

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

**Михаил Валерьевич Двойненко**

АО «РАДИУС Автоматика»; ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», инженер; аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: dmv@rza.ru

**Владимир Александрович Шуин**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: rza@rza.ispu.ru

### Исследование на имитационной модели параметров режима самозапуска электродвигателей комплексной нагрузки, учитываемых при выборе уставок релейной защиты линий высокого напряжения

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** При выборе уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП высокого напряжения должны учитываться параметры режима самозапуска электродвигателей нагрузки, характеризующиеся коэффициентом увеличения тока в защищаемой линии  $K_{зап}$  и углом  $\varphi_{зап}$  полного сопротивления нагрузки. В существующих методиках выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП, как правило, приводятся только ориентировочные значения коэффициента  $K_{зап}$ , а угол  $\varphi_{зап}$  часто принимается равным углу сопротивления на «зажимах» защиты в максимальном рабочем режиме  $\varphi_{раб}$  без учета самозапуска электродвигателей потребителей. Погрешности, обусловленные неточностью определения параметров  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$ , могут быть причиной снижения селективности и чувствительности резервных ступеней дистанционных защит, т.е. эффективности дальнего резервирования. Для уточнения существующих методик выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит актуальной задачей является исследование зависимостей параметров режима самозапуска  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  от доли и типа двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки.

**Материалы и методы.** Для исследования зависимостей параметров режима самозапуска  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  от доли и состава двигательной нагрузки в комплексной нагрузке использован программный комплекс MATLAB с входящим в него пакетом SimPowerSystems, предназначенным для моделирования электротехнических устройств и систем. Модель исследуемого объекта включает источник питания напряжением 110(220) кВ, ЛЭП 110(220) кВ с понижающим трансформатором 110(220)/6(10) кВ в конце линии, участок сети 6(10) кВ с кабельными линиями для питания группы высоковольтных асинхронных электродвигателей и понижающим трансформатором 6(10)/0,4 кВ для питания группы низковольтных асинхронных электродвигателей. Параметрирование модели произведено с учетом реальных характеристик ее элементов и методик расчета параметров схем замещения.

**Результаты.** Предложен подход к приближенному расчету параметров самозапуска на основе данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки с делением нагрузки на три категории: высоковольтные асинхронные электродвигатели, низковольтные асинхронные электродвигатели и статическая нагрузка. Показано, что основными факторами, влияющими на параметры режима самозапуска  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  на ЛЭП 110–220 кВ, являются доли высоковольтных асинхронных электродвигателей  $K_{Адв}$ , низковольтных асинхронных электродвигателей  $K_{Адн}$  и их соотношение в составе комплексной нагрузки. Получены зависимости параметров режима самозапуска  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  от доли двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки, а также зависимость  $\varphi_{зап} = f(K_{зап})$ .

**Выводы.** Полученные зависимости  $K_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}}, K_{\text{АДН}})$ ,  $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}}, K_{\text{АДН}})$  и  $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{зап}})$  могут быть использованы для уточнения методик расчета уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП 110–220 кВ, что повысит эффективность дальнего резервирования в электрических сетях высокого напряжения.

**Ключевые слова:** ЛЭП высокого напряжения, релейная защита, дальнее резервирование, дистанционная защита, комплексная нагрузка, режим самозапуска, электродвигатель

**Mikhail Valeryevich Dvoynenkov**

JSC “RADIUS Avtomatika”, Engineer, Ivanovo State Power Engineering University, Post Graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dmvmv@rza.ru

**Vladimir Alexandrovich Shuin**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: rza@rza.ispu.ru

## Study of self-starting mode parameters of complex load electric motors on a simulation model taken into account when selecting relay protection settings of high-voltage transmission lines

### Abstract

**Background.** When selecting the settings for the backup stages of distance protection of the electric power transmission lines, we should consider the parameters of the self-starting mode of load electric motors, characterized by the  $K_{str}$  coefficient of current increase in the protected line and the  $\varphi_{str}$  angle of the load impedance. The available methods for selecting the settings of the backup stages of the line distance protection, as a rule, consider only the approximate values of the  $K_{str}$  coefficient. The  $\varphi_{str}$  angle is often assumed to be equal to the  $\varphi_{oper}$  angle of impedance at the “terminals” of protection in the maximum operating mode without considering the self-starting of the load motors. Errors caused by the inaccuracy of determining the parameters  $K_{str}$  and  $\varphi_{str}$  may be the reason for a decrease in the selectivity and sensitivity of the backup stages of the line distance protection, i.e. the effectiveness of remote backup. To clarify the available methods for selecting the settings of the line distance protection, an urgent task is to study the dependencies of the parameters of the self-starting mode  $K_{str}$  and  $\varphi_{str}$  on the proportion and type of motor load as a part of the complex load.

**Materials and methods.** To study the dependencies of the parameters  $K_{str}$  and  $\varphi_{str}$  of the self-starting mode on the proportion and composition of the motor load in the complex load the MATLAB software package is used with the SimPowerSystems package, designed for modeling electrical devices and systems. The model of the object under study includes a 110(220) kV power supply, a 110(220) kV line with a 110(220)/6(10) kV step-down transformer at the end of the line, a 6(10) kV network section with cable lines for supplying a group of high-voltage asynchronous electric motors (AMHV) and a 6(10) kV step-down transformer 6(10)/0,4 kV for supplying a group of low voltage asynchronous electric motors (AMLV). The parameterization of the model has been carried out considering the real characteristics of its elements and methods for calculating the parameters of equivalent circuits.

**Results.** The authors have proposed an approach to approximate calculation of self-starting parameters based on data about the typical consumers of a complex load node with load division into three categories: AMHV, AMLV and static load. It is shown that the main factors influencing the parameters  $K_{str}$  and  $\varphi_{str}$  of the self-starting mode on 110–220 kV transmission lines are the proportions of AMHV  $K_{AMHV}$ , AMLV  $K_{AMLV}$  and their ratio in the complex load. The dependences of the parameters  $K_{str}$  and  $\varphi_{str}$  of the self-starting mode on the proportion of the motor load in the complex load, as well as the dependence  $\varphi_{str} = f(K_{str})$ , are obtained.

**Conclusions.** The obtained dependences  $K_{str} = f(K_{AMHV}, K_{AMLV})$ ,  $\varphi_{str} = f(K_{AMHV}, K_{AMLV})$  and  $\varphi_{str} = f(K_{str})$  can be used to clarify the methods to calculate the settings of backup stages of 110–220 kV line distance protection. It will increase the efficiency of remote backup in high-voltage electric networks.

