

Научная статья
УДК 621.314.1
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-80-84>

Разработка модели переходных процессов в трансформаторе при емкостном характере нагрузки

Александр Сергеевич Бордюг

*Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Россия, alexander.bordyug@mail.ru*

Аннотация. Трансформаторы напряжения с емкостной нагрузкой при переходных процессах могут вызывать существенное искажение вторичного напряжения судовой сети. Для анализа используется известная нелинейная модель однофазного двухобмоточного трансформатора, в котором выполняется разбиение магнитного потока на «рабочий» и потоки рассеяния, сцепленные с отдельными обмотками, замыкающиеся вне сердечника. Для практических целей при применении таких трансформаторов важно знать как условия возникновения автопараметрических колебаний, так и динамику переходного процесса. Сравнительную оценку схем емкостного отбора мощности удобно выполнить на ЭВМ, позволяющей воспроизводить нелинейные характеристики и варьировать параметры в широких пределах, что затруднительно при физическом моделировании. Результаты исследования короткого замыкания за реактором в схеме конденсаторного отбора доказали, что короткое замыкание на выводах промежуточного трансформатора не воздействует на элементы верхнего плеча делителя напряжения, но существенно влияет на нижнее плечо делителя и компенсирующий реактор, в итоге появляются субгармоники. Доказано, что для исследования влияния переходных процессов (коротких замыканий) на элементах делителя напряжения удобна разработанная модель. Примененная модель универсальна для судовых электроэнергетических сетей и может быть использована как для емкостного, так и для индуктивного делителя. Смоделирована схема делителя с конкретными параметрами. Математические результаты проверены на физической модели, подтверждена корректность математической модели. Сделан вывод о том, что снижение фазного напряжения способствует уменьшению перенапряжения на элементах делителя при коротком замыкании за компенсирующим реактором схемы отбора мощности.

Ключевые слова: трансформатор, переходные процессы, конденсатор, реактор, перенапряжение, модель

Для цитирования: Бордюг А. С. Разработка модели переходных процессов в трансформаторе при емкостном характере нагрузки // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 80–84. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-80-84>.

Original article

Developing model of transient processes in transformer under capacitive load

Alexander S. Bordyug

*Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, Russia, alexander.bordyug@mail.ru*

Abstract. Voltage transformers with capacitive loading during transients can cause significant distortion of the secondary voltage of the ship's network. For the analysis, a well-known nonlinear model of a single-phase two-winding transformer is used, in which the magnetic flux is divided into “working” and leakage fluxes coupled to individual windings that close outside the core. For practical purposes, when using such transformers, it is important to know both the conditions for the occurrence of autoperometric oscillations and the dynamics of the transient process. It is convenient to carry out a comparative evaluation of capacitive power take-off schemes on a computer, which makes it possible to reproduce non-linear characteristics and vary parameters over a wide range, which is difficult in physical modeling. The results of the study of a short circuit downstream of the reactor in the capacitor selection circuit proved that the short circuit at the terminals of the intermediate transformer does not affect the elements of the upper arm of the voltage divider, but significantly affects the lower arm of the divider and the compensating reactor, as a result, subharmonics appear. It is shown that the developed model is convenient for studying the influence of transient processes (short circuits) on the elements of a voltage divider. The applied model is universal for ship power networks

and can be used for both capacitive and inductive dividers. A divider circuit with specific parameters has been modeled and relevant studies have been carried out. Mathematical results are verified on a physical model, which confirmed the correctness of the mathematical model. It has been inferred that a decrease in the phase voltage leads to a decrease in the overvoltage on the divider elements during a short circuit behind the compensating reactor of the power take-off circuit.

Keywords: transformer, transients, capacitor, reactor, overvoltage, model

For citation: Bordyug A. S. Developing model of transient processes in transformer under capacitive load. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2022;2:80-84.* (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-80-84>.

Введение

Специфической особенностью схемы емкостного отбора мощности является наличие резонансного контура из емкости делителя и нелинейной индуктивности трансформаторного устройства. По этой причине трансформаторы напряжения с емкостной нагрузкой при переходных процессах могут вызывать существенное искажение вторичного напряжения, зависящее от параметров схемы, момента коммутации, вида возмущения, характера и величины вторичной нагрузки. При неблагоприятных соотношениях параметров в схеме трансформатора напряжения с емкостной нагрузкой возможен феррорезонанс [1]. Целью данной рабо-

ты является разработка математической модели трансформатора для снижения фазного напряжения и уменьшения перенапряжения на элементах делителя при коротком замыкании (КЗ) в схеме.

