_u - \varphi). \quad (11)$$

Свободный член уравнения (9) записывается в виде:

$$\Phi_{св}(t) = [\pm\Phi_{ост} - \Phi_m \sin(\psi_u - \varphi)] e^{-\frac{\omega t}{\text{tg}\varphi}}. \quad (12)$$

Окончательное выражение для $\Phi(t)$ имеет вид:

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) + [\pm\Phi_{ост} - \Phi_m \sin(\psi_u - \varphi)] e^{-\frac{\omega t}{\text{tg}\varphi}}. \quad (13)$$

Пусть $\varphi \approx \pi/2$ и начальная фаза напряжения $\psi_u = 0$. Тогда $\Phi(0) = -\Phi_m \pm \Phi_{ост} + \Phi_m = \pm\Phi_{ост}$. График изменения потока $\Phi(t)$ согласно (13) изображен на рис. 3а, причем $\Phi_{ост}$ взято со знаком «+» при самом неблагоприятном условии, когда $\psi_u = 0$, а на рис. 3б построена кривая тока включения. Связь между током включения трансформатора с использованием кривой намагничивания сердечника $B = f(H)$ показана на рис. 3б. В результате получается кривая для тока с выраженным броском тока. Одна из функций УМП как раз и состоит в подмагничивании трансформатора при подключении с целью исключения бросков тока, вызванных насыщением.

В заключение следует отметить, что филиалом «ЦНИИ СЭТ» разработана полная конструкторская документация на УМП. В настоящее время в институте разработаны УМП для судовых электроэнергетических систем различного назначения с целью предотвращения бросков тока, вызванных током заряда конденсаторов в преобразователях частоты и насыщением магнитопровода силовых трансформаторов. Дается описание процесса, связанного с броском тока при включении, и схематическое решение, на основе которого и осуществляется мягкий пуск для трансформаторов главного распределительного устройства. Дается графическое описание для иллюстрации бросков тока при включении трансформатора.

В качестве резюме: приведено описание устройства мягкого пуска, предназначенного для исключения бросков тока трансформаторов и для заряда конденсаторов ПЧ, и графики, иллюстрирующие появление бросков тока.

Список использованной литературы

1. Елагин В.Н., Лурье А.Н., Панибратец А.Н. Броски тока включения трансформаторов // Электротехника. 1997. № 2. С. 29–32.
2. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. Москва : Энергия, 1981. 392 с.

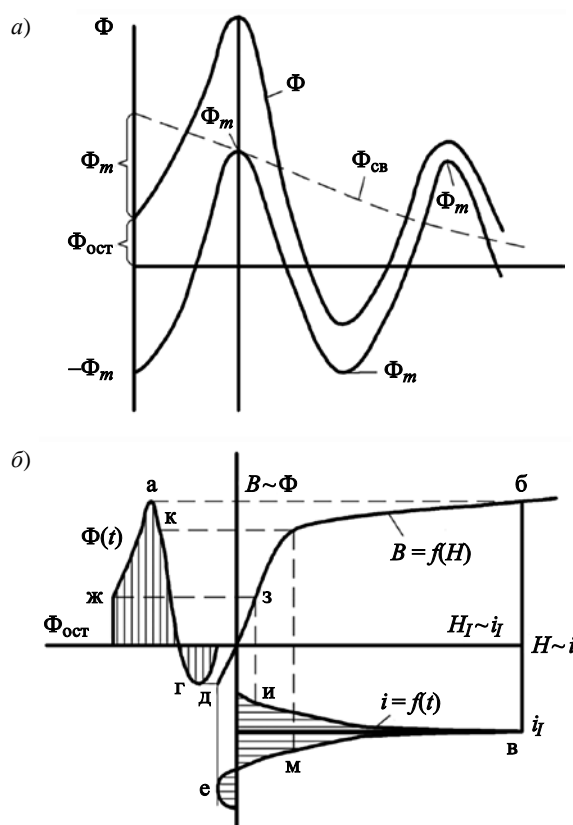


Рис. 3. Графики, иллюстрирующие появление бросков тока при включении трансформатора: а) график изменения потока; б) кривая тока с выраженным броском

Fig. 3. Plots illustrating the appearance of in-rush currents upon transformer switch-on: а) flow change graph; б) current curve with a pronounced inrush

3. Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н. Оценка бросков тока силового трансформатора // Электричество. 2020. № 10. С. 20–32. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-10-20-32.
4. Климаш В.С., Нунатов Р.Р. Способы и устройства для включения силовых трансформаторов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 4. С. 450–456.

References

1. Elagin V.N., Lurie A.N., Panibratets A.N. In-rush currents upon transformers switch-on // Electrical Engineering. 1997. Vol. 2. P. 29–32 (in Russian).
2. Leites L.V. Electromagnetic calculations of transformers and reactors. Moscow : Energiya, 1981. 392 p. (in Russian).
3. Kuvshinov A.A., Vakhnina V.V., Chernenko A.N. Evaluation of in-rush currents of a power transformer // Electricity.

2020. Vol. 10. P. 20–32. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-10-20-32 (in Russian).

4. Klimash V.S., Ninatov R.R. Methods and devices for switching on power transformers // Izvestiya TulSU. Technical sciences. 2020. Vol. 4. P. 450–456 (in Russian).

Сведения об авторах

Семёнов Михаил Юрьевич, ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-42. E-mail: M_Semenov@ksrc.ru.

Цицикян Георгий Николаевич, д.т.н., профессор, начальник сектора – заместитель начальника отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-39. E-mail: George.20021940@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8813-6003>.

Бобровников Пётр Васильевич, ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-42. E-mail: petrdarkrealm@mail.ru.

About the authors

Mikhail Yu. Semenov, Lead Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-42. E-mail: M_Semenov@ksrc.ru.

Georgy N. Tsitsikyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Sector – Deputy Head of Department, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-39. E-mail: George.20021940@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8813-6003>.

Petr V. Bobrovnikov, Lead Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-42. E-mail: petrdarkrealm@mail.ru.

Поступила / Received: 19.05.22

Принята в печать / Accepted: 24.06.22

© Семёнов М.Ю., Цицикян Г.Н., Бобровников П.В., 2022