**Key words:** high-voltage power transmission lines, relay protection, remote backup, distance protection, complex load, self-starting mode, electric motor

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.028-038

**Введение.** Дистанционные защиты (ДЗ) со ступенчато-зависимыми характеристиками времени срабатывания получили широкое применение в качестве защит дальнего резервирования (ДР) при междуфазных коротких замыканиях (КЗ) на ЛЭП напряжением 110–220 кВ с двусторонним и односторонним питанием [1, 2]. Одним из основных факторов, ограничивающих селективность несрабатываний в нагрузочных режи-

мах без КЗ и чувствительность при внутренних КЗ резервных ступеней ДЗ (т.е. и эффективность ДР), являются режимы, связанные с самозапуском электродвигателей (ЭД) в составе комплексной нагрузки.

Режимы самозапуска ЭД сопровождаются значительным увеличением модулей и аргументов тока в защищаемой линии по сравнению с нормальными нагрузочными режимами,

что приводит к утяжелению условий выбора параметров срабатывания резервных защит ЛЭП. Характер протекания режима самозапуска зависит от длительности перерыва питания, типа двигательной нагрузки (высоковольтные асинхронные, низковольтные асинхронные, синхронные ЭД), доли двигательной нагрузки того или иного типа в составе комплексной нагрузки [3, 4]. Основными параметрами, характеризующими режимы самозапуска ЭД, при выборе уставок резервных ступеней ДЗ являются:

– коэффициент, учитывающий увеличение тока при самозапуске ЭД (коэффициент самозапуска):

$$K_{\text{зап}} = \frac{I_{\text{зап. макс}}}{I_{\text{раб. макс}}}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{зап. макс}}$  – максимальный ток в режиме самозапуска ЭД;  $I_{\text{раб. макс}}$  – максимальный рабочий ток в защищаемой линии;

– расчетное минимальное сопротивление на «зажимах» ДЗ в режиме самозапуска ЭД:

$$Z_{\text{зап}} = \frac{U_{\text{мин}}}{\sqrt{3} I_{\text{зап. макс}}} \approx \frac{(0,8 - 0,9) U_{\text{раб. мин}}}{\sqrt{3} K_{\text{зап}} I_{\text{раб. макс}}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{мин}}$  – минимальное значение первичного напряжения в месте установки защиты в условиях самозапуска ЭД;  $U_{\text{раб. мин}}$  – минимальное рабочее напряжение на шинах источника питания;

– угол расчетного сопротивления на «зажимах» ДЗ в режиме самозапуска ЭД:

$$\varphi_{\text{зап}} = \arg(Z_{\text{зап}}). \quad (3)$$

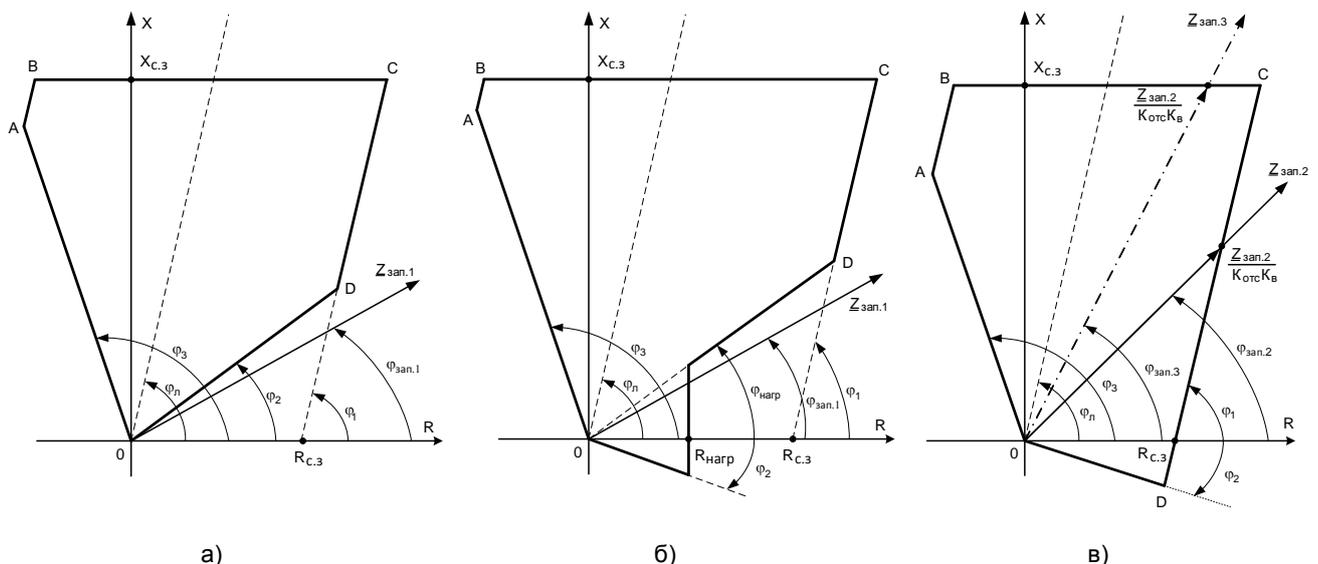


Рис. 1. Формы характеристик срабатывания и способы отстройки от режимов самозапуска ЭД резервных ступеней ДЗ ЛЭП 110–220 кВ:  $X_{с.з}$ ,  $R_{с.з}$ ,  $R_{нагр}$ ,  $\varphi_1$ – $\varphi_3$ ,  $\varphi_{нагр}$  – параметры настройки характеристик срабатывания (уставки);  $\varphi_{л}$  – угол сопротивления защищаемой линии;  $Z_{\text{зап}}$  – сопротивление на «зажимах» защиты в режиме самозапуска ЭД;  $\varphi_{\text{зап}}$  – угол сопротивления  $Z_{\text{зап}}$ ; а – отстройка по углу наклона правой нижней стороны OD характеристики срабатывания (выбором уставки  $\varphi_2 > \varphi_{\text{зап.1}}$ ); б – отстройка с применением «выреза» активной нагрузки (выбором уставок  $R_{нагр}$  и  $\varphi_{нагр} > \varphi_{\text{зап.1}}$ ); в – отстройка с применением правой боковой стороны CD характеристики срабатывания (выбором уставок  $R_{с.з}$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ) или верхней стороны BC характеристики срабатывания (выбором уставки  $X_{с.з}$ )

Наиболее эффективное решение в части повышения отстроенности от режимов самозапуска ЭД и чувствительности резервных защит при внутренних КЗ в зоне ДР обеспечивается применением современных микропроцессорных исполнений ДЗ с полигональными характеристиками срабатывания.

На рис. 1 в качестве примера приведены формы полигональных характеристик срабатывания резервных ступеней ДЗ НПП «ЭКРА», применяемых в шкафах релейной защиты и автоматики (РЗА) серии ШЭ2607 для ЛЭП 110–220 кВ, и реализуемые при их использовании способы отстройки от режимов самозапуска ЭД.