Материалы исследования

Как свидетельствуют экспериментальные исследования емкостного делителя напряжения моделирующей установки (рис. 1), по степени воздействия можно рассматривать два типичных вида возмущений: малое – при включении схемы конденсаторного делителя напряжения под напряжением; большое – при отключении КЗ на выводах промежуточного трансформатора.

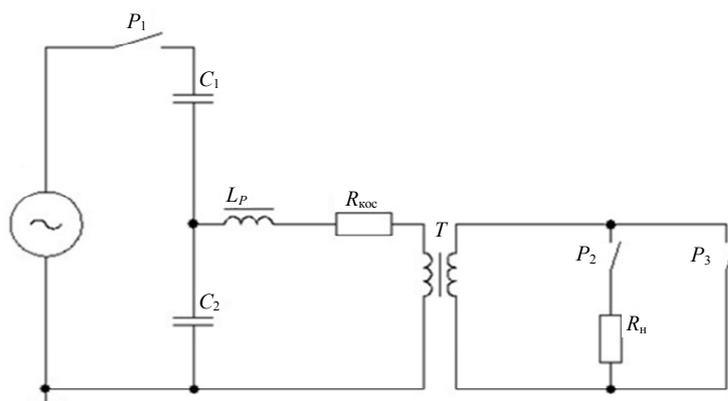


Рис. 1. Моделирующая схема емкостного отбора мощности

Fig. 1. Simulating circuit of capacitive power take-off

Анализ переходного процесса при малых возмущениях необходим для определения величины и длительности искажения вторичного напряжения, а при больших – для предупреждения, прежде всего, устойчивого феррорезонансного режима. Вольт-амперная характеристика реактора (рис. 2) главным образом влияет на начальные условия переходного процесса при больших возмущениях, поскольку величина тока КЗ зависит от степени нелинейности компенсирующей индуктивности.

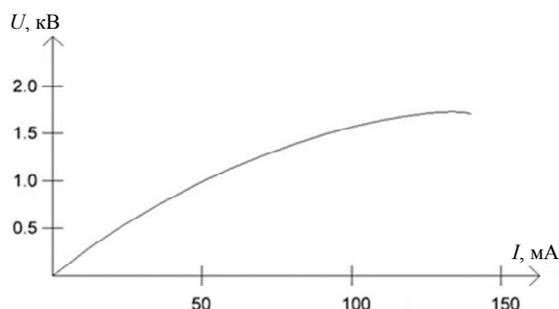


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика компенсирующего реактора

Fig. 2. Volt-ampere characteristic of a compensating reactor

Резонансные свойства на холостом ходу в основном определяются соотношением вольт-амперных характеристик промежуточного трансформатора делителя, поэтому важно отметить правильность выбора схемы замещения трансформатора для исследования переходных процессов.

Результаты исследования

В основу известной нелинейной модели однофазного двухобмоточного трансформатора [2] положено разбиение магнитного потока на «рабочий», общий для обеих обмоток, замыкающийся по стальному сердечнику, и потоки рассеяния, сцепленные с отдельными обмотками, замыкающиеся вне сердечника. Построенная по этой модели Т-образная схема замещения удовлетворительно отражает нормальные нагрузочные режимы и режимы сквозного КЗ, но непригодна для исследова-

ния режимов с неодинаковой нагрузкой отдельных обмоток, например бросков тока намагничивания.

Для удовлетворения требований необходимо использовать П-образную схему замещения трансформатора. При исследовании переходных процессов в схемах с емкостным отбором мощности прежде всего остановимся на трех режимах (см. рис. 1): включение устройства емкостного отбора мощности, при этом замыкается переключатель P_1 , а P_2, P_3 разомкнуты; включение нагрузки, при этом замыкаются переключатели P_1, P_2 , а P_3 разомкнут; КЗ нагрузки, при этом замыкаются переключатели P_1, P_2, P_3 . Для исследований этих режимов разработана математическая модель, которая может быть использована для расчета переходных процессов как в схеме емкостного отбора, так и в индуктивной или подобных схемах (рис. 3) [3–5]:

$$\begin{aligned} U_{\Phi} &= U_{C_1} + U_{C_2} + R_{P_1} i_{C_1} + L_{P_1} \frac{di_{C_1}}{dt}; \\ U_{C_2} - L_P \frac{di_P}{dt} - i_P (R_{\text{нос}} + R_{T_1}) &= W_1 S_c \frac{d}{dt} \left(B_c - \frac{L_k}{W_1^2 S_c} F_k \right); \\ W_2 S_c \frac{dB_c}{dt} - R_{T_2} i_2 - i_n (R_n + R_{T_2}) - L_{P_2} \frac{di_n}{dt} &= 0; \\ C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} &= i_P + C_2 \frac{dU_{C_2}}{dt}; \\ i_P W_1 &= l_n H_n - F_k; \\ i_2 W_2 &= l_c H_c + F_k; \\ B_n &= \frac{S_c}{S_n} B_c - \frac{F_k}{S_n R_{\text{МК}}}; \\ i_2 &= i_n + i_k, \end{aligned}$$