Отстройка от режимов самозапуска ЭД по углу наклона стороны OD  $\varphi_2 > \varphi_{\text{зап.1}}$  для характеристики срабатывания по рис. 1,а или  $\varphi_{нагр} > \varphi_{\text{зап.1}}$  для характеристики по рис. 1,б может применяться при небольшой доле двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки и, соответственно, небольших значениях угла  $\varphi_{\text{зап.1}} < \sim 45^\circ$ . Преимуществом этих характеристик срабатывания (рис. 1,а и 1,б) является возможность обеспечения высокой чувствительности при КЗ в зоне ДР через переходное сопротивление. Характеристика срабатывания с применением «выреза» активной нагрузки  $R_{нагр}$  (рис. 1,б) обеспечивает также фиксацию близких к месту установки защиты КЗ через переходное сопротивление. Характеристика срабатывания на рис. 1,в и реализуемые при ее применении способы отстройки от режимов самозапуска ЭД применяются при больших значениях угла  $\varphi_{\text{зап.2(3)}}$ , превышающих  $45^\circ$ .

Отстройка от замеров ДЗ в режимах самозапуска ЭД, характеризуемых значениями угла  $\varphi_{\text{зап.2}} > \sim 45^\circ$ , когда вектор  $\underline{Z}_{\text{зап.2}}$  пересекает правую боковую сторону CD характеристики срабатывания, обеспечивается соответствующим выбором уставки  $R_{\text{с.з}}$  и угла наклона правой боковой стороны  $\varphi_1$ . При больших значениях угла  $\varphi_{\text{зап.3}}$  в режимах самозапуска со значительным перетоком реактивной мощности по защищаемой ЛЭП, когда вектор  $\underline{Z}_{\text{зап.3}}$  пересекает верхнюю границу ВС характеристики срабатывания, несрабатывание резервной ступени ДЗ обеспечивается выбором уставки  $X_{\text{с.з}}$ .

Для выбора параметров настройки полигональной характеристики срабатывания резервных ступеней ДЗ (рис. 1) должны быть определены значения  $K_{\text{зап}}$  и  $\varphi_{\text{зап}}$  в расчетном наиболее тяжелом режиме самозапуска двигательной нагрузки (минимальное значение первичного сопротивления в месте установки защиты  $Z_{\text{зап}}$  при известном значении  $K_{\text{зап}}$  определяется по (2)).

В существующих методиках выбора уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП, как правило, приводятся только ориентировочные значения коэффициента  $K_{\text{зап}}$ , а угол  $\varphi_{\text{зап}}$  часто принимается равным углу сопротивления на «зажимах» защиты в максимальном рабочем режиме  $\varphi_{\text{раб}} = 25\text{--}35^\circ$  без учета самозапуска ЭД.

Например, в широко применяемых методиках [5, 6] указано, что  $K_{\text{зап}}$  ориентировочно принимается равным 1,5–2,0 (при определенных условиях в некоторых методиках  $K_{\text{зап}}$  может быть увеличен до 2,5 или уменьшен до 1,2–1,3) и должен уточняться расчетами для конкретных условий, что не всегда возможно на стадии разработки проектной документации. Погрешности, обусловленные неточностью определения параметров  $K_{\text{зап}}$  и  $\varphi_{\text{зап}}$ , могут быть причиной уменьшения эффективности ДР.

При отсутствии специальных расчетных программ практически невозможно для каждой ЛЭП определить точно параметры режима самозапуска  $K_{\text{зап}}$  и  $\varphi_{\text{зап}}$ , так как их значения, как уже отмечалось выше, зависят от многих факторов (состава и режимов работы комплексной нагрузки питаемых по защищаемой линии подстанций; доли и состава двигательной нагрузки; длительности и степени снижения напряжения при перерыве питания и др.). В связи с этим при расчетах указанных параметров в целях выбора уставок РЗА, как правило, применяются упрощенные методы, основанные на использовании ряда допущений. Наиболее широкое применение получил метод приближенного расчета параметров режима самозапуска ЭД, предложенный в [7] и подробно описанный (с примерами расчетов) в работах М.А. Шабада [8, 9], основанный на использовании следующих допущений:

1) все двигатели, участвующие в самозапуске, к моменту восстановления напряжения питания на выводах ЭД практически полностью

заторможены (что справедливо при перерыве питания на несколько секунд);

2) подключенная комплексная нагрузка разделяется на три условные категории:

– бытовая нагрузка, имеющая в своем составе незначительную долю асинхронных двигателей низкого напряжения менее 1 кВ (АДН), коэффициент самозапуска для которой, по опытным данным, принимается равным  $K_{\text{зап}} \approx 1,2\text{--}1,3$ ;

– обобщенная нагрузка (комплексная, как правило промышленная), имеющая в своем составе значительную долю (более 50 %) АДН, учитываемая в расчетах обобщенным сопротивлением  $X_{\text{нагр}} = 0,35$  ( $K_{\text{зап}} \approx 2,9$ );

– асинхронные двигатели высокого напряжения 3–10 кВ (АДВ), учитываемые параметрами обобщенного (эквивалентного) двигателя, определенными по индивидуальным параметрам всех АДВ;

3) все АДН в составе бытовой и обобщенной промышленной нагрузки остаются подключенными к сети при перерывах питания и вместе с АДВ участвуют в самозапуске.

В то же время известно, что самозапуск низковольтных двигателей большинства механизмов промышленных предприятий недопустим по условиям безопасности обслуживающего персонала, из-за опасности поломки механизма или брака продукции и других причин, поэтому при значительном снижении напряжения в сети или его исчезновении АДН, как правило, должны автоматически отключаться [4]. Для этого значительная часть АДН включается через магнитные пускатели, контакторы или автоматические выключатели с расцепителями минимального напряжения и поэтому не принимает участие в самозапуске двигательной нагрузки. В тех случаях, когда допустимо и целесообразно участие АДН в самозапуске, применяются автоматическое повторное включение низковольтных ЭД, ввод задержки по времени, сохраняющей контактор включенным, или автоматические выключатели с сохранением включенного положения в режиме самозапуска.

С учетом изложенного выше можно сделать вывод, что возможности применения традиционного подхода для определения параметров режима самозапуска ЭД [7–9] при расчетах уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП 110–220 кВ ограничены его следующими недостатками:

– метод ориентирован в основном на расчеты  $K_{\text{зап}}$ , что приемлемо только при выборе уставок максимальных токовых защит (МТЗ);

– при проектировании не всегда доступны исходные данные по точному составу комплексной нагрузки питаемых по защищаемой ЛЭП промежуточных и ответвительных подстанций, обеспечивающие возможность ее разделения на указанные выше три условные категории;

– не учитывается действительная доля АДН, принимающих участие в самозапуске ЭД;

– не учитывается влияние длительности перерыва питания ЭД на параметры режима самозапуска;

– расчет самозапуска ЭД выполняется по упрощенной, чисто реактивной схеме замещения, что не позволяет определить угол  $\varphi_{\text{зап}}$ .

Отметим также, что в некоторых случаях при расчетах самозапуска ЭД применяются и более простые методы, не учитывающие влияния АДН [4]. Такой подход позволяет разделить комплексную нагрузку на две условные категории: АДВ и статическую нагрузку, сопротивление которой при самозапуске остается практически неизменным, что существенно упрощает методику приближенных расчетов параметров  $K_{\text{зап}}$  и  $\varphi_{\text{зап}}$  режима самозапуска двигательной нагрузки. В [2] с использованием данного подхода и исходных данных о соотношении долей АДВ и статической нагрузки получены достаточно простые аналитические выражения для расчета  $K_{\text{зап}}$  и  $\varphi_{\text{зап}}$ . Основные недостатки данного метода заключаются в невозможности учета при необходимости влияния на параметры режима самозапуска наличия АДН, длительности перерыва питания ЭД и параметров элементов (линий, трансформаторов) схемы электроснабжения двигательной нагрузки.

Таким образом, рассмотренные упрощенные методы учитывают ограниченное число факторов, влияющих на параметры режима самозапуска, и не во всех случаях могут обеспечить приемлемую точность расчетов  $K_{\text{зап}}$  и  $\varphi_{\text{зап}}$ , используемых при расчетах уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП высокого напряжения.

**Метод приближенного расчета параметров  $K_{\text{зап}}$  и  $\varphi_{\text{зап}}$  на основе данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки.** При отсутствии достоверных данных об относительном составе потребителей узла комплексной нагрузки в [10] рекомендуется использовать типовой состав нагрузки отдельных отраслей народного хозяйства, выраженный в процентах от суммарной установленной мощности в рассматриваемом узле. При использовании в расчетах самозапуска ЭД данных о типовом составе комплексной нагрузки достаточно знать, к какой отрасли (отраслям) относятся потребители питаемых по защищаемой ЛЭП промежуточных и ответвительных подстанций и их суммарную установленную мощность.

При выполнении расчетов самозапуска ЭД на основе данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки последнюю целесообразно разделить на три следующие условные категории:

1) АДВ, учитываемые параметрами обобщенного двигателя, определенными по индивидуальным параметрам всех участвующих в самозапуске ЭД напряжением 3–10 кВ;

2) АДН, учитываемые параметрами обобщенного двигателя напряжением менее 1 кВ;

3) статическая нагрузка (электрическое освещение, электротермические установки, преобразователи и прочая нагрузка).

Предложенный подход позволяет:

– обеспечить приближенный расчет параметров режима самозапуска ЭД при отсутствии достоверных данных по составу потребителей комплексной нагрузки;

– повысить точность расчетов параметров режима самозапуска ЭД при наличии данных о реальном составе потребителей комплексной нагрузки;

– учитывать большее число факторов, влияющих на самозапуск ЭД, обеспечивая повышение точности расчетов.

Целью настоящего исследования является разработка на основе предложенного подхода методики и расчетной модели для определения параметров режима самозапуска ЭД  $K_{\text{зап}}$  и  $\varphi_{\text{зап}}$ , анализ их зависимости от доли высоковольтных  $K_{\text{АДВ}}$  и низковольтных  $K_{\text{АДН}}$  двигателей в составе комплексной нагрузки ( $K_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}}, K_{\text{АДН}})$ ,  $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{АДВ}}, K_{\text{АДН}})$ ), а также построение зависимостей  $\varphi_{\text{зап}} = f(K_{\text{зап}})$  для проверки обоснованности и при необходимости уточнения существующих рекомендаций по их выбору при расчетах уставок срабатывания резервных ступеней ДЗ ЛЭП 110–220 кВ.

**Материалы и методы.** Повышение точности расчетов параметров режима самозапуска ЭД возможно только за счет усложнения расчетной модели защищаемого объекта и применения соответствующих методов расчета. Наиболее доступным методом, не требующим создания специальных расчетных программ, является имитационное моделирование. Для реализации предложенного метода расчета самозапуска ЭД использованы получившие широкое применение для моделирования электротехнических устройств и систем библиотека блоков SimPowerSystems и среда моделирования Simulink программного комплекса MATLAB. С помощью данных средств смоделирован участок электрической сети, содержащий ЛЭП 110–220 кВ и понизительную подстанцию с низшим напряжением 6–10 кВ, в состав комплексной нагрузки которой входят АДВ, АДН и статическая нагрузка.

**Схема участка электрической сети для исследования режима самозапуска двигательной нагрузки, ее параметрирование и условия для моделирования.** Схема моделируемого участка сети приведена на рис. 2. Участок сети состоит: из источника питания напряжением 110 кВ; ЛЭП с односторонним питанием и понижающим трансформатором с низшим напряжением 6 кВ; статической нагрузки на напряжении 6 кВ (центр питания); участка сети 6 кВ с кабельными линиями для питания группы АДВ, а также участка сети с кабельными линиями 6 кВ и понижающим трансформатором с низшим напряжением 0,4 кВ для питания группы АДН.

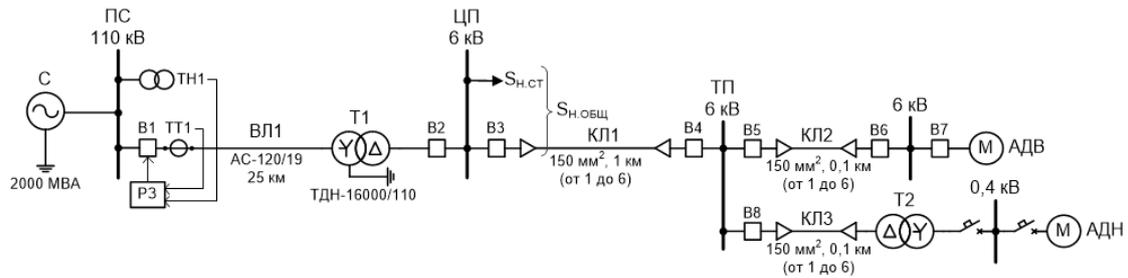


Рис. 2. Схема участка сети для исследования параметров  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  ЭД нагрузки

Данная схема может использоваться и при расчете параметров режима самозапуска на линиях с двусторонним питанием, так как при этом расчетным режимом, как правило, является режим одностороннего питания, возникающий после аварии или при ремонте [6].

Анализ схемы на рис. 2 показывает, что комплексная нагрузка разделена на три группы: статическая; высоковольтные асинхронные двигатели; низковольтные асинхронные электродвигатели.