где $U_{\Phi}, U_{C_1}, U_{C_2}$ – напряжения фазного верхнего и нижнего плеча делителя соответственно; $i_{C_1}, i_P, i_2, i_n, i_k$ – токи в верхнем плече, в реакторе, во вторичной обмотке трансформатора, в ветви нагрузки и КЗ; W_1, W_2 – число витков от первичной и вторичной обмоток трансформатора; S_c, S_n – сечение стержня и ярма трансформатора; l_n, l_c – длина стержня и ярма магнитопровода трансформатора; H_c, H_n – напряженности магнитного поля в стержне и ярме магнитопровода трансформатора; $F_k = R_{\text{МК}} \Phi_k$ – магнитодвижущая сила, затрачиваемая на проведение полного потока рассеяния Φ_k через междуобмоточное пространство; $R_{\text{МК}}$ – магнитное сопротивление на потоке Φ_k в междуобмоточном пространстве трансформатора; $R_n, R_{T_1}, R_{T_2}, R_{\text{нос}}, R_{P_{1+3}}$ – активное сопротивление нагрузки, пер-

вичной, вторичной обмоток трансформатора и переключателей P_1, P_2, P_3 ; $C_1, C_2, L_{P_{1+3}}$ – емкости верхнего и нижнего делителя напряжения индуктивности переключателей P_1, P_2, P_3 ; B_c, B_n – индукция в стержне и ярме магнитопровода трансформатора.

Согласно [3] $R_{\text{МК}}$ можно найти из следующего соотношения:

$$R_{\text{МК}} = \frac{W_1^2}{L_{K_1}} = \frac{W_2^2}{L_{K_2}},$$

где L_{K_1}, L_{K_2} – индуктивность КЗ трансформатора, приведенная к числу витков первичной или вторичной обмотки.

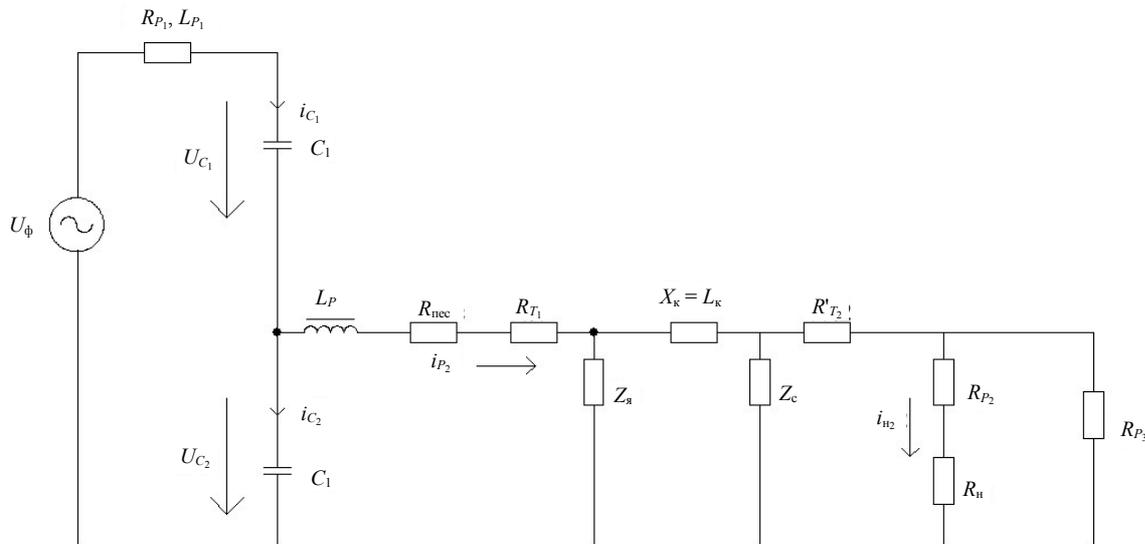


Рис. 3. Расчетная схема емкостного отбора мощности

Fig. 3. Design diagram of capacitive power take-off

Решение ненагруженной схемы емкостного отбора мощности под напряжением доказало, что при «малом» возмущении не вызывается феррорезонанс даже при отсутствии специального демпфирующего устройства [6].