Для исследуемой сети параметрирование производится следующим образом:

- для источника питания в MATLAB задаются междуфазное напряжение и полная мощность;

- параметры воздушных и кабельных ЛЭП, силовых трансформаторов рассчитываются согласно [10, 12];

- коэффициент загрузки понижающих трансформаторов принимается равным 0,7;

- высоковольтная двигательная нагрузка представляется в виде обобщенного асинхронного электродвигателя 6 кВ с параметрами согласно [11]. При наличии данных о типах АДВ в составе нагрузки для определения параметров обобщенного ЭД используются расчетные формулы согласно [8, 9]. Номинальный момент сопротивления приводимого в движение механизма принимается равным 1 о.е.;

- низковольтная двигательная нагрузка представляется в виде асинхронного электродвигателя 0,4 кВ с сопротивлением обобщенной нагрузки  $x_{нагр} = 0,35$  о.е [8, 9]. Коэффициент пуска  $K_{пуск} \approx 1/x_{нагр} = 1/0,35 \approx 2,9$ . Номинальный момент сопротивления приводимого в движение механизма принимается равным 0,7 о.е.;

- момент сопротивления АДВ и АДН изменяется пропорционально квадрату скорости вращения электродвигателя (механизмы вентиляторного типа, насосы, т.е. большинство используемых механизмов), согласно формуле, приведенной в [3] (используется также в методике расчета самозапуска, составленной фирмой ОРГРЭС):

$$M_c = M_{c.нач} + (M_{c.ном} - M_{c.нач}) (\eta_{тек} / \eta_{ном})^2, \quad (4)$$

где  $M_{c.нач}$  – начальный момент сопротивления вращающегося механизма (без учета  $M_{трения\_покоя}$ ), о.е.;  $M_{c.ном}$  – номинальный момент

сопротивления механизма, о.е.;  $\eta_{ном}$  – номинальная скорость вращения ЭД, при которой момент сопротивления равен номинальному, об/мин;  $\eta_{тек}$  – текущая скорость вращения ЭД, об/мин.

Параметрирование модели производилось с учетом реальных характеристик ее элементов, приведенных в справочных данных, а также с учетом методик расчета параметров схем замещения, при этом учитывались особенности стандартных блоков MATLAB [10, 12].

Для исследуемой сети принимаются следующие условия моделирования самозапуска, полностью учитываемые при построении модели:

- все электродвигатели групп АДВ и АДН участвуют в самозапуске;

- в процессе исследования состав комплексной нагрузки варьируется изменением долей статической нагрузки и двигательной нагрузки АДВ и АДН (для учета влияния на параметры режима самозапуска  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  только группы АДВ соответственно отключается группа АДН, и наоборот);

- напряжение, ток и угол между ними измеряются в месте установки защиты – РЗ (рис. 2), также измеряются токи статора, скорость вращения ротора и вращающий электромагнитный момент как для АДВ, так и для АДН;

- самозапуск асинхронных электродвигателей производится при неподвижном состоянии роторов из-за длительного перерыва питания, при этом параметры режима самозапуска  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  достигают максимальных значений;

- при исследовании влияния АДВ на  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  рассматриваются также режимы с разными временами перерыва питания, в которых самозапуск осуществляется, когда двигатели еще не успели полностью затормозиться.

Достоверность имитационной модели подтверждалась сравнением полученных на ее основе результатов расчетов параметров режима самозапуска электродвигателей с результатами расчетов, выполненных другими методами, приведенными в [2, 8].

**Анализ влияния АДВ на параметры  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$ .** Рассмотрим влияние доли высоковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки на коэффициент самозапуска и угол самозапуска.

Согласно [10], доля АДВ в составе комплексной нагрузки потребителей различных отраслей народного хозяйства обычно составляет от 5–8 % до 15–20 %. Для отдельных отраслей промышленности доля АДВ может возрастать до 50 % и более, например в нефтедобывающей и газодобывающей отраслях.

Для построения зависимостей  $K_{зап} = f(K_{АДВ})$  и  $\varphi_{зап} = f(K_{АДВ})$  необходимо изменять долю АДВ в составе комплексной нагрузки от 0 до 80 % с шагом 5 %. При этом в каждом опыте снимаются временные осциллограммы тока в месте установки защиты, коэффициента самозапуска и угла самозапуска, токов статора, скорости вращения ротора и вращающего электромагнитного момента АДВ.

Как сказано выше, дополнительно при исследовании влияния АДВ на  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  рассматриваются режимы с разными временами перерыва питания. При этом самозапуск АДВ осуществляется при полной остановке двигателей, а также когда они еще не успели полностью затормозиться.

На рис. 3 показаны зависимости коэффициента самозапуска от доли высоковольтных асинхронных ЭД в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания.

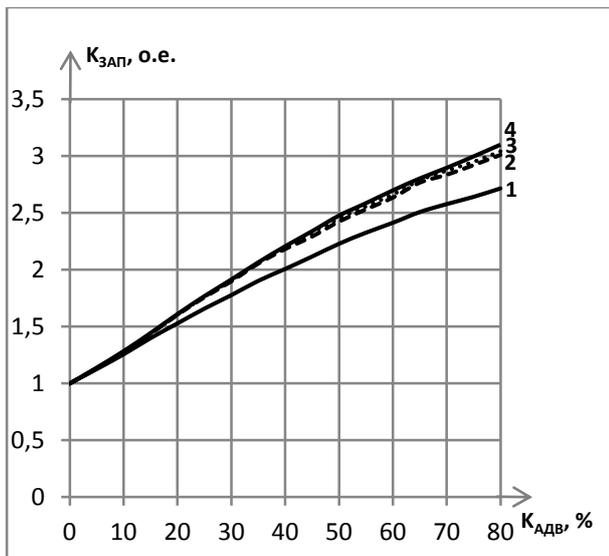


Рис. 3. Зависимость коэффициента самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания: 1 (сплошная линия) – перерыв питания с  $t_{пер} = 0,5$  с; 2 (пунктир, линия) – перерыв питания с  $t_{пер} = 1,5$  с; 3 (пунктир, точка) – перерыв питания с  $t_{пер} = 2,5$  с; 4 – длительный перерыв питания с полной остановкой АДВ

Анализ полученных зависимостей (рис. 3) показывает, что при обычной доле АДВ, равной 5–20 %, коэффициент самозапуска достигает значений 1,3–1,7, что примерно соответствует рекомендациям существующих методик. При доле АДВ более 30 % величина  $K_{зап}$  при разных временах перерыва питания уже может не

укладываться в стандартный рекомендованный диапазон 1,5–2,0 и с ростом доли АДВ достигать значений 2,5 и более.

На рис. 4 показана зависимость угла самозапуска от доли высоковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания.

Анализ полученных зависимостей (рис. 4) показывает, что угол самозапуска уже при обычной доле двигательной нагрузки высокого напряжения, равной 5–20 %, может достигать значений до 50° и более, что существенно больше значений угла в нагрузочном режиме (при  $\cos\varphi_{нагр} = 0,8–0,9$ ;  $\varphi_{нагр} \approx 25–35^\circ$ ). При дальнейшем увеличении доли АДВ, что имеет место для некоторых отраслей промышленности, значение  $\varphi_{зап}$  может достигать 70° и более, что может значительно изменить параметры срабатывания ДЗ линии.

На основе полученных зависимостей  $K_{зап} = f(K_{АДВ})$  и  $\varphi_{зап} = f(K_{АДВ})$  возможно выполнить построение зависимости  $\varphi_{зап} = f(K_{зап})$ .

На рис. 5 показана зависимость угла самозапуска от коэффициента самозапуска при изменении доли АДВ в составе комплексной нагрузки для случая самозапуска АДВ из неподвижного состояния после длительного перерыва питания.

С помощью зависимости  $\varphi_{зап} = f(K_{зап})$  становится возможным определение при заданном  $K_{зап}$  значения  $\varphi_{зап}$ , что особенно важно для выбора параметров срабатывания дистанционной защиты линии.

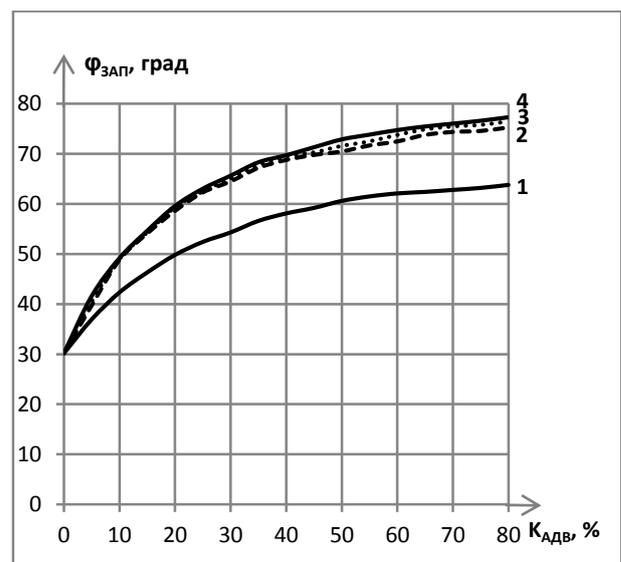


Рис. 4. Зависимость угла самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания: 1 (сплошная линия) – перерыв питания с  $t_{пер} = 0,5$  с; 2 (пунктир, линия) – перерыв питания с  $t_{пер} = 1,5$  с; 3 (пунктир, точка) – перерыв питания с  $t_{пер} = 2,5$  с; 4 – длительный перерыв питания с полной остановкой АДВ

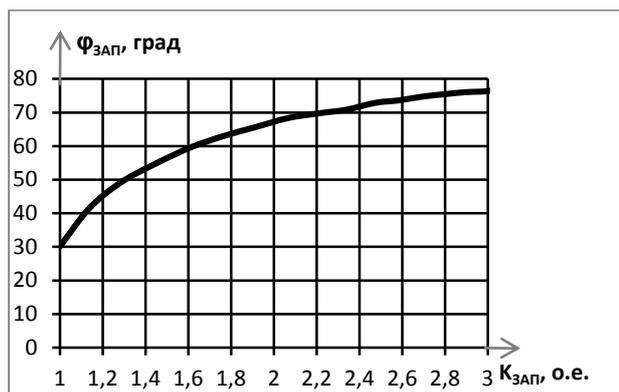


Рис. 5. Зависимость угла самозапуска от коэффициента самозапуска при изменении доли АДВ в составе комплексной нагрузки для случая самозапуска АДВ из неподвижного состояния

Согласно зависимости на рис. 5, при стандартном рекомендованном диапазоне коэффициента самозапуска от 1,5 до 2,0 угол самозапуска принимает значения от  $55^\circ$  до  $\approx 70^\circ$ .

Отметим, что, согласно полученным осциллограммам электрических величин, длительность процесса самозапуска при участии только группы АДВ, например при их доле в комплексной нагрузке, равной 20 %, составляет около 2,0 с.

**Анализ влияния АДН на параметры  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$ .** Рассмотрим влияние доли низковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки на коэффициент самозапуска и угол самозапуска.

Согласно [10], доля АДН в составе комплексной нагрузки для большинства отраслей народного хозяйства значительна и в среднем составляет более 45 %. Для отдельных отраслей промышленности доля АДН может возрастать до 75 % и более, например для пищевой и легкой промышленности.

Как отмечено в [13], в современных схемах электроснабжения АДН могут подключаться к шинным сборкам 0,4 кВ через автоматические выключатели и оставаться подключенными к питающей сети при перерывах питания. С учетом этого влияние низковольтных асинхронных двигателей на параметры режима самозапуска также необходимо рассмотреть.

Для построения зависимостей  $K_{зап} = f(K_{АДН})$  и  $\varphi_{зап} = f(K_{АДН})$  необходимо изменять долю АДН в составе комплексной нагрузки от 0 до 80 % с шагом 5 %. При этом в каждом опыте, аналогично опытам с АДВ, снимаем временные осциллограммы тока в месте установки защиты,  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$ , токов статора, скорости вращения ротора и вращающего электромагнитного момента АДН.

На рис. 6 показана зависимость коэффициента самозапуска от доли низковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки.

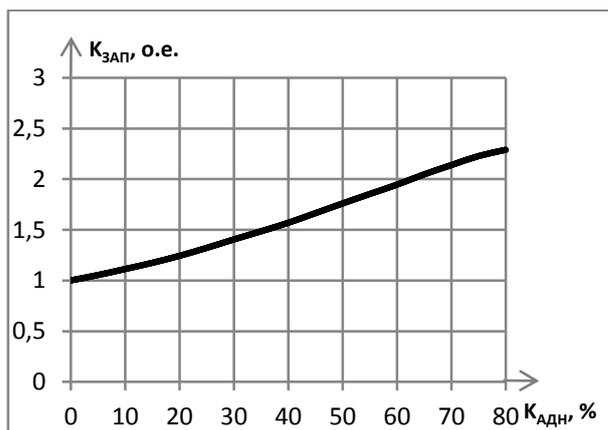


Рис. 6. Зависимость коэффициента самозапуска от доли АДН в составе комплексной нагрузки

Анализ зависимости на рис. 6 показывает, что при обычной доле АДН, равной 40–45 %, коэффициент самозапуска достигает значений выше 1,5, а при доле АДН до 60 % и более  $K_{зап}$  принимает значения более 2, что выше рекомендуемого диапазона.

На рис. 7 показана зависимость угла самозапуска от доли низковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки.