Результаты исследования КЗ за реактором в схеме конденсаторного отбора (таблица) под-

твердили, что КЗ на выводах промежуточного трансформатора не воздействует на элементы верхнего плеча делителя напряжения, но существенно влияет на нижнее плечо делителя и компенсирующий реактор, в итоге появляются субгармоники.

Результаты исследования короткого замыкания за реактором в схеме конденсаторного отбора

Results of studying a short circuit behind the reactor in the capacitor selection circuit

Элементы делителя	Изменение кривой напряжения при КЗ за реактором	Замечания
На верхнем плече C_1 делителя		Не наблюдается изменений в амплитуде, получаются одинаковые кривые при наличии нагрузки или без нее
На нижнем плече C_2 делителя		Наблюдаются скачки напряжения и несинусоидальные, но при наличии нагрузки не превышают 2 % основной гармоники, а без нагрузки появляются также гармоники
На реакторе		Амплитуда почти не изменяется, но при наличии нагрузки возникают другие гармоники, а без нагрузки амплитуда напряжения изменяется и перенапряжение превышает 13 % основной амплитуды, а также появляются другие гармоники

Самый опасный режим для нижнего плеча делителя и реактора – КЗ на выводах трансформатора без нагрузки, где возникают несинусоидальные напряжения, а перенапряжение достигает иногда больше 20 % основной гармоники.

Выводы

1. Для исследования влияния переходных процессов (коротких замыканий) на элементах делителя напряжения удобна разработанная модель. Модель универсальна и может быть использована

как для емкостного, так и для индуктивного делителя. Смоделирована схема делителя с конкретными параметрами, и проведены соответствующие исследования. Математические результаты проверены на физической модели, согласно которой подтверждена корректность математической модели.

2. Снижение фазного напряжения приводит к уменьшению перенапряжения на элементах делителя при КЗ за компенсирующим реактором схемы отбора мощности.

Список источников

1. Доровской В. А., Черный С. Г., Бордюг А. С. Компараторная идентификация частотных характеристик систем автоматического управления судовой энергетической установки // Вестн. Поволж. гос. технолог. ун-та. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2020. № 1 (45). С. 47–57.

2. Бордюг А. С. Применение технологии распределенного оптического контроля в судовых электроэнергетических системах // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 75–81.

3. Сметюх Н. П., Черный С. Г., Ениватов В. В., Бордюг А. С. Скалярное многофакторное оценивание диагностических характеристик судовых энергетических систем // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2019. № 12 (557). С. 15–19.

4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1978. 523 с.

5. Шумилов Р. Н., Толстова Ю. И., Бояршинова А. Н. Электрические машины. СПб.: Лань, 2016. 352 с.

6. Москаленко В. В., Кацман М. М. Электрические машины и приводы. М.: Academia, 2017. 24 с.

References

1. Dorovskoi V. A., Chernyi S. G., Bordiug A. S. Komparatornaia identifikatsiia chastotnykh kharakteristik sistem avtomaticheskogo upravleniia sudovoi energeticheskoi ustanovki [Comparator identification of frequency characteristics of automatic control systems of ship power plant]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2020, no. 1 (45), pp. 47-57.

2. Bordiug A. S. Primenenie tekhnologii raspredelenogo opticheskogo kontrolya v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh [Application of distributed optical control technology in ship electric power systems]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2021, no. 2, pp. 75-81.

3. Smetiukh N. P., Chernyi S. G., Enivatov V. V., Bor-

diug A. S. Skaliarnoe mnogofaktornoe otsenivanie diagnosticheskikh kharakteristik sudovykh energeticheskikh sistem [Scalar multifactorial estimation of diagnostic characteristics of ship power systems]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v nefyanoi promyshlennosti*, 2019, no. 12 (557), pp. 15-19.

4. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 523 p.

5. Shumilov R. N., Tolstova Yu. I., Boiarshinova A. N. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2016. 352 p.

6. Moskalenko V. V., Katsman M. M. *Elektricheskie mashiny i privody* [Electric machines and drives]. Moscow. Academia Publ., 2017. 24 p.

Статья поступила в редакцию 29.03.2022; одобрена после рецензирования 19.04.2022; принята к публикации 22.04.2022
The article was submitted 29.03.2022; approved after reviewing 19.04.2022; accepted for publication 22.04.2022

Информация об авторе / Information about the author

Александр Сергеевич Бордюг – кандидат технических наук; доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; alexander.bordyug@mail.ru

Alexander S. Bordyug – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Ship Power Supply and Automation; Kerch State Maritime Technological University; alexander.bordyug@mail.ru