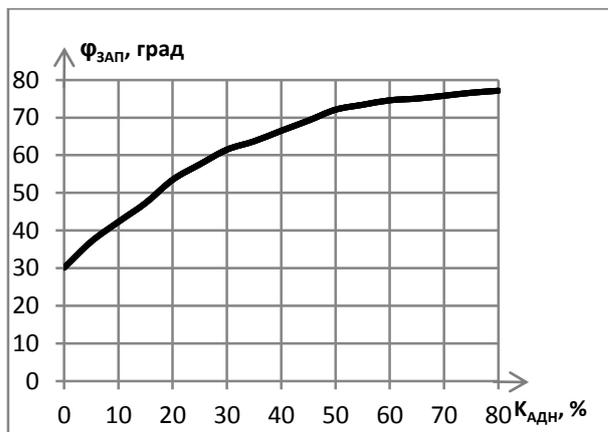


Рис. 7. Зависимость угла самозапуска от доли АДН в составе комплексной нагрузки

Согласно зависимости на рис. 7, угол самозапуска уже при обычной доле двигательной нагрузки низкого напряжения, равной 40–45 %, достигает значения  $\approx 70^\circ$ , что намного больше значений угла в нагрузочном режиме. При дальнейшем увеличении доли АДН для некоторых отраслей промышленности значение  $\varphi_{зап}$  может достигать  $75^\circ$  и более.

Аналогично рассмотренному выше случаю с влиянием на параметры самозапуска АДВ, возможно построить зависимость  $\varphi_{зап} = f(K_{зап})$  при изменении доли АДН в составе комплексной нагрузки. Данная зависимость представлена на рис. 8.

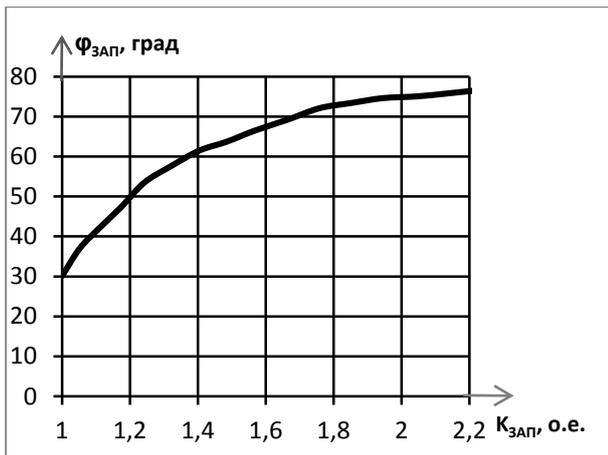


Рис. 8. Зависимость угла самозапуска от коэффициента самозапуска при изменении доли АДН в составе комплексной нагрузки для случая самозапуска АДН из неподвижного состояния

Анализ зависимости на рис. 8 показывает, что при стандартном рекомендованном диапазоне коэффициента самозапуска от 1,5 до 2,0 угол самозапуска принимает значения от  $65^\circ$  до  $\approx 75^\circ$ .

Отметим, что, согласно полученным осциллограммам электрических величин, длительность процесса самозапуска при участии только группы АДН, например при их доле в комплексной нагрузке, равной 40 %, составляет около 2,5 с.

**Анализ совместного влияния АДВ и АДН на параметры  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$ .** Согласно данным [10], в составе комплексной нагрузки большинства отраслей народного хозяйства, кроме статической нагрузки, имеются как АДВ, так и АДН.

При данном исследовании доля АДН принималась равной от 0 до 70 %, фиксировалась, и с ее учетом далее варьировалась доля АДВ (от 0 до 25 %) и, соответственно, оставшаяся доля статической нагрузки.

В результате получены семейства зависимостей  $K_{зап} = f(K_{АДВ})$  и  $\varphi_{зап} = f(K_{АДВ})$  при постоянной доле АДН для каждой из девяти зависимостей, представленных на рис. 9 и 10 соответственно.

Значения параметров самозапуска фиксировались в момент совместного участия АДВ и АДН в процессе самозапуска.

Анализ полученных зависимостей (рис. 9) показывает, что возможны случаи с таким сочетанием АДВ и АДН, что при их одновременном самозапуске коэффициент самозапуска будет выше рекомендуемых методиками значений даже при стандартных долях АДВ и АДН в составе комплексной нагрузки.

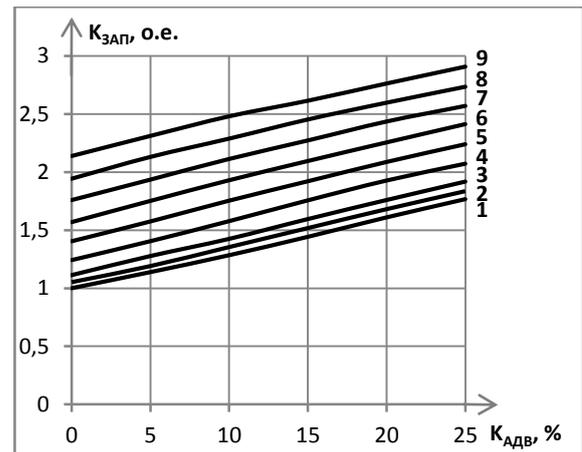


Рис. 9. Семейство зависимостей коэффициента самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при некоторой постоянной доле АДН в каждом случае: 1 – доля АДН 0; 2 – доля АДН 5%; 3 – доля АДН 10%; 4 – доля АДН 20%; 5 – доля АДН 30%; 6 – доля АДН 40%; 7 – доля АДН 50%; 8 – доля АДН 60%; 9 – доля АДН 70%

Анализ зависимостей на рис. 10 показывает, что в большинстве случаев угол самозапуска при совместном самозапуске АДВ и АДН имеет значение, существенно превышающее значение угла в нагрузочном режиме. При этом доля АДН в большинстве случаев не превышает обычного значения 45 %.

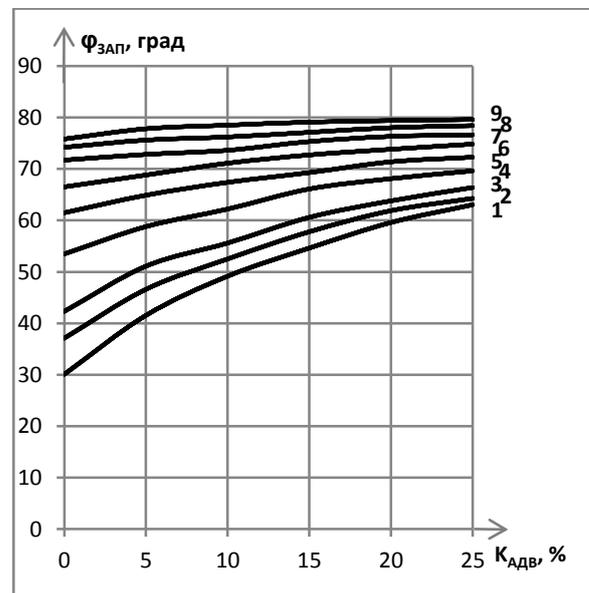


Рис. 10. Семейство зависимостей угла самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при некоторой постоянной доле АДН в каждом случае: 1 – доля АДН 0; 2 – доля АДН 5%; 3 – доля АДН 10%; 4 – доля АДН 20%; 5 – доля АДН 30%; 6 – доля АДН 40%; 7 – доля АДН 50%; 8 – доля АДН 60%; 9 – доля АДН 70%

**Результаты.** На основании проведенного исследования получены следующие результаты.

1. Предложен подход для приближенного расчета параметров режима самозапуска двигательной нагрузки  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$ , используемых при выборе уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП, основанный на применении данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки с делением ее на три категории: АДВ, АДН и статическая нагрузка.

2. С учетом п. 1 в программном комплексе MATLAB разработана обобщенная имитационная модель для расчетов параметров режима самозапуска  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  двигательной нагрузки ЛЭП с односторонним питанием.

3. С использованием разработанной имитационной модели получены зависимости параметров режима самозапуска ЭД от доли АДВ и АДН в составе комплексной нагрузки ЛЭП 110–220 кВ с односторонним питанием:  $K_{зап} = f(K_{АДВ})$ ,  $K_{зап} = f(K_{АДН})$ ,  $\varphi_{зап} = f(K_{АДВ})$ ,  $\varphi_{зап} = f(K_{АДН})$ , а также зависимости  $\varphi_{зап} = f(K_{зап})$ .

4. Показано, что основными факторами, влияющими на параметры режима самозапуска  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  на ЛЭП 110–220 кВ, являются доли АДВ  $K_{АДВ}$ , АДН  $K_{АДН}$  и их соотношение в составе комплексной нагрузки.

**Выводы.** Предложенный подход для приближенного расчета параметров режима самозапуска ЭД может быть использован не только при отсутствии данных о составе комплексной нагрузки защищаемой ЛЭП, но и при их наличии. В последнем случае точность расчетов параметров  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  повышается.

Полученные зависимости  $K_{зап} = f(K_{АДВ})$ ,  $K_{зап} = f(K_{АДН})$ ,  $K_{зап} = f(K_{АДВ}, K_{АДН})$ ,  $\varphi_{зап} = f(K_{АДВ})$ ,  $\varphi_{зап} = f(K_{АДН})$ ,  $\varphi_{зап} = f(K_{АДВ}, K_{АДН})$  и  $\varphi_{зап} = f(K_{зап})$  могут быть использованы для уточнения существующих методик расчета уставок резервных ступеней дистанционных защит при проектировании релейной ЛЭП 110–220 кВ и повышения на этой основе эффективности дальнего резервирования при междуфазных КЗ в электрических сетях высокого напряжения.

#### Список литературы

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
2. Нагай В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 528 с.
4. Голоднов Ю.М., Хоренян А.Х. Самозапуск электродвигателей. – М.: Энергия, 1974. – 144 с.
5. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35–330 кВ / под ред. Т.Н. Дородновой, А.А. Рудман. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 172 с.
6. Методические указания по расчету и выбору параметров настройки дистанционных защит ли-

ней электропередачи 110 кВ и выше [Электронный ресурс] / АО «СО ЕЭС». – М., 2021. – Режим доступа: [https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/method\\_distanc\\_protect\\_power\\_lines\\_281123.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/method_distanc_protect_power_lines_281123.pdf)

7. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

8. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1985. – 296 с.

9. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ЭПИПК, 2003. – 350 с.

10. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования: РД 153-34.0-20.527-98 / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 144 с.

11. Жуков В.В. Короткие замыкания в узлах комплексной нагрузки электрических систем / под ред. проф. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 224 с.

12. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

13. Булычев А.В., Грибков М.А. Анализ процессов самозапуска электродвигателей в современных электрических распределительных сетях с позиций релейной защиты // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 1(50). – С. 30–38.

#### References

1. Fedoseev, A.M., Fedoseev, M.A. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection of electrical power systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 528 p.
2. Nagay, V.I. *Releynaya zashchita otvetvitel'nykh podstantsiy elektricheskikh setey* [Relay protection of branch substations of electrical networks]. Moscow: Energoatomizdat, 2002. 312 p.
3. Syromyatnikov, I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh elektrodvigateley* [Operating modes of asynchronous and synchronous electric motors]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 528 p.
4. Golodnov, Yu.M., Khorenyan, A.Kh. *Samozapusk elektrodvigateley* [Self-starting of electric motors]. Moscow: Energiya, 1974. 144 p.
5. Dorodnova, T.N., Rudman, A.A. (ed.) *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vypusk 7. Distsionnaya zashchita liniy 35–330 kV* [Guidelines for relay protection. Issue 7. Distance protection of 35–330 kV lines]. Moscow; Leningrad: Energiya, 1966. 172 p.
6. Metodicheskie ukazaniya po raschetu i vyboru parametrov nastroyki distantsionnykh zashchit liniy elektroperedachi 110 kV i vyshе [Guidelines for calculating and selecting parameters for setting up distance protection for power transmission lines of 110 kV and higher]. JSC SO UES. Moscow, 2021. Available at: [https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/method\\_distanc\\_protect\\_power\\_lines\\_281123.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/method_distanc_protect_power_lines_281123.pdf)
7. Ul'yanov, S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromagnetic transients in electrical systems]. Moscow: Energiya, 1970. 520 p.
8. Shabad, M.A. *Rascheti releynoy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey* [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. Leningrad: Energoatomizdat, 1985. 296 p.

9. Shabad, M.A. *Raschety releynoy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey* [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. Saint-Petersburg: PEIPK, 2003. 350 p.

10. Neklepaev, B.N. (ed.) *Rukovodyaschie ukazaniya po raschyotu tokov korotkogo замыканиya i vyboru elektrooborudovaniya: RD 153-34.0-20.527-98* [Guidelines for calculating short-circuit currents and selecting electrical equipment: RD 153-34.0-20.527-98]. Moscow: Izdatel'stvo NTs ENAS, 2006. 144 p.

11. Zhukov, V.V. *Korotkie замыканиya v uzlakh kompleksnoy nagruzki elektricheskikh sistem* [Short circuits in complex load nodes of electrical systems]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 1994. 224 p.

12. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press; Saint-Petersburg: Piter, 2008. 288 p.

13. Bulychev, A.V., Gribkov, M.A. *Analiz protsessov samozapuska elektrodvigatelay v sovremennykh elektricheskikh raspredelitel'nykh setyakh s pozitsiy releynoy zashchity* [Analysis of self-starting processes of electric motors in modern electrical distribution networks from the standpoint of relay protection]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2023, no. 1(50), pp. 30–38